



Российская Академия Наук

Институт озероведения Российской академии наук –
обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский
Федеральный исследовательский центр Российской академии наук»
(ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН)



Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата

Под редакцией д. ф.-м. н. С. А. Кондратьева,
д. г. н. Ш. Р. Позднякова, академика РАН, проф. В. А. Румянцева

Технический редактор – к. ф.-м. н. А. М. Расулова

Москва
2021

УДК 504.064.2

ББК 20.18

С56

Авторский коллектив:

Институт озераведения СПб ФИЦ РАН: В. М. Анохин, М. А. Барбашова, С. Д. Голосов, В. В. Гузиватый, А. В. Гузева, М. А. Гусева, М. О. Дудаков, Д. С. Дудакова, И. С. Зверев, Е. В. Иванова, Н. В. Игнатьева, А. В. Измайлова, Л. Л. Капустина, С. Г. Каретников, С. А. Кондратьев, Н. Ю. Корнеенкова, К. Д. Коробченкова, Д. Д. Кузнецов, Е. А. Курашов, А. Е. Лапенков, А. В. Лудикова, А. К. Ляховская, Г. Г. Митрукова, М. А. Наumenко, О. А. Павлова, Т. Н. Петрова, Ш. Р. Поздняков, Е. В. Протопопова, А. М. Расулова, А. В. Ревунова, В. А. Румянцев, А. Г. Русанов, В. Н. Рыбакин, Т. В. Сапелко, А. В. Терехов, Д. А. Тихонова, И. В. Токарев, М. С. Трифонова, В. И. Уличев, Е. А. Шипунова, М. В. Шмакова; **Центр экологической безопасности СПб ФИЦ РАН:** Е. Ю. Воякина, В. В. Кулибаба; **Институт водных проблем Севера ФИЦ КарНЦ РАН:** А. Ф. Балаганский, Н. Н. Филатов; **Институт леса ФИЦ КарНЦ РАН:** Ю. В. Карпечко; **Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН:** А. В. Исаев; **Институт проблем региональной экономики РАН:** В. В. Меншуткин; **Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФНАЦ ВИМ:** В. Ю. Брюханов, Э. В. Васильев, Н. С. Обломкова; **СПб Филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ГосНИОРХ» им. Л. С. Берга):** Н. М. Аршаница, В. А. Гребенников, М. Р. Гребцов, С. Б. Екимова, Ю. А. Зуев, Е. В. Колосовская, Ю. В. Крылова, А. Г. Леонов, Г. Ф. Ляшенко, А. М. Пономаренко, А. Ю. Романов, Е. С. Светашова, М. А. Синякова, Е. М. Фисак, А. С. Шурухин, Е. Я. Явид; **Институт наук о земле СПбГУ:** О. П. Савчук; **Российский государственный гидрометеорологический университет:** А. В. Бабин, Н. В. Зуева, А. Б. Степанова, А. Н. Чернышев; **ФГБВУ «Центррегионводхоз»:** А. Ю. Куличенко; **СПбГУ ветеринарной медицины:** А. А. Стекольников; **СПб МБОО «Биологи за охрану природы»:** И. С. Труханова.

Монография одобрена Советом по наукам о Земле ОНЗ РАН
Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Рекомендована к опубликованию решением Ученого совета ИНОЗ РАН
от 26.03.2020 г.

Рецензент – д. т. н., проф. Н. А. Нестеров

Настоящая монография является обобщением выполненных за последнее десятилетие исследований Института озераведения РАН и других организаций в области изучения Ладожского озера – крупнейшего пресноводного водоема Европы. Решен ряд важных фундаментальных и прикладных задач по оценке антропогенной трансформации экосистемы Ладожского оз. в условиях изменяющегося климата, существенно расширяющих име-

ющиеся представления о функционировании и развитии самого озера и его водосборной территории. Палеолимнологические исследования позволили проследить историю озера с позднеледникового периода и на протяжении всего голоцена. Выявлены изменения термического режима Ладоги, связанные с климатическими изменениями. Дана оценка воздействия водосбора на состояние озерной экосистемы. Создана новая геоморфологическая карта, на которой отражены особенности строения дна озера. Гидрологические, гидрохимические, гидробиологические и токсикологические исследования позволили оценить современное состояние озера и его притоков. Выявлены зоны экологического риска на акватории и водосборной территории, требующие регулярного мониторинга для предотвращения возникновения катастрофических ситуаций, связанных с возможным неконтролируемым негативным воздействием этих зон на весь водоем. На акватории озера и его притоках проведены исследования по оценке загрязнения микропластиком. Достигнуты значительные успехи в создании и практическом применении моделей термогидродинамических процессов и экосистемы Ладожского оз. Сформулированы принципы и основные направления совершенствования мониторинга Ладожского оз.

Результаты исследований могут представлять интерес для широкой научной общественности, занимающейся вопросами изучения, охраны и рационального использования водных объектов.

This monograph is a synthesis of the studies carried out over the past decade by the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences and other organizations in the field of studying Lake Ladoga, which is the largest freshwater body in Europe. A number of important fundamental and applied problems have been solved to assess the anthropogenic transformation of the ecosystem of Lake Ladoga in a changing climate. It helps to expand understanding of the functioning and development of the lake itself and its catchment area. Paleolimnological studies allow to trace the history of the lake from the Late Ice Age and throughout the Holocene. Changes in the thermal regime of Ladoga due to climatic changes have been revealed. The impact of the catchment area on the lake ecosystem has been assessed. A new geomorphological map reflecting the structural features of the lake bottom has been created. Hydrological, hydrochemical, hydrobiological and toxicological studies allowed to assess the current state of the lake and its tributaries. Ecological risk zones in the water and catchment areas have been identified. They require regular monitoring to prevent catastrophic situations associated with the possible uncontrolled negative impact of these zones on the entire water body. Studies to assess microplastic pollution in the water area of the lake and its tributaries have been carried out. There is a significant progress in development and practical application of models of thermohydrodynamic processes and models of Lake Ladoga ecosystem. The principles and main directions for improving monitoring of Lake Ladoga have been formulated.

The research results could be interesting for the general scientific community dealing with study, protection and rational use of water bodies.

Оглавление

Введение.....	9
Глава 1. Ладожское озеро – геостратегический водный объект, определяющий жизнедеятельность северо-западных территорий России (С.А. Кондратьев, А.П. Алхименко, Л.А. Кудерский).....	12
Глава 2. Физико-географическое описание Ладожского озера и его водосбора	22
2.1 Общая характеристика водосбора (А.В. Измайлова, М.А. Науменко)	22
2.2 Геология и рельеф (А.В. Измайлова).....	25
2.3 Климат Ладожского водосбора (А.В. Измайлова)	26
2.4 Ландшафтная характеристика Ладожского водосбора (А.В. Измайлова)	28
2.5 Гидрографическая сеть Ладожского водосбора (А.В. Измайлова).....	31
2.6 Малые озера в пределах Ладожского бассейна (А.В. Измайлова, Н.Ю. Корнеевкова).....	34
2.7 Пространственно-временная динамика водной поверхности бассейна Ладожского озера (А.М. Расулова)	39
2.8 Котловина Ладожского озера и характер берегов (М.А. Науменко)	47
2.9 Современная освоенность водосбора и его влияние на экосистему озера (А.В. Измайлова)	49
Глава 3. Природное и антропогенное воздействие на Ладожское озеро и его водосбор в позднеледниковый и голоценовый периоды	54
3.1 История и методика палеолимнологических исследований (Т.В. Сапелко, А.В. Лудикова, Д.Д. Кузнецов, Н.В. Игнатьева, М.А. Гусева, А.В. Терехов, Н.Ю. Корнеевкова).....	54
3.2 Отражение климатических и антропогенных изменений позднеледниковья и голоцена в колонках донных отложений Ладожского озера (Т.В. Сапелко, А.В. Лудикова, Д.Д. Кузнецов, Н.В. Игнатьева, М.А. Гусева, А.В. Терехов)	59
3.3 Периодизация органического осадконакопления в Ладожском озере	81
3.4 Использование субфоссильных диатомовых комплексов в оценке экологического состояния Ладожского озера (А.В. Лудикова).....	84
3.5 Начало антропогенного воздействия и древняя история сельскохозяйственной деятельности на водосборе Ладожского озера (Т.В. Сапелко).....	90
3.6 Особенности заболачивания побережья Ладожского озера в голоцене (Н.Ю. Корнеевкова).....	93
3.7 Реконструкция Ладожской трансгрессии (А.В. Терехов)	97
Глава 4. Факторы воздействия водосбора	102
4.1 Сток с водосбора в условиях меняющегося климата (С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова, К.Д. Коробченкова).....	103
4.2 Сток наносов и мутность воды основных притоков Ладожского озера (М.В. Шмакова)	108
4.3 Сельскохозяйственная деятельность на водосборе и сформированная биогенная нагрузка (В.Ю. Брюханов, Н.С. Обломкова, Э.В. Васильев)	113

4.4 Влияние лесохозяйственных мероприятий на сток и вынос биогенных элементов с лесных водосборов Карелии (С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова, Ю.В. Карпечко, А.В. Терехов)	125
Глава 5. Особенности геолого-геоморфологического строения дна Ладожского озера, его берегов и подводных ландшафтов	136
5.1 Донные ландшафты Ладожского озера (Д.С. Дудакова, В.М. Анохин, М.О. Дудаков)	136
5.2 Плотность частиц донных отложений Ладожского озера (Ш.Р. Поздняков, А.В. Ревунова)	146
5.3 Геоморфологические особенности дна и берегов Ладожского озера (В.М. Анохин, М.А. Науменко, Д.С. Дудакова, М.О. Дудаков, В.Н. Рыбакин)	151
5.4 Распространение вод притоков и подземных вод по данным изотопных индикаторов (В.А. Румянцев, В.Н. Рыбакин, И.В. Токарев, В.М. Анохин)	165
Глава 6. Водный баланс и уровень Ладожского озера	177
6.1 Оценка элементов водного баланса (Н.Н. Филатов, А.Ф. Балаганский)	177
6.2 Изменчивость уровня воды и его прогнозирование (Н.Н. Филатов, В.А. Румянцев)	181
Глава 7. Термодинамические особенности Ладожского озера в связи с климатическими изменениями.....	194
7.1 Реакция димиктических озер на климатические изменения (М.А. Науменко).....	194
7.2 Многолетние тренды температуры воздуха (М.А. Науменко).....	198
7.3 Радиационный баланс поверхности Ладожского озера (А.Е. Лапенков, М.А. Науменко)	204
7.4 Климатические соотношения между температурой воздуха и температурами воды различных лимнических районов Ладожского озера (М.А. Науменко, В.В. Гузиватый)	208
7.5 Особенности климатических соотношений температуры поверхности воды и приводного слоя воздуха в период существования весенней фронтальной зоны (М.А. Науменко)	211
7.6 Установление связей между характеристиками весенней термической зоны и внешними воздействиями (С.Г. Каретников, М.А. Науменко)	220
7.7 Климатические вариации ледового режима Ладожского озера (М.А. Науменко, С.Г. Каретников)	224
7.8 Течения на поверхности Ладожского озера на основе последовательных ИК-спутниковых съемок (В.В. Гузиватый, М.А. Науменко)	232
Глава 8. Гидрохимический режим Ладожского озера и его притоков: многолетняя динамика и современное состояние	244
8.1 Основной ионный состав воды и электропроводность (М.А. Гусева, Н.В. Игнатьева)	247
8.2 Кислород и водородный показатель (М.А. Гусева, Н.В. Игнатьева)	251
8.3 Органическое вещество (Т.Н. Петрова, Н.В. Игнатьева)	258
8.4 Биогенные элементы (Т.Н. Петрова, Н.В. Игнатьева)	270
8.5 Взвешенные вещества (Т.Н. Петрова, Н.В. Игнатьева)	287

Глава 9. Гидробиологический режим Ладожского озера и его притоков под воздействием природных и антропогенных факторов	300
9.1 Фитопланктон (Е.В. Протопопова)	300
9.2 Перифитон литоральной зоны (А.Г. Русанов)	310
9.3 Высшая водная растительность (А.Г. Русанов)	316
9.4 Бактериопланктон (Л.Л. Капустина, Г.Г. Митрукова)	323
9.5 Водные грибы (И.В. Иофина)	336
9.6 Зоопланктон (Н.В. Родионова, А.К. Ляховская)	342
9.7 Макрозообентос (М.А. Барбашова)	353
9.8 Мейозообентос (Д.С. Дудакова, Е.А. Курашов)	361
9.9 Развитие инвазионного процесса в условиях изменяющегося климата (Е.А. Курашов, М.А. Барбашова, Д.С. Дудакова, А.Г. Русанов, М.С. Трифонова, Н.В. Родионова, М.О. Дудаков, А.К. Ляховская)	374
9.10 Современное состояние рыбных запасов Ладожского озера и их использование (А.Г. Леонов, А.С. Шурухин)	394
Глава 10. Современные специфические аспекты антропогенного воздействия на Ладожское озеро	421
10.1 Загрязнение искусственными полимерами на примере частиц микропластика (Ш.Р. Поздняков, Е.В. Иванова, А.В. Гузева, Д.А. Тихонова, С.Г. Каретников, А.Е. Лапенков)	421
10.2 Закономерности формирования низкомолекулярного метаболизма макрофитов (Е.А. Курашов, Ю.В. Крылова, А.Г. Русанов, Е.Я. Явид, В.В. Ходонович)	425
10.3 Токсикологическая характеристика среды обитания биологических ресурсов в Ладожском озере (Ю.В. Крылова, Е.С. Светашова, А.М. Пономаренко, С.Б. Екимова, Е.А. Курашов, М.А. Синякова, Г.Ф. Ляшенко, Е.В. Колосовская, Н.М. Аршаница, Е.М. Фисак, В.В. Ходонович, Е.Я. Явид, В.А. Гребенников, А.Ю. Романов)	432
10.4 Воспроизводство рыб и беспозвоночных в условиях загрязнения озера (Е.А. Курашов, Н.М. Аршаница, А.А. Стекольников, М.А. Барбашова, М.Р. Гребцов)	439
10.5 Тяжёлые металлы в промысловых видах рыб Ладожского озера (Е.С. Светашова, С.Б. Екимова, Ю.В. Крылова)	446
10.6 Состояние популяции ладожской кольчатой нерпы (В.И. Уличев, Д.С. Дудакова, М.О. Дудаков, И.С. Труханова)	451
Глава 11. Водная система Валаамского архипелага	457
11.1 Прибрежная зона Ладожского озера (А.Б. Степанова, Е.Ю. Воякина, Н.В. Зуева, А.В. Бабин, А.Е. Лапенков)	459
11.2 Внутренние озера, связанные с Ладогой (А.Б. Степанова, Е.Ю. Воякина, Н.В. Зуева, А.Ю. Куличенко, А.Н. Чернышев)	471
11.3 Малые лесные озера (А.Б. Степанова, Е.Ю. Воякина, Н.В. Зуева, А.Ю. Куличенко, А.В. Бабин)	477
Глава 12. Математическое моделирование как инструмент оценки влияния хозяйственных и климатических факторов на озеро и прогноза их последствий	485
12.1 Особенности моделирования экосистемы Ладожского озера на начальных этапах развития исследований (Н.Н. Филатов, В.В. Менишуткин)	485

12.2 Разработка новых моделей термогидродинамики и экосистемы Ладожского озера (Н.Н. Филатов)	491
12.3 Моделирование термогидродинамических процессов и экосистем Ладожского и Онежского озер на основе 3D-модели гидродинамики внутреннего моря – МГВМ (С.Д. Голосов, И.С. Зверев, Е.А. Шипунова)	493
12.4 Диагноз состояния экосистемы Ладожского озера и прогноз изменений при возможном изменении климата на основе математического моделирования биогеохимических потоков вещества (А.В. Исаев, О.П. Савчук, Н.Н. Филатов)	501
12.5 Применение математического аппарата клеточных автоматов при моделировании экосистемы Ладожского озера (В.В. Менишуткин)	503
Глава 13. Основные современные проблемы Ладоги и методы их решения	514
13.1 Зоны накопленного риска, сформированные на водосборе Ладожского озера в результате нерациональной сельскохозяйственной деятельности (А.Ю. Брюханов, Н.С. Обломкова)	514
13.2 Отходы потребления и производства как фактор антропогенного воздействия на водосбор Ладожского оз. (В.В. Кулибаба)	520
13.3 Загрязнение мелководного донного ландшафта твердыми бытовыми отходами (Д.С. Дудакова, В.М. Анохин, М.О. Дудаков)	529
13.4 Зоны экологического риска, выявленные на основе гидробиологических и гидрохимических показателей (С.А. Кондратьев) ..	533
Глава 14. Современное состояние и совершенствование системы мониторинга Ладожского озера (В.А. Румянцев, Н.Н. Филатов, С.А. Кондратьев)	540
Заключение	559
Список использованных источников	573

*Монография посвящается юбилею
Института озероведения РАН
и его первого директора С. В. Калесника*

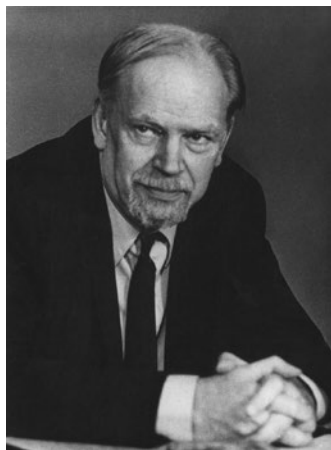


Фото: Научный архив РГО

2021 год – юбилейный для Института озероведения РАН. Исполняется 50 лет преобразования Лаборатории озероведения в Институт, которое осуществилось благодаря академику АН СССР Станиславу Викентьевичу Калеснику, 120 лет со дня рождения которого мы отмечаем в этом году.

Станислав Викентьевич Калесник (1901–1977) – выдающийся географ, ландшафтовед, гляциолог и лимнолог, академик АН СССР, первый директор Института озероведения, основатель Комплексной Ладожской экспедиции, автор и редактор первой многотомной монографии о Ладожском озере.

Станислав Викентьевич руководил Лабораторией озероведения с 1955 года. Под руководством С. В. Калесника в Лаборатории, а затем в Институте сложился коллектив специалистов – географов, гидрологов, геоморфологов, геоботаников, гидрофизиков, гидробиологов, гидрохимиков. В 1961–1968 гг. результаты комплексных исследований Ладожского озера опубликованы в восьми томах монографии, получивших почетный диплом Географического общества СССР. Комплексные методы исследования озер, которые активно развивал академик, позволяют изучать взаимодействие процессов на водосборном бассейне, в атмосфере и в озере. Это положение исследований Ладожского озера под руководством С. В. Калесника является основополагающим и в современных исследованиях Института озероведения РАН. Проведение в 1971 году в г. Ленинграде Международного Лимнологического конгресса под руководством председателя организационного комитета академика С. В. Калесника стало признанием исследований Лаборатории и Института озероведения на высоком международном уровне.

Представленная новая монография Института озероведения РАН является продолжением традиции обобщения результатов очередного этапа комплексных исследований Ладожского озера, заложенной Станиславом Викентьевичем Калесником.

Введение

Ладожское озеро – геостратегический водный объект, определяющий жизнедеятельность северо-западных территорий России, которые напрямую зависят от экологического состояния озера и его водосбора. Поэтому основные положения государственной стратегии РФ по охране окружающей среды и обеспечению устойчивого развития, утвержденные Указом Президента РФ от 4 февраля 1994 г. № 236, предусматривают как одно из основных направлений работы сохранение природных комплексов Онежского и Ладожского озер. Важность сохранения водных ресурсов Ладожского и Онежского озер отмечена и в решении Совета Безопасности РФ от 20 ноября 2013 г. Тем не менее научно обоснованная и официально утвержденная на государственном уровне стратегия рационального использования водных ресурсов этой крупнейшей пресноводной системы в настоящее время отсутствует.

Объективная оценка роли Ладожского оз. для обеспечения жизнедеятельности блокадного Ленинграда в период Отечественной войны 1941–1945 гг. способствовала тому, что 16.12.1943 г. решением Президиума АН СССР в г. Ленинграде была образована Лаборатория озероведения, преобразованная в 1971 г. в Институт озероведения АН СССР. В 1991 г. Институт перешел в подчинение РАН, а в 2020 г. стал обособленным подразделением Санкт-Петербургского Федерального Исследовательского Центра РАН (ИНОЗ РАН СПб ФИЦ РАН). В настоящее время в Уставе Института одно из основных направлений научной деятельности определено следующим образом: «Фундаментальные и прикладные комплексные исследования системы Ладожское озеро – река Нева – Финский залив как геостратегического водного объекта». Тематика исследований Института последних лет соответствует приоритетным направлениям Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации [Стратегия..., 2016]:

- Противодействие техногенным, биогенным, социокультурным угрозам, терроризму и идеологическому экстремизму, а также киберугрозам и иным источникам опасности для общества, экономики и государства.

- Исследование механизмов формирования антропогенной нагрузки на водные объекты и их экосистемы, а также прогноз их экологического состояния.

Полученные результаты исследований способствуют решению одной из важнейших проблем современного общества – предотвращению деградации окружающей среды и, следовательно, связанному с ней неминуемому экономическому спаду.

В течение нескольких десятилетий прошлого века из-за несовершенства и несоблюдения природоохранного законодательства промышленными, сельскохозяйственными и жилищно-коммунальными предприятиями, судоходными, рыболовецкими и туристическими компаниями, а также иными организациями состоянию экосистемы Ладожского оз. и прибрежной зоны был нанесен значительный ущерб. В 60–80-е годы прошлого века Ладога совершила стремительный скачок из олиготрофного состояния в мезотроф-

ное, отдельные районы приобрели черты эвтрофных водоемов. Увеличившееся поступление в озеро биогенных веществ, прежде всего соединений фосфора и азота, стимулировало массовое развитие водорослей фитопланктона, макрофитов и обрастаний. «Цветение» воды, обусловленное интенсивным развитием цианобактерий (синезеленых водорослей), которые были характерны для Ладоги и в олиготрофный период, с развитием антропогенного эвтрофирования стали более частым явлением. Процесс эвтрофирования сопровождался изменением ряда физико-химических характеристик воды, в частности периодическим снижением концентрации растворенного кислорода в гипolimнии. В местах, находящихся под непосредственным влиянием сточных вод, стали образовываться «мертвые зоны», где беспозвоночный бентос отсутствовал. К таким зонам примыкали обширные полисапробные районы, в которых типичные представители ладожской фауны не встречались. Из-за загрязнения Ладожского оз. тяжелыми металлами, нефтепродуктами и различными другими органическими соединениями, в том числе токсичными, у ряда гидробионтов в бентосе и планктоне были выявлены характерные морфологические деформации, а у рыб отмечен высокий процесс токсикозов.

Закрытие в 1986 г. Приозерского ЦБК по инициативе Института озераведения и последующий экономический спад 1990-х годов привели к снижению антропогенной нагрузки на озеро и способствовали постепенному улучшению его состояния. Несмотря на некоторую стабилизацию экологических условий в Ладожском оз., проблема улучшения качества его воды и состояния прибрежной зоны продолжает оставаться актуальной. Оценка и прогноз антропогенной нагрузки на побережья, водную среду и донные отложения Ладоги, а также отклика экосистемы озера на внешние воздействия в условиях меняющегося климата, сделанные на основе натурных данных мониторинга и математического моделирования, в настоящее время является важнейшей научной задачей. Для разработки эффективных мероприятий по снижению негативных последствий хозяйственной деятельности на водосборе требуется уделять пристальное внимание процессам поступления загрязняющих веществ и биогенных элементов в речную гидрографическую сеть бассейна и непосредственно в Ладожское оз., а также формированию загрязнения и эвтрофирования водной массы.

В последние годы основной объем исследований Ладожского оз. и его водосбора выполнялся в рамках следующих тем Госзадания Института озераведения РАН: «Разработка и совершенствование научных, технических, методических и правовых основ с целью сохранения Ладожского озера как геостратегического объекта федерального значения на основе комплексных исследований», № госрегистрации – 01201363379; «Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов», № госрегистрации – АААА-А19-119031890106-5, а также по проектам Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы, раздел «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах» Проект 12фцп-Н9-01 «Совершенствование монито-

ринга состояния экосистемы и качества вод Ладожского озера и р. Невы» и Проект 12фцп-Н9–02 «Оценка современного состояния и прогноз тенденций изменения экосистемы Ладожского озера и р. Невы».

В настоящей монографии представлены результаты многолетних географических, гидрологических, гидрохимических и гидробиологических исследований Ладожского оз. и его водосборного бассейна, основанные на комплексных натурных наблюдениях и результатах математического моделирования. Кроме ИНОЗ РАН СПб ФИЦ РАН, в подготовке монографии принимали активное участие сотрудники Института водных проблем Севера и Института леса ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Центра экологической безопасности СПб ФИЦ РАН, Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФНАЦ ВИМ, СПб Филиала ФГБНУ «ВНИРО» («ГосНИОРХ» им. Л.С. Берга), ФГБОУ ВО Российский государственный гидрометеорологический университет, ФГБВУ «Центррегионводхоз», Института наук о земле СПбГУ, СПбГУ ветеринарной медицины, СПб МБОО «Биологи за Охрану Природы».

Глава 1. Ладожское озеро – геостратегический водный объект, определяющий жизнедеятельность северо-западных территорий России

Как уже отмечалось выше, Ладожское оз. площадью 17680 км² с объемом водной массы 848 км³ и суммарной площадью водосбора более 283000 км² является крупнейшим пресноводным водоемом Европы [Атлас..., 2002; Ладога, 2013; Ладожское..., 2015]. Водосбор Ладоги размещен в пределах семи субъектов Российской Федерации: Ленинградской области (39% от площади российской части водосбора), Карелии (29%), Новгородской (17%), Псковской (6%), Тверской (4%), Вологодской (3%) и Архангельской (2%) областей. Воды Ладожского оз. практически полностью определяют сток реки Невы, который оказывает существенное воздействие на состояние и формирование вод Балтийского моря, расположенного у побережий трех стран Финского залива. Озеро играет ключевую роль в экономике европейской части РФ в целом не только как крупнейший источник водных ресурсов, но и как важное звено водной транспортной магистрали, связывающей северо-западный регион с центральными и южными регионами России и обеспечивающей выход на зарубежные рынки через Финский залив и Балтийское море. Водосбор Ладоги имеет высокий культурно-исторический и рекреационный потенциалы. На озере работают крупные рыболовецкие и рыбоводческие предприятия.

Особую актуальность в последние годы приобретает проблема поиска альтернативного источника водоснабжения Санкт-Петербурга и других населенных пунктов Приладожья. Забор воды для Санкт-Петербурга в настоящее время осуществляется из реки Невы, качество воды в которой оставляет желать лучшего. Сложность решения задачи заключается в том, что морфометрическая неоднородность Ладожского оз., определяющая неоднородность гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических характеристик, приводит к различной степени загрязнения отдельных озерных районов в результате антропогенного воздействия на него. Организация выбора местоположения возможных водозаборов на акватории Ладоги заключается, прежде всего, в определении района озера, обладающего значительным объемом чистой воды и подверженного минимальным воздействиям загрязненных или потенциально загрязненных вод, поступающих с водосбора или от других источников. Объем воды в указанном районе должен обеспечивать бесперебойное водоснабжение населенного пункта или промышленного предприятия водой со стабильными гидрохимическими и гидробиологическими характеристиками в течение длительного промежутка времени. Организация водозабора на акватории Ладожского оз. должна выполняться не только на основе существующих в настоящее время показателей качества воды, но и учитывать перспективы изменения антропогенной нагрузки на него и возможности потенциального попадания загрязняющих веществ в точку расположения водозабора. Перенос примесей и формирование качества воды в крупном водоеме в значительной мере

определяется характером динамических явлений, возникающих под действием гидрологических и метеорологических факторов, и в первую очередь течений и турбулентности. Наиболее значимыми динамическими явлениями в озере являются циклоническая циркуляция в период существования вертикальной термической фронтальной зоны (термобара), горизонтальный термический фронт (термоклин), апвеллинги, ветровые и инерционные течения. Внутриводоемные процессы, не связанные с внешней нагрузкой, в гораздо меньшей степени (по сравнению с внешними факторами) воздействуют на качество воды Ладожского оз., особенно в центральной его части. На основе выполненных в Институте озераведения исследований установлено, что те объемы воды, которые потенциально могут быть использованы для питьевого водоснабжения Санкт-Петербурга и других крупных населенных пунктов Приладожья, находятся в западной и юго-западной частях акватории Ладожского оз. с глубинами более 20 и 50 м (рис. 1.1). Запас воды в озере ниже плоскостей, ограниченных изобатами 20 и 50 м, рассчитанный в лаборатории гидрологии ИНОЗ РАН на основе цифровой модели ложа озера, оценивается в 555 и 264 км³ соответственно [Науменко, 1995; 2013; Кондратьев, Поздняков, 2012; Кондратьев и др., 2012; Ладога, 2013].

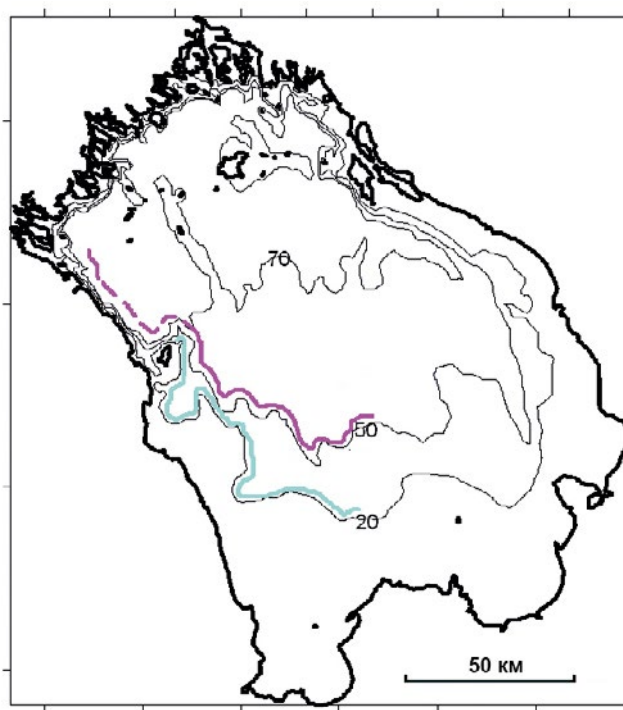


Рис. 1.1 – Расположение границ акватории Ладожского оз. с глубинами более 20 и 50 м

Водные пространства Ладожского оз. издревле используются для судоходства. Во времена Киевской Руси и до начала XVIII века здесь пролегал знаменитый торговый путь «из варяг в греки». В настоящее время

Ладожское оз. является важнейшим звеном в транзитном водном пути из внутренних районов страны в Балтийское море. Главная транспортная артерия внутреннего водного транспорта, проходящая в южной части озера от устья Свири до истока Невы, является составной частью Волго-Балтийского водного пути. Ее протяженность в водах Ладоги превышает 70 миль. Каждую навигацию по ней перевозятся разнообразные грузы как в транзитном, так и в местном сообщениях. Волго-Балтийский водный путь обеспечивает транспортную связь Балтийского и Белого морей с Волжско-Камским воднотранспортным бассейном. Глубина его судоходных фарватеров составляет не менее 4 м, что обеспечивает проход судов грузоподъемностью до 5 тыс. т. Крупнейшая глубоководная магистраль страны (859 км), начинаясь в устье Невы, проходит по этой короткой, но очень полноводной реке, нередко беспокойному Ладожскому оз., реке Свирь, Онежскому оз., Волго-Балтийскому судоходному каналу и соединяется с Рыбинским водохранилищем Волги. Продолжением Волго-Балтийского водного пути является Беломорско-Балтийский канал, соединяющий Онежское оз. с Белым морем [Алхименко, 2005; Ладога, 2013]. Схема Волго-Балтийского водного пути представлена на рис. 1.2.

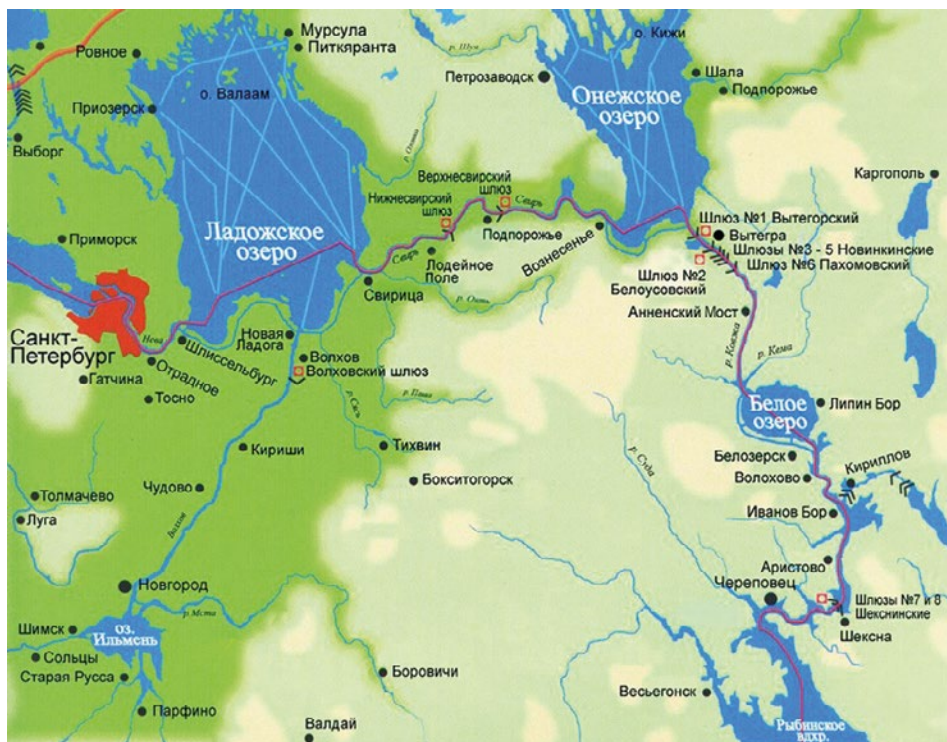


Рис. 1.2 – Схема Волго-Балтийского водного пути

В целом Волго-Балтийский водный путь представляет собой сложный комплекс инженерных объектов, включающий 4,9 тыс. км эксплуатируемых водных путей (в том числе 3,27 тыс. км с гарантированными габаритами),

11 шлюзов с напором от 11 до 18 м, три гидроэлектростанции, 25 земляных плотин и дамб, 12 паромных переправ, 9 мостовых переходов, 8 маяков в Ладожском оз., более 5 тыс. знаков судоходной обстановки. Его пропускная способность достигает 20 млн т различных грузов.

Главная особенность судоходства по Волго-Балтийскому водному пути – это сочетание резко различающихся по своему характеру озерных (прежде всего Ладоги) и речных условий плавания. Наиболее сложными навигационными особенностями в Ладожском оз. и на подходах к нему отличаются: минимальные габариты Нижнесвирского шлюза (198×17,6 м), где может шлюзоваться только одно судно; штормовые ветры в октябре (при северных ветрах высота волн может достигать 6 м); Кошкинский фарватер через мелководную отмель Шлиссельбургской губы; перекаты «Кривое колено» и «Ивановские пороги» на Неве; небольшие высоты неразведенных невских мостов (наименьшая 36 м).

Создание Волго-Балтийского водного пути сделало возможным сквозную перевозку грузов на судах «река-море» из портов Балтийского моря в порты Каспийского, Азовского и Черного морей, а также доставку импортных грузов в российские внутренние речные порты из морских портов ряда стран Западной Европы и Средиземноморья. Объемы среднегодовых перевозок достигают 15–20 млн т, из них, как правило, на строительные материалы приходится 24–36%, на нефтепродукты – 28–31%, металлы – 9–12%, лесные грузы – 7–14%, минеральные удобрения и химические грузы – 3–6%. За навигацию по Волго-Балтийскому водному пути проходит свыше 19–20 тыс. судов, в том числе 2,7–3 тыс. пассажирских (большая часть круизных), на которых ежегодно перевозится около 300 тыс. человек. Услугами Волго-Балта пользуется не менее 150 судоходных компаний. Основная часть грузов (11–14 млн т) следует в порты Балтийского моря через южную часть Ладожского озера. Всего за навигацию по этой оживленной трассе проходит более 8 тыс. судов, из них 6,5 тыс. – грузовые (в том числе свыше 26% – танкеры и наливные баржи). На более чем 80 теплоходах здесь перевозится около 160 тыс. пассажиров, следующих в основном по маршруту Санкт-Петербург – Москва.

Наиболее оживленная трасса круизных линий в Ладожском оз. протекает к острову Валаам и к живописному шхерному району Карелии. Значительное число туристских теплоходов транзитом через озеро следует по маршруту Санкт-Петербург – Москва к Астрахани, Ростову-на-Дону и некоторым другим речным портам страны. На Ладоге нет крупных портов, но имеется много гаваней, используемых как при транзитных перевозках грузов, так и при перевозке грузов и пассажиров в пределах озера. К ним относятся пристани и причалы в Свирице, Новой Ладоге, Петрокрепости, Сортавале, Лахденпохье, Питкяранте, Приозерске, бухте Монастырская на острове Валаам. К основным транспортно-экологическим проблемам судоходства в Ладожском оз. относятся [Алхименко, 2005; Ладога, 2013]:

- незначительная глубина подходных фарватеров и акватории на подходах к Неве (Кошкинский фарватер через мелководную отмель Шлиссельбургской губы) и реке Свирь;
- старение и износ судов внутреннего водного плавания;

- недостаток специализированных перегрузочных терминалов и причалов для судов пассажирского флота;
- отсутствие современных яхт-клубов в инфраструктуре водного туризма;
- устаревание значительной части существующих причальных сооружений;
- загрязнение водных путей маломерным флотом;
- несовершенство системы управления движением судов и координации действий сил, участвующих в ликвидации аварийных нефтеразливов и других чрезвычайных ситуаций;
- нарушение мер по обеспечению экологической безопасности при эксплуатации судов и портов;
- недостаточный объем инвестиций в развитие транспортной инфраструктуры;
- несанкционированные сбросы при судоходстве.

Уменьшение негативного воздействия судоходства на окружающую среду в Ладожском оз. может быть достигнуто за счет реконструкции гидротехнических сооружений на магистральных участках Волго-Балтийского водного пути (включая строительство второй ветки канала), модернизации и реконструкции существующих портов и транспортной инфраструктуры в целом, разработки и реализации современной системы локализации и ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов, реконструкции судоходных и портовых фарватеров (каналов) с одновременным обновлением парка технических средств путевого хозяйства, судов обеспечения, средств спасения людей и обеспечения безопасности плавания, развертывания экологического мониторинга в интересах природоохранной деятельности всего транспортного комплекса.

Ладожское оз. является уникальным природным комплексом, обладающим богатейшим туристско-рекреационным потенциалом. Формирование и развитие рекреационного природопользования и водопользования происходило и происходит здесь под влиянием социально-экономических, культурно-исторических, природоведческих, медико-биологических и других факторов, которые в свою очередь менялись во времени и пространстве. На протяжении веков Ладога была центром притяжения жителей нынешнего северо-запада России и ряда европейских государств. На берегах Ладожского оз. строились крепости, монастыри, поселения. Постепенно Приладожье осваивалось в хозяйственном отношении, что влияло на динамику расселения и изменение общей численности населения на побережье Ладожского оз. В настоящее время на его берегах, островах и акватории увеличилось разнообразие рекреационных занятий. К традиционной охоте и рыбной ловле, сбору ягод и грибов, отдыху на базах и в оздоровительных лагерях добавились многие виды рекреационного водопользования (разные виды туризма, круизы, дайвинг, виндсерфинг и др.).

Совокупность природных, культурно-исторических и социально-экономических предпосылок для организации рекреационной деятельности на побережье и акватории Ладожского оз. свидетельствует о потенциальных возможностях развития туризма, отдыха и других видов природопользова-

ния, и прежде всего, водопользования [Алхименко, 2008]. Это обуславливается уникальным географическим положением Ладожского оз. и его водосборного бассейна, значительным природно-климатическим потенциалом для развития туризма, санаторного лечения и отдыха, наличием достопримечательностей, богатым историко-культурным наследием, наметившейся тенденцией роста коллективных средств размещения туристов, сравнительно развитой транспортной инфраструктурой, возможностью использования сложившейся структуры экономики в интересах становления и развития туризма и рекреации вокруг Ладоги.

Для водных путешествий по Ладожским шхерам наиболее благоприятным сезоном является период с середины июня до второй половины сентября. В жаркое лето температура воды в заливах может подниматься до 18 °С, а в небольших внутренних озерах на островах и на материке – до 25 °С. Зима – время лыжных прогулок туристов по живописным просторам шхер. В целом природно-климатический потенциал Ладожских шхер и прибрежных районов Карелии оценивается очень высоко. На его основе перспективно дальнейшее развитие водно-спортивного, экологического, рыболовного, охотничьего, научного туризма и многих других видов рекреации.

Ладожское оз. и прилегающие к нему районы обладают богатым культурно-историческим наследием, привлекательным не только для российских туристов, но и для туристов из Финляндии, Швеции, Норвегии и других зарубежных стран [Алхименко, 2008; Алхименко, Цветков, 2010; Ладога, 2013]. На островах и территориях приозерных районов находится огромное число памятников истории и культуры федерального, регионального и местного значения. Они, как ожерелье, опоясывают Ладожское оз. сплошным кольцом. К ним относятся крепости и фортификационные сооружения, многочисленные религиозные объекты, архитектурные строения, музеи, дворцы, усадьбы и т.д. Международную известность приобрели такие памятники истории и культуры, как крепости Корела, Орешек (Шлиссельбург), Старая Ладога, Валаамский и Рождество-Богородичный Коневский монастыри, «Дорога жизни» и др. Сохранившаяся и воссозданная культурно-историческая составляющая рекреационного потенциала муниципальных районов Карелии и Ленинградской области на побережье и акватории Ладожского оз. дополняет и обогащает природную составляющую, сочетая в совокупности материальную и духовную основу развития всех видов и форм туризма и рекреации. Схема основных туристических достопримечательностей Ладожского бассейна представлена на рис. 1.3.

Ладожское оз. является центром, внутри и вокруг которого в пределах всей водосборной площади создана сеть семнадцати особо охраняемых природных территорий. Исключительно высокий уровень разнообразия природы Приладожья до сего времени обеспечивал ее равновесие и устойчивое развитие, несмотря на близость многомиллионного Санкт-Петербурга. Однако происходящее в последнее время интенсивное хозяйственное освоение региона, изъятие земель под промышленное, сельскохозяйственное и жилищное строительство, организация садоводств, а также усиление рекреационной нагрузки ведут к деградации заповедной природы Прила-

дождя и постепенному возрастанию гибели ценных природных экосистем. Поэтому сохранение необходимого минимума «дикой природы» с ее биоразнообразием становится главной задачей природоохранной деятельности общества [Алхименко, 2008; Алхименко, Цветков, 2010; Ладога, 2013].



Рис. 1.3 – Основные туристические достопримечательности Ладожского бассейна

По рыбным запасам Ладожское оз. относится к ведущим внутренним водоемам страны. На протяжении второй половины XX и первого десятилетия XXI столетия (1946–2009 гг.) уловы рыбы в нем возросли с 1,592 тыс. т (1946 г.) до 6,889 тыс. т (1981 г.), т.е. в 4,3 раза. Промысел в озере осуществляют рыбодобывающие организации Ленинградской области и Карелии. При этом на долю первых, работающих в южной части водоема, приходится 85–90% общего вылова. Динамика уловов характеризовалась подъемами и спадами в объемах. Эти колебания относятся к двум основным типам: короткопериодному и долгопериодному. Короткопериодный тип выражается в изменениях уловов в смежные годы. Он обуславлива-

ется появлениями различных по степени урожайности поколений рыб в связи с текущими гидрометеорологическими условиями (температура воды и уровенный режим во время нереста и др.) или изменениями в промысловой обстановке (позднее вскрытие водоема ото льда, неблагоприятный ход ледостава, сложные условия промысла из-за штормовой и иной обстановки и т. п.). Короткопериодные изменения уловов в соседние годы обычно невелики и быстро сменяются по объему вылова [Кудерский, 2003; 2007; 2009; Ладога, 2013]. В послевоенный период (1946–1954 гг.) отмечался ощутимый рост уловов, выраженный кратковременным «всплеском». Они увеличились от 1,592 тыс. т (1946 г.) до 4,061 тыс. т и до 4,849 тыс. т (в 1950–1952 гг. и 1954 г.). Характерной чертой этого периода было, по существу, полное игнорирование требований, диктуемых рациональным режимом рыболовства. На промысле широко использовались мелкоячейные тралы. Массовый характер принял лов неполовозрелых рыб (особенно сига и судака) и интенсивный облов нерестовых концентраций. Из-за нерациональных подходов к ведению промысла продолжительность «всплеска» оказалась краткой. В результате уже в 1959 г., несмотря на возросшую производственную базу, уловы опустились до уровня 1,839 тыс. т. Промысел приблизился к черте, за которой мог наступить перелом. Возникшая депрессия в объемах вылова длилась практически 10 лет (с 1955 по 1963 г.) и тяжело отразилась на общем состоянии ладожского рыболовства. Лишь благодаря относительно быстрому принятию жестких мер по регулированию промысла полное разрушение ихтиоценоза озера было приостановлено, прекратилось сокращение запасов рыб и создались условия для их восстановления. На озере с 1959 г. был введен новый рациональный режим рыболовства, который предусматривал полный запрет на использование мелкоячейных тралов, установление щадящей промысловой меры для ценных промысловых рыб с длительным жизненным циклом, введение запретных сроков на лов в период размножения весеннерестующих (судак) и осеннерестующих (озерные сиги) видов. Для таких ценных рыб, как озерные сиги и судак, были введены лимиты вылова, устанавливаемые ежегодно на основании оценок численности популяций этих видов, выполняемых научными организациями. В результате принятых мер уже в середине 60-х гг. прошлого столетия стали отмечаться признаки восстановления численности промысловых рыб и общий рост их уловов [Кудерский, 2007; 2009].

В начале 90-х гг. прошлого столетия высокий уровень продуктивности начал сменяться понижающейся ветвью долгопериодного цикла. В эти годы продукционный потенциал озера понизился, наступил третий период послевоенной динамики уловов в Ладожском оз. (1991–2009 гг.), характеризующийся их уменьшением и сближением с показателями, наблюдавшимися в первом периоде. Минимальные уловы по официальным данным отмечались в конце 90-х гг. прошлого столетия. В первые годы XXI столетия они несколько повысились, но это незначительное повышение не меняет общей оценки периода последних двух десятилетий как понижающейся ветви единого для озера долгопериодного цикла [Ладога, 2013]. По данным Санкт-Петербургского филиала ФГБНУ ВНИРО (ГосНИОРХ им. Л. С. Берга), среднегодовой общий улов рыбы в Ладожском оз. за период 1946–2019 гг. составил

3860 т. В настоящее время фиксируется значительное снижение уловов рыбы на Ладоге (рис. 1.4).

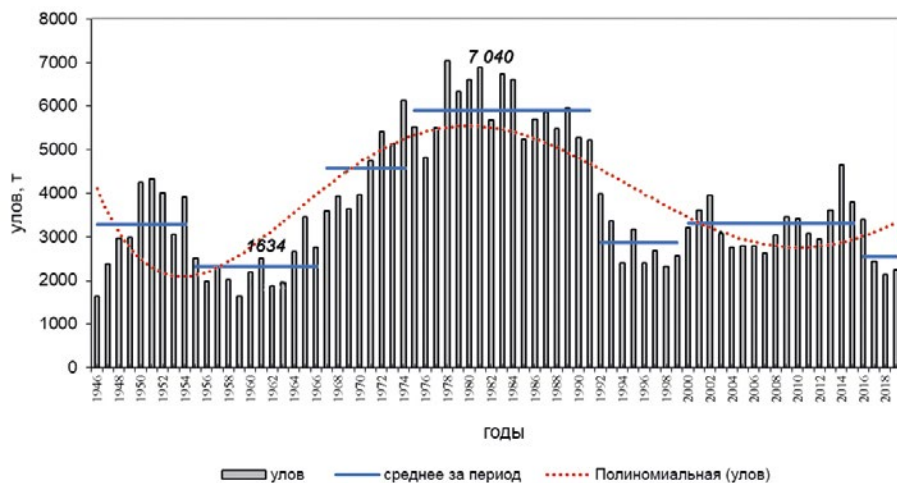


Рис. 1.4 – Динамика годовых общих уловов рыбы (т) в Ладожском оз., по данным Санкт-Петербургского филиала ФГБНУ ВНИРО (ГосНИОРХ им. Л. С. Берга)

При анализе сложившейся ситуации следует иметь в виду, что в рыбопродукционном отношении Ладожское оз. неоднородно, на что ранее не обращалось внимания [Ладога, 2013]. Оно может быть подразделено на две тесно связанные, но неэквивалентные части. Одна из них основная – это обширные открытые акватории озера. Происходящие здесь процессы определяют высокий общий продукционный потенциал озера и его долгосрочную цикличность, отражающуюся, в конечном счете, на характере динамики рыбного населения в целом. Вторая часть озера – прибрежная мелководная зона. Она не только отличается существенными особенностями в экологическом отношении, включая динамику сырьевых ресурсов, но и уступает открытым акваториям по вкладу в суммарные биопродукционные показатели по водоему. Однако обе эти части имеют важное значение для ладожского рыболовства и в равной мере заслуживают пристального внимания как в хозяйственном, так и в природоохранном отношении. Промысловые рыбы Ладожского оз., учитывая современное состояние их запасов и промысловой значимости, подразделяются на следующие группы [Ладога, 2013]:

- виды, запасы которых хотя и сократились в связи с общим понижением продукционного потенциала озера, но состояние которых не вызывает опасений, промыслом используются недостаточно полно по организационным и экономическим причинам (ряпушка, корюшка, мелкий частик);
- виды, у которых сложилось напряженное положение с запасами не только из-за снижения продуктивности экосистемы озера, но и под значительным влиянием антропогенных факторов, включая экологическое состояние водоема, интенсивный промысел и др. (озерные сиги, судак, лещ, щука);

- рыбы, потерявшие промысловое значение, прежде всего в связи с продолжительным интенсивным антропогенным влиянием, ставшие редкими и исчезающими и включенные в Красную книгу (озерный лосось, озерная форель, озерно-речные сига волховский, свирский, вуоксинский, отчасти сырть).

Учитывая сложившееся положение с различными группами рыбного населения, целесообразно разработать и приступить к практической реализации комплекса охранных и рыбоводных мероприятий, направленных на сохранение и восстановление промысловой значимости наиболее ценных ладожских рыб и стимулирование вылова слабо эксплуатируемых видов.

Все перечисленные выше факторы, определяющие Ладожское оз. как геостратегический водный объект России, напрямую зависят от его экологического состояния. Поэтому важность сохранения водных ресурсов Ладожского и Онежского озер отмечена в Стратегии экологической безопасности РФ (документ утвержден Указом Президента Российской Федерации от 19.04.2017 г. № 176), созданной по итогам заседания Совета Безопасности РФ от 20 ноября 2013 г. Тем не менее научно обоснованная и официально утвержденная на государственном уровне стратегия рационального использования водных ресурсов этой крупнейшей пресноводной системы в настоящее время отсутствует. В 2017 г. проект федерального закона «Об охране Ладожского и Онежского озер» внесло в Госдуму Законодательное собрание Республики Карелия. «Учитывая, что Ладожское и Онежское озера являются уникальными природными объектами и самыми большими пресноводными озерами в Европе, по данным водным объектам наряду с озером Байкал требуется отдельное правовое регулирование», – говорилось в пояснительной записке. Документ должен был носить «рамочный» характер. Предполагалось внести изменения в нормативные правовые акты РФ, в части уточнения и расширения, переданных органам государственной власти субъектов Российской Федерации, на территории которых расположен природный комплекс Ладожского и Онежского озер, отдельных государственных полномочий. Законопроект предусматривал, что субъекты РФ, на территории которых расположен природный комплекс Ладожского и Онежского озер, будут вправе принимать подзаконные правовые акты по вопросам переданных государственных полномочий, а также издавать обязательные для исполнения методические указания и инструктивные материалы по осуществлению переданных государственных полномочий. Тем не менее Государственная Дума отклонила в первом чтении проект закона об охране Ладожского и Онежского озер по причине недостаточной проработки. Основной причиной отклонения закона, по-видимому, явилось ущемление таким законом интересов крупных промышленных и сельскохозяйственных компаний, осуществляющих сброс сточных вод в водные объекты бассейна Ладожского оз.

Глава 2. Физико-географическое описание Ладожского озера и его водосбора

Ладожское оз. является самым большим по площади водной поверхности и объему заключенной в него воды водоемом Европы (табл. 2.1). Оно занимает обширную тектоническую котловину, образованную на стыке двух крупнейших геологических структур Европы – Балтийского кристаллического щита и Русской платформы, преобразованную воздействием четвертичных ледников. При площади зеркала 17765 км² озеро аккумулирует водный сток, формирующийся на территории, превышающей 282 тыс. км². То есть площадь его водосбора в 16 раз превышает площадь водного зеркала, что обуславливает повышенную чувствительность экосистемы водоема к явлениям и процессам, протекающим в его бассейне. Для сравнения, среди 7 самых крупных озер Европы (площадь зеркала > 1000 км²) лишь у оз. Меларен и Ильмень данное соотношение больше, чем у Ладоги. Имея наибольшую площадь зеркала и глубину, Ладожское оз. по объему заключенной в него воды в 2,9 раза превосходит Онежское и в 1,4 раза – все 7 крупнейших озер Европы суммарно, при этом площадь его зеркала в 1,5 раза меньше суммарной площади зеркал этих озер. По оценке, проводимой в настоящее время в ИНОЗ РАН, суммарные водные ресурсы озер Европы составляют 3370 км³ [Отчет..., 2019], на Ладогу приходится около четверти данной величины.

Таблица 2.1

Морфометрические характеристики наиболее крупных озер Европы

Озеро	Площадь зеркала, км ²	Площадь водосбора, км ²	Объем воды, км ³	Максимальная глубина, м	Соотношение площадей зеркала и водосбора
Ладожское	17765	282664	848	230	16
Онежское	9720	56394	292	120	5,8
Венерн	5648	41182	153	10634	7,3
Сайма	4380	61070	61	85,3	13,9
Псковско-Чудское	3558	47800	25,1	15,3	13,4
Веттерн	1856	4503	74	128	2,4
Меларен	1140	21460	13,8	61	18,8
Ильмень	1034 (при 18,1 мБС)	67200	2,93	4,2	61,1

2.1 Общая характеристика водосбора

Ладожское оз. является замыкающим элементом в системе крупнейших озер северо-запада России. Его водосборный бассейн, простирающийся от 64° до 56° с. ш. и от 26° до 38° в. д., включает в себя четыре вторичных

бассейна: Сайма-Вуоксинский, Онежско-Свирский, Ильмень-Волховский и собственно Ладожский (рис. 2.1.1). В табл. 2.1.2 представлены характеристики общего и частных водосборов Ладожского оз., полученные в ИНОЗ РАН на основе цифровой информации о рельефе его бассейна [Науменко, Каретников, 2005]. Необходимо отметить, что площади водосборов, полученные по цифровой модели, близки (в пределах 2,5%) к площадям, полученным в свое время И.В. Молчановым [Молчанов, 1945], чаще всего приводящимся в научной литературе по Ладожскому оз. В то же время цифровая модель позволила получить дополнительные статистические характеристики водосборов, что было принципиально невозможно при использовании картографических материалов.

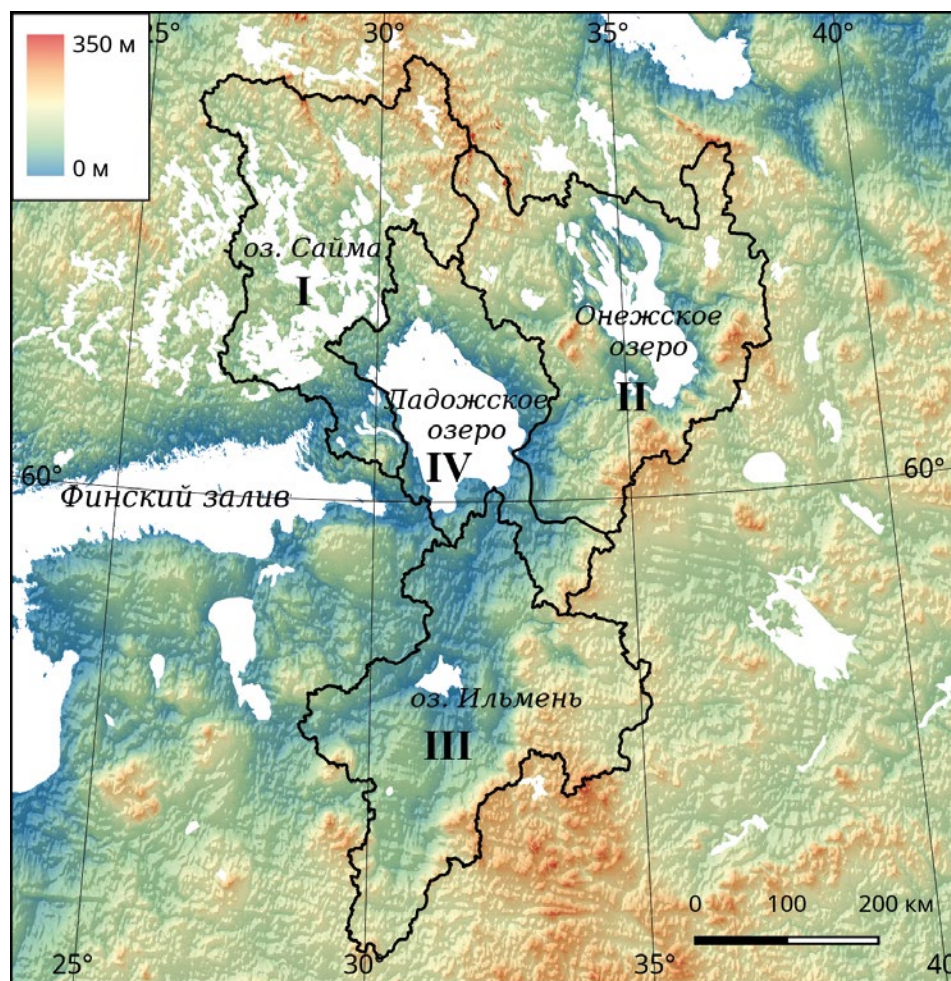


Рис. 2.1.1 – Общий и частные водосборы Ладожского оз.

Таблица 2.1.1

Статистические характеристики общего и частных водосборов Ладожского оз., полученные на основе современной цифровой информации о рельефе [Науменко, Каретников, 2005]

Бассейн	Весь водосбор	Сайма-Вуоксинский (I)	Онежско-Свирский (II)	Ильмень-Волховский (III)	Ладожский (собств.) (IV)
Площади водосборов с площадями озер, км ²	282664	69838	82255	82232	48339
Максимальная высота, м	398	396	398	294	270
Средняя высота, м	114,3	125,3	126,4	100,8	82,5
Медианная высота, м	106,6	116,4	127,8	83,8	72,4
Стандартное отклонение, м	61,6	53,8	60,8	60,6	53,0
Коэффициент вариации	0,54	0,42	0,48	0,60	0,64
Коэффициент асимметрии	0,35	0,47	0,14	0,53	0,74
Максимальная высота водораздельной линии, м	396	396	388	350	270
Средняя высота водораздельной линии, м	175,5	154,3	178,0	152,4	104,2
Стандартное отклонение высоты водораздельной линии, м	68,9	73,4	68,6	77,0	65,0
Длина водораздельной линии, км	5764	2675	2560	2517	2198
Коэффициент изрезанности	3,0	2,8	2,5	2,5	2,8
Максимальный уклон, град	7,4	7,4	6,6	3,9	3,9
Средний уклон, град	0,49	0,65	0,56	0,32	0,45
Медианный уклон, град	0,38	0,55	0,45	0,24	0,35
Станд. отклонение, град	0,42	0,47	0,45	0,28	0,36
Коэффициент вариации	0,85	0,72	0,8	0,86	0,81

Как видно из таблицы, частные водосборы отличаются друг от друга, что указывает на несхожесть геоморфологических условий их образования и обуславливает существенные различия в их гидрографической сети. При этом морфометрические отличия прежде всего определяются геологическими структурами, так, Саймо-Вуоксинский водосбор практически полностью расположен в пределах Балтийского кристаллического щита, а Ильмень-Волховский – Русской равнины, Онежско-Свирский и собственно Ладожский водосборы находятся на их стыке. Как видно из таблицы, для Саймо-Вуоксинского и Онежско-Свирского бассейна (на Балтийском щите находится бо́льшая его часть) характерны наибольшие высоты и уклоны, как средние, так и максимальные.

Выделение частных водосборов позволяет вычлениить их различное участие в формировании разнообразных процессов, происходящих на водоеме, включая те из них, которые вызваны антропогенной нагрузкой. Поскольку ландшафтное деление более мозаично, при моделировании этих процессов удобнее всего учитывать именно крупные частные водосборы, выделение

которых основывается на гидрологическом принципе. Это позволяет интегрально учитывать привнос вещества с различных частей бассейна. При этом собственный (частный) водосбор Ладожского оз. уже может рассматриваться более детально. Основное поступление вещества здесь также будет происходить с речным стоком (по многочисленным рекам, впадающим в озеро), в то же время для учета диффузного загрязнения, поступающего с частного водосбора, может применяться и его ландшафтное деление.

2.2 Геология и рельеф

Как и само озеро, Ладожский водосбор находится на стыке Балтийского кристаллического щита и Русской платформы, граница между которыми проходит приблизительно по линии Приморск – Запорожское – Ильинский – Володарская – оз. Муромское. Поверхность щита разбита тектоническими трещинами, впоследствии разработанными ледниками и заполненными многочисленными озерами. После схода ледника, из-за прогиба коры под его тяжестью, значительная часть Ладожского бассейна оказалась погруженной под воду, а затем, при восстановлении изостатического равновесия, она приподнялась над уровнем моря. В силу геологических особенностей и истории развития в четвертичное время северная часть Ладожского водосбора отличается наиболее пересеченным рельефом. Слагающие щит древние кристаллические породы архейско-протерозойского комплекса выходят местами на дневную поверхность, будучи прикрыты тонким слоем рыхлых осадков четвертичного времени, образовавшихся преимущественно в период последнего валдайского оледенения, а также предшествующего ему межледниковья. Среди архейских и протерозойских пород преобладают граниты, гнейсы, диабазы, кристаллические сланцы. Близ Ладожского оз. кристаллические породы оголяются в виде скальных возвышенностей и гранитных «лбов», формируя скалистые гряды северо-западного простирания (сельги). Сельговый рельеф имеет широкое распространение и на территории Карельского перешейка, относящегося к южной части Сайма-Вуоксинского бассейна и к северной части частного бассейна Ладожского оз. Сельги обычно короткие и узкие, моренные отложения на них размыты, к межсельговым понижениям приурочена современная молодая гидросеть [Кондратьев и др., 2013]. Для большей части Онежско-Свирского бассейна и части Сайма-Вуоксинского бассейна характерен грядовый эрозионный рельеф, сочетающийся с аккумулятивными формами с неравномерным покровом щебнисто-песчаной морены на более ровных водоразделах, озами, камами и грядами конечных морен. Толща четвертичных отложений, покрывающих кристаллический фундамент, местами увеличивается до 20–40 м. Речные долины не разработаны, русла порожицы [Исаченко, Шляпников, 1989].

Русская платформа имеет докембрийский складчатый фундамент, почти везде перекрытый толстым слоем осадочных отложений палеозоя, в том числе наиболее молодых, четвертичного периода. Толщина рыхлых четвертичных отложений достигает сотен метров, в приладожской части – десятков метров. К югу от Балтийского щита, в районе озера, наблюдается

обнажение раннекембрийской толщи, представленной двумя комплексами: валдайским, состоящим из пестрых песчаников и тонкослоистых сланцев, и балтийским, сложенным песчаниками, песками и пластическими синими глинами. В пределах Ильмень-Волховского и в южных частях Онежско-Свирского и собственно Ладожского бассейнов четвертичные отложения в значительной степени нивелировали неровности коренного рельефа, поэтому эта часть водосбора представляет плоскую, слабо террасированную равнину. Поверхность слабо дренированная, местами сохранились остаточные водоемы бывших приледниковых озер. Сельговые и холмисто-грядовые ландшафты Балтийского кристаллического щита сменяются здесь холмисто-равнинными с широким распространением аккумулятивных форм рельефа, созданных ледниковыми и флювиогляциальными отложениями. Эрозионные формы имеют менее широкое распространение, их возникновение связано с деятельностью ледниковых водных потоков. Южные части Онежско-Свирского и частного Ладожского бассейна характеризуются сочетанием низменных озерно-ледниковых, низменных моренных и холмисто-моренных ландшафтов. В пределах Ильмень-Волховского бассейна значительную площадь занимает Ловать-Ильмень-Волховская низина, приуроченная к понижению в рельефе коренных девонских пород. Равнинный рельеф, редкая речная сеть, тяжелые водоупорные грунты способствуют заболачиванию ее территории. Низину опоясывают возвышенности высотой до 300 м, где преобладают холмистые ледниковые формы рельефа. С запада и юга это Лужская, Судомская, Бежаницкая и Вязовская возвышенности, с юго-востока – Валдайская возвышенность с абсолютными отметками от 150 до 300 м, с северо-востока – Вепсовская возвышенность и Тихвинская гряда.

Согласно цифровой модели Ладожского бассейна, средняя высота водосбора составляет 114,3 м (табл. 2.1.1). Наибольшие высоты имеют Саймо-Вуоксинский, Онежско-Свирский частные водосборы, степень вертикальной расчлененности наибольшая у Онежско-Свирского водосбора. Средняя высота собственно Ладожского водосбора наименьшая среди других частных водосборов и примерно на 28% меньше средней высоты общего водосбора. Превышение линии водораздела над уровнем моря колеблется от 396 м моря до 5,1 м вблизи истока р. Невы со средней высотой 175,5 м и стандартным отклонением 68,9 м [Науменко, Каретников, 2005].

2.3 Климат Ладожского водосбора

Климат водосбора Ладожского оз. типично бореальный, слабо и умеренно континентальный, переходный от морского климата умеренных широт к континентальному климату центра Русской равнины. Прежде всего он формируется под воздействием западного воздушного переноса, континентальные воздушные массы играют подчиненную роль. Морские воздушные массы обуславливают сравнительно мягкую зиму с частыми оттепелями и умеренно-теплое лето. Периодически наблюдается поступление арктического воздуха или теплых масс с юга Русской равнины. Континентальность климата возрастает в восточном направлении, в связи с чем наиболее холод-

ной является восточная часть водосбора, а наиболее теплой – юго-западная. Продолжительность вегетационного периода (со среднесуточной температурой воздуха выше 4–5 °С) составляет 150–175 суток.

Для Ладожского водосбора характерны значительные колебания температуры воздуха, высокие относительная влажность воздуха, облачность и большое количество осадков. Годовая амплитуда температур (разница средних температур самого теплого и самого холодного месяцев) составляет 26–30°. Наиболее холодный месяц в году январь, в западной части водосбора и вблизи крупных водоемов – февраль, среднемесячная температура воздуха составляет в это время от –6,5 до –10 °С. Самый теплый месяц июль: от +16 до +18,5 °С (табл. 2.3.1).

Территория водосбора расположена в зоне избыточного увлажнения. В его пределах за год выпадает от 600 до 850 мм осадков. Наименьшее количество осадков характерно для прибрежных низменностей, наибольшее – для возвышенных районов на наветренных склонах возвышенностей Карельского перешейка и для восточной части водосбора. Максимум осадков приходится на лето и начало осени. Значительная часть осадков выпадает в виде снега. Устойчивый снежный покров лежит в западных и юго-западных районах около 130–140 дней, в восточных – 150–160 дней. Годовая величина испаряемости на водосборе составляет от 350 до 450 миллиметров, с поверхности Ладожского оз. она оценивается [Расплетина, Сусарева, 2006] в 380 мм/год. Превышение осадков над испаряемостью практически по всему водосбору составляет более 300 миллиметров, в ряде регионов – до 400 миллиметров.

В последние десятилетия на водосборе Ладожского оз., как и в большинстве регионов земного шара, происходят заметные изменения климатических условий, определяемые антропогенным потеплением. Наблюдается сокращение продолжительности морозного периода, увеличение средних зимних температур приземного воздуха, рост средних годовых температур, изменения режима осадков и влажности приземного слоя воздуха. Общепринято, что тенденции роста температуры воздуха в высоких широтах наиболее выражены в холодный период года. В предшествующей монографии по Ладожскому оз. [Менжулин, 2013] было приведено, что тренды роста температур, построенные за период с 60-х годов прошлого до 10-х годов настоящего столетия по данным станций Паданы, Вытегра, Выборг и Великие Луки, расположенных в разных частях водосбора, показывают их стабильное увеличение в январе, апреле, июле и октябре. Угол наклона линейного тренда, построенного для средних годовых температур приземного воздуха, максимален на ст. Великие Луки (4,11 °С за 50 лет). Для станции Паданы превышение за 50 лет составило 3,95 °С, для станции Вытегра – 2,85 °С, и для станции Выборг – 2,15 °С. Для станций Выборг и Паданы наибольший рост наблюдался в зимние месяцы и составлял, соответственно, 7,64 и 7,51 °С. Также было показано заметное увеличение (до десятков процентов) изменчивости температуры в холодное время года для всех четырех метеостанций. Наименьшее значение изменчивости средней месячной температуры приземного воздуха приходится на начало осеннего сезона. Необходимо отметить, что происходящие климатические

изменения существенно отразились на термике водоема. Более подробно данный вопрос рассмотрен в Главе 7.

Таблица 2.3.1

Годовая амплитуда температур (1) и норма осадков (2) на Ладожском водосборе
<http://pogoda.ru.net/forecast.php>

Станция		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
Петрозаводск	1	–9,3	–9,1	–3,7	2,3	8,7	13,7	16,9	14,5	9,5	3,8	–2,8	–7,0	3,1
	2	36	26	32	30	48	65	83	82	60	60	50	43	614
Выборг	1	–6,8	–7,3	–3,0	3	10,2	15,0	18,2	16,3	10,9	5,5	–0,4	–4,5	4,8
	2	48	36	40	31	40	63	65	82	68	76	67	61	677
Сортавала	1	–8,1	–8,3	–3,6	2,4	8,9	13,9	17,3	15,1	9,9	4,6	–1,3	–5,7	3,8
	2	47	34	36	31	42	62	54	83	64	68	65	57	641
Бологое	1	–7,5	–7,6	–2,0	4,9	11,5	15,4	17,8	15,6	10,2	4,6	–2,0	–6,1	4,6
	2	46	33	35	32	56	78	83	83	62	63	51	51	673
Тихвин	1	–8,0	–8,0	–2,6	4,1	10,8	15,2	17,7	15,2	9,9	4,4	–2,2	–6,3	4,2
	2	60	39	45	39	54	78	82	86	69	75	69	69	764

Наряду с ростом средних температур приземного воздуха происходит изменение режима осадков, которое в различных частях бассейна выражено в разные периоды года. В целом для изменений режима атмосферных осадков характерна главным образом перестройка их годовой динамики и в особенности их коэффициента вариации. Происходящие изменения климата кардинальным образом влияют и на влажность приземного слоя воздуха. Согласно [Менжулин, 2013], во всем бассейне за прошедшие полстолетия наблюдалось возрастание упругости водяного пара. На ст. Реболы по линейному временному тренду январские значения упругости водяного пара увеличились на 50% (с 2,2 до 3,2 гектопаскалей), на ст. Вытегра – на 76% (с 1,6 до 2,1 гектопаскалей), на станции Псков – на 81%, на станции Великие Луки – на 70%. Меньшими, но достаточно значительными величинами характеризуется рост упругости водяного пара летом: Реболы – на 8%, Вытегра – на 15%, Псков – на 11%, Великие Луки – на 10%.

2.4 Ландшафтная характеристика Ладожского водосбора

Водосбор Ладожского оз. расположен в пределах 2 физико-географических стран – Феноскандии (северная часть водосбора, лежащая в пределах Балтийского кристаллического щита) и Восточно-Европейской равнины (южная часть водосбора). В его пределах выделяют 2 основных типа ландшафтов – бореальные (таежные) и бореально-суббореальные (подтаежные). Основную часть водосбора занимают бореальные ландшафты. Граница зоны тайги и смешанных лесов проходит по Ильмень-Волховскому водосбору, через озеро Ильмень, смешанные леса представлены лишь в южной части его бассейна.

Зона тайги в пределах Ладожского водосбора включает все три подзоны: северной, средней и южной тайги. Однако северная тайга заходит лишь в северо-западную часть Онежско-Свирского водосбора. Основная часть водосбора расположена в зоне средней и южной тайги, граница между которыми проходит чуть севернее русла реки Вуокса и чуть южнее русла реки Свирь. То есть Онежско-Свирский водосбор почти полностью находится в пределах подзоны средней тайги, Сайма-Вуоксинский – на границе средней и южной тайги (на последнюю приходится около трети водосбора). Северная часть частного водосбора Ладожского оз. преимущественно находится в подзоне средней тайги, а южная – южной тайги.

В средней тайге преобладают сосновые леса, покрывающие более половины площади водосбора, чередующиеся с еловыми, на которые приходится около трети его площади. Согласно [Исаченко, Шляпеиков, 1989], на грубо-песчанистых завалуненных маломощных подзолах распространены разные типы сосняков (клядониевые, зеленомошно-брусничные и черничные, сфагновые, вересковые и др.), на более мелкоземнистых субстратах – ельники. Типичны зеленомошные ельники-черничники, часто встречаются сфагновые ельники с осокой и хвощом. Значительную площадь занимают болота, преимущественно верховые выпуклые грядово-мочажинные, по периферии облесенные сосной. В южной тайге более широкое распространение имеют еловые леса, однако они полностью не сохранились, так как на их месте возникло большинство сельскохозяйственных земель – пашен и суходольных лугов. Согласно [Исаченко, Шляпеиков, 1989], наряду с черничными и кисличными ельниками встречаются неморальнотравяные леса, а на более богатых почвах – сложные ельники с подлеском из липы, лещины и других широколиственных пород. Сосняки также многочисленны. Коренные леса частично замещены вторичными березовыми, иногда осиновыми.

В пределах зоны смешанных лесов к хвойным породам в большом количестве примешаны дуб, клен, вяз, липа, береза, осина. Однако естественные ландшафты южной части водосбора в значительной части нарушены и заменены сельскохозяйственными землями.

Неоднородности растительности соответствует пестрый почвенный покров. Основными процессами почвообразования в пределах водосбора Ладожского оз. являются подзолистый, дерновый, глеевый и болотный. Доминирующее значение имеет подзолистый процесс, крайнее проявление которого наблюдается на северо-востоке бассейна, в области распространения подзоны северной тайги. По мере перехода к подзонам средней и южной тайги в почвах наряду с процессом подзолообразования протекает процесс накопления гумуса [Кондратьев и др., 2013]. В зависимости от интенсивности проявления каждого из этих процессов формируются дерново-подзолистые почвы разной степени оподзоливания, в основном дерново-средне- и сильноподзолистые почвы. В зоне хвойно-широколиственных лесов преобладает процесс гумусонакопления и развиты преимущественно дерново-слабо-подзолистые почвы.

Сосновые леса Балтийского кристаллического щита (в районах, где он приближается к поверхности) произрастают преимущественно на примитивно-аккумулятивных почвах, образованных на кислых породах, достаточно

бедных органикой и потому слабо способствующих выносу органического вещества с речным стоком. С продвижением на юг, к границе с Русской плитой, происходит увеличение мощности четвертичных отложений, и в почвообразовании возрастает значение процесса оподзоливания с широким распространением глеевого процесса. Формируются подзолистые и разнообразные типы оподзоленных почв, на которых произрастают различные типы хвойных лесов, чередующихся с болотными массивами. Для такого рода ландшафтов характерен повышенный модуль выноса органического вещества, который, согласно [Кондратьев и др., 2010], изменяется в пределах 4,3–5,0 т/км² в год. На элювии и элюво-делювии основных и ультраосновных кристаллических пород, распространенных в северо-восточной части Ладожского водосбора, наряду с подзолистыми развитие имеют дерново-литогенные и торфяно-болотные почвы. Химический состав подстилающей породы определяет высокую подвижность органического вещества и еще более высокие значения модулей выноса $C_{\text{орг}}$ – от 5,3 до 8,6 т/км² в год.

С выходом на Русскую равнину почвенный покров восточной части Ладожского водосбора становится более мозаичным, что определяется пестротой четвертичных отложений как по генезису, так и по литологическому составу. В почвообразовании увеличивается роль глеевого процесса, в то время как роль дернового достаточно слаба. Характерно сочетание сильноподзолистых почв с болотно-подзолистыми и болотными. В низменных ландшафтах преобладают полугидроморфные и гидроморфные почвы. Модуль выноса $C_{\text{орг}}$ изменяется в пределах 5,4–6,0 т/км² в год [Кондратьев и др., 2010].

Под хвойными, преимущественно еловыми лесами Ловатско-Волховской низины, занимающей большую часть Ильмень-Волховского водосбора, преобладают подзолистые почвы разной степени оглеения. Равнинность территории и широкое распространение тяжелых водоупорных грунтов способствуют ее широкому заболачиванию. Под различными видами растительности развиты разные типы почв – подзолистые, дерново-подзолистые и торфяно-подзолистые глеевые, характеризующиеся меньшей подвижностью органического вещества, согласно данным работы [Кондратьев и др., 2010] значения модуля выноса здесь составляют от 3,9–4,4 т/км² в год. Окаймляющая Ильмень-Волховский водосбор Валдайская возвышенность характеризуется преобладанием почв автоморфного ряда, преимущественно развитых на карбонатных моренных суглинках, характеризующихся низкой миграцией органического вещества в водотоки. Карбонатность почвообразующих пород снижает вынос $C_{\text{орг}}$, поскольку соли кальция и магния гумусовых кислот малорастворимы и накапливаются в органогенных горизонтах почв. Кроме того, в процессе гумусообразования в условиях нейтральной среды продуцируется больше гуминовых кислот, чем подвижных водорастворимых фульвокислот. Модуль выноса, согласно [Кондратьев и др., 2010], составляет от 2,0 до 2,2 т/км² в год.

Характеристики подстилающей поверхности (состав почвообразующих пород и растительности, геоморфологические особенности местности) определяют природную (фоновую) нагрузку на Ладожское оз., формирующуюся за счет выноса с водосбора химических веществ под воздействием

стока [Кондратьев и др., 2010]. Наибольшее количество водорастворимых гумусовых соединений образуется в почвах полугидроморфного и гидроморфного ряда. Наибольший вынос $C_{орг}$ наблюдается с заболоченных лесов, сток с которых происходит практически постоянно. С болотных систем он ограничен в периоды межени. Более подробно внешняя нагрузка на озеро рассмотрена в Главе 4.

2.5 Гидрографическая сеть Ладожского водосбора

Основными притоками Ладожского оз. являются реки Свирь, Вуокса и Волхов, дренирующие 3 обширных частных водосбора (Онежско-Свирский, Сайма-Вуоксинский и Ильмень-Волховский). В озеро впадает еще 31 река, среди наиболее крупных из которых – Сясь, Янисйоки, Олонка, Тулемайоки, Водлица, Уксунйоки, Хиитоланйоки, Тохмайоки, Тулокса, Миналанйоки и др. В табл. 2.5.1 представлены сведения о 23 реках водосбора Ладожского оз.

Обширность водосбора в сочетании с избыточным увлажнением территории обуславливает формирование значительных объемов поверхностного стока. Среднегодовой объем стока, поступающего с водами реки Свирь, составляет $20,8 \text{ км}^3$, Вуокса – $19,3 \text{ км}^3$, Волхов – $16,9 \text{ км}^3$, среднегодовой объем стока частного водосбора Ладоги – $13,5 \text{ км}^3$. Отток происходит по р. Неве в Финский залив Балтийского моря (годовой объем стока $78,9 \text{ км}^3$).

Река Свирь вытекает из Свирской бухты Онежского оз. и впадает в Свирскую губу Ладожского оз. близ п. Вознесенье. Большая часть ее бассейна принадлежит Онежскому оз., и лишь около 12% приходится на частный водосбор. Онежское оз. обеспечивает около $\frac{3}{4}$ годового водного стока Свири. Русло реки в ее верхнем и нижнем течении – широкопойменное, извилистое, в среднем – врезанное. Ниже г. Лодейного Поля ширина поймы достигает 1 км. Средняя ширина реки 180–200 м, средняя скорость течения 1,3–1,5 м/с. Наиболее крупными притоками являются реки Паша и Оять. Первая берет начало на западном склоне Вепсовской возвышенности, а вторая – в северо-восточных отрогах Валдайской возвышенности. Оба наиболее крупных притока Свири левые.

Таблица 2.5.1

Расход воды и основные характеристики крупных притоков Ладожского оз.

Река	Средний расход воды	Длина, км	Площадь водосбора, км^2	Исток
Свирь	785	224	9820 (83498) *	Онежское озеро, п. Вознесенье
Вуокса	684	153	7130 (69474)	оз. Сайма
Волхов	569	224	13000 (80224)	оз. Ильмень
Сясь	61	260	7330	Валдайская возв., южнее с. Акуловка
Янисйоки	41,7	126	3861	оз. Айттоярви
Олонка	35	87	2620	Утозеро
Тулемайоки	21,8	62	1720	Тулмозеро

Река	Средний расход воды	Длина, км	Площадь водосбора, км ²	Исток
Водлица	18,5	67	1 320	Ведлозеро
Уксунийоки	15	121	1 080	зал. Уксунлахти у с. Ууксу
Хиитоланйоки (Кокколанйоки)	10,7	60	1 370	оз. Кивиярви
Тохмайоки	9,2	74	1 602	оз. Тохмаярви
Тулокса	8,6	77	900	оз. Лумбас
Миналанийоки	5,2	16	230	оз. Пайкъярви
Лава	4,2	31	572	болота около п. Назия
Назия	2,1	42	322	Малуксинский Мох
Иийоки	1,5	40	318	оз. Исо-Ийярви
Авлога	~1	54	385	оз. Сювеярви
Эняйоки	–	90	501	оз. Лангиярви
Морье	–	43	478	оз. Хепоярви
Воронезжа	–	41	320	Севернее п. Тихомировщина
Соскуанийоки	–	40	234	Юго-западнее п. Райвио
Обжанка	–	26	230	оз. Сегежское
Сюскюнийоки	–	22	477	оз. Сюскюярви

* – Для рек Свирь, Вуокса и Волхов наряду с площадью собственного (частного) водосбора в скобках приведена общая площадь (учитывающая водосбор озер, из которых они вытекают).

На р. Свирь находятся две ГЭС: Верхне-Свирская (в 130 км от устья, у впадения реки Ивина) и Нижне-Свирская (в 80 км от устья, у г. Лодейное поле), – в значительной степени определяющие ее водный режим в среднем и нижнем течении. В среднем течении реки Свирь в естественном состоянии существовали пороги, однако зарегулирование реки подняло ее уровень и затопило их. Строительство гидроэлектростанций вызвало подпор и Онежского озера, уровень которого возрос примерно на 1 м. Наряду с гидростроительством, преобразование реки было связано с проведением работ по расчистке и углублению русла на участке ниже Нижне-Свирской ГЭС для обеспечения прохода судов. В настоящее время из-за высокой степени зарегулированности река Свирь характеризуется равномерным режимом уровня. Среднемноголетний расход воды в устье 790 м³/с, максимальный расход – 1500 м³/с, минимальный – 129 м³/с. На водном режиме верхней части реки продолжает сказываться уровневый режим Онежского оз., а водный режим нижнего участка находится под влиянием сгонно-нагонных явлений в Ладожском оз.

Категория качества воды в р. Свирь – слабо загрязнённая, ниже г. Лодейного поля – загрязнённая, в большинстве притоков – условно чистая. Основными источниками загрязнения являются промышленные сточные воды. Основные загрязняющие вещества: соединения меди, железа и марганца.

Река Вуокса берет начало из финского озера Сайма и впадает в Ладожское оз. с его западного берега двумя рукавами: северным и южным. Юж-

ный рукав является основным, хоть имеет искусственное происхождение и появился в начале XIX века за счет соединения с Ладожским озером оз. Суходольского. По северному рукаву в настоящее время проходит незначительная часть стока, он имеет все признаки отмирающей реки, постепенно превращающейся в цепочку зарастающих, иногда пересыхающих озёр. Основная часть бассейна р. Вуокса принадлежит оз. Сайма, на частный водосбор приходится около 10%. В верхнем течении река представляет собой мощный поток с порогами и водопадами, в среднем и нижнем течении – сложную систему больших и малых озёр, соединённых друг с другом многочисленными протоками. Сток Вуоксы зарегулирован многочисленными озерами и четырьмя водохранилищами ГЭС, из которых на российской территории расположены Светогорская и Лесогорская, а на финской – Тайнионкоски и Иматра. Среднегодовой расход воды р. Вуокса составляет $645 \text{ м}^3/\text{с}$, максимальный – $1300 \text{ м}^3/\text{с}$, минимальный – $350 \text{ м}^3/\text{с}$. Наиболее крупные притоки Вуоксы – реки Бегуновка, Волчья и Вьюн.

По качеству воды р. Вуокса характеризуется либо как условно чистая, либо слабо загрязнённая. Основные источники загрязнения – целлюлозно-бумажные предприятия и стоки населённых пунктов, расположенных на территории Финляндии и России.

Река Волхов вытекает из озера Ильмень, несёт свои воды по Приильменской низменности и впадает в Ладожское оз. с южного берега. Общее падение (от истока до устья) составляет около 13 м. Устье реки представляет собой рукав шириной около полукилометра. Основная часть бассейна р. Волхов принадлежит оз. Ильмень, на частный водосбор приходится около 16%. В 1926 г. на Волхове в 27 км от устья была построена Волховская ГЭС, обеспечивающая подпор её уровня на 13,5 м и зарегулировавшая реку на всем её протяжении. В нижнем течении р. Волхов в естественном состоянии существовали пороги, однако после зарегулирования уровня они оказались затоплены. Несмотря на зарегулированность, на внутригодовой режим уровня р. Волхов значительное воздействие оказывают значительные колебания уровня воды оз. Ильмень, приводящие к неравномерности её режима. Водный режим характеризуется высоким весенним половодьем, обеспечивающим около половины годового стока. Спад половодья продолжается до октября. Среднегодовой расход воды в устье $590 \text{ м}^3/\text{с}$, максимальный и минимальный расходы у дер. Гостинополье, соответственно, 2530 и $40 \text{ м}^3/\text{с}$. Главные притоки р. Волхов: справа – Вишера, Пчёвжа, Оскуя; слева – Кереть, Тигода. Из-за значительного сброса промышленных стоков категория качества воды р. Волхов обычно характеризуется как «загрязнённая».

Гидротехническое строительство затронуло и частный бассейн Ладожского оз. На ряде северных притоков озера, расположенных в Финляндии, построены шесть ГЭС и шесть плотин различного назначения, в пределах российской части бассейна плотины для малых ГЭС построены в бассейнах рек Олонка, Оять, Паша.

Река Нева соединяет Ладожское оз. и Финский залив Балтийского моря. Она вытекает из Шлиссельбургской губы Ладожского оз. и протекает по равнинной Приневской низменности в долине, ширина которой составляет 35–

50 км. Общее падение русла Невы составляет всего около 4,7 м. Средняя ширина реки – 400–600 м. Нева имеет невысокие берега (5–10 м), почти на всем протяжении круто обрывающиеся к воде. Вниз по течению реки высота берегов уменьшается. Длина реки – 74 км, площадь водосбора около 288 000 км², в том числе частного – около 5000 км². Средний расход воды – 2500 м³/с. Максимальный расход составляет в среднем 3400 м³/с, наибольший (летний) – 4590 м³/с, средний минимальный расход – 1540 м³/с, наименьший (зимний) – 540 м³/с. За период наблюдений, начавшихся с 1859 г., наибольшая водность Невы наблюдалась в 1924 г. (116 км³), наименьшая – в 1900 г. (40,2 км³).

Наряду с основными реками на Ладожском водосборе насчитывается около 48 тыс. водотоков нижнего порядка. В Свирь-Онежской части водосбора учтено 10570 водотоков общей длиной 34475 км, что составляет в среднем 0,41 км/км², а в Волхов-Ильменской 24841 длиной 59921 км, или 0,75 км/км² [Григорьев, 1959; Истомина, 1989].

Основное питание рек бассейна Ладожского оз. снеговое, дождевое, а также за счет подземных вод. Для всех рек характерно весеннее половодье с резким повышением уровня воды, связанное с таянием снега. Меженный период наблюдается летом и зимой, когда реки питаются главным образом подземными водами. Осенью, а также иногда при длительных дождях летом на реках наблюдаются паводки со значительным подъемом уровня воды.

Согласно данным многолетних исследований, реки покрываются льдом в конце ноября – в декабре. Максимальной толщины лед достигает в марте. Вскрытие происходит обычно в апреле, в отдельные годы – в мае. В последние годы, в связи с потеплением климата, продолжительность ледостава на реках существенно сократилась.

2.6 Малые озера в пределах Ладожского бассейна

Водосбор Ладожского оз., который в период последнего четвертичного (валдайского) оледенения полностью находился в зоне ледникового покрытия, отличается большим количеством озер. Кроме основных водоемов (Ладожского, Онежского, Сайма и Ильмень), на его территории находится еще более двадцати трех тысяч озер различного размера – от 1 га (площадь, выше который водоем обычно относят к озерам) до сотен квадратных километров. Среди наиболее крупных следует назвать озера Пиелинен (площадь зеркала 894 км²), Водлозеро (322 км²), Сямозеро (266 км²), Янисъярви (175 км²), Лексозеро (166 км²), Тулос (95,7 км²), Вуокса (92,6 км²), Пюхьяярви (69,6 км²). На рис. 2.6.1 и в табл. 2.6.1 представлены результаты оценки количества озер Ладожского водосбора и площадей водной поверхности (по градациям крупности), полученные в результате дешифрирования современных спутниковых снимков. При дешифрировании был использован массив Global Surface Water seasonality за 2019 год. Учитывались все постоянные (существующие более 11 мес. в году) водоемы, включая как искусственные, так и естественные, в том числе менее 1 га. С учетом последних, было насчитано чуть менее шестидесяти трех тысяч водоемов. В силу того, что преобладающая часть водоемов имеет небольшие размеры, на рисунках выбрана логарифмическая шкала.

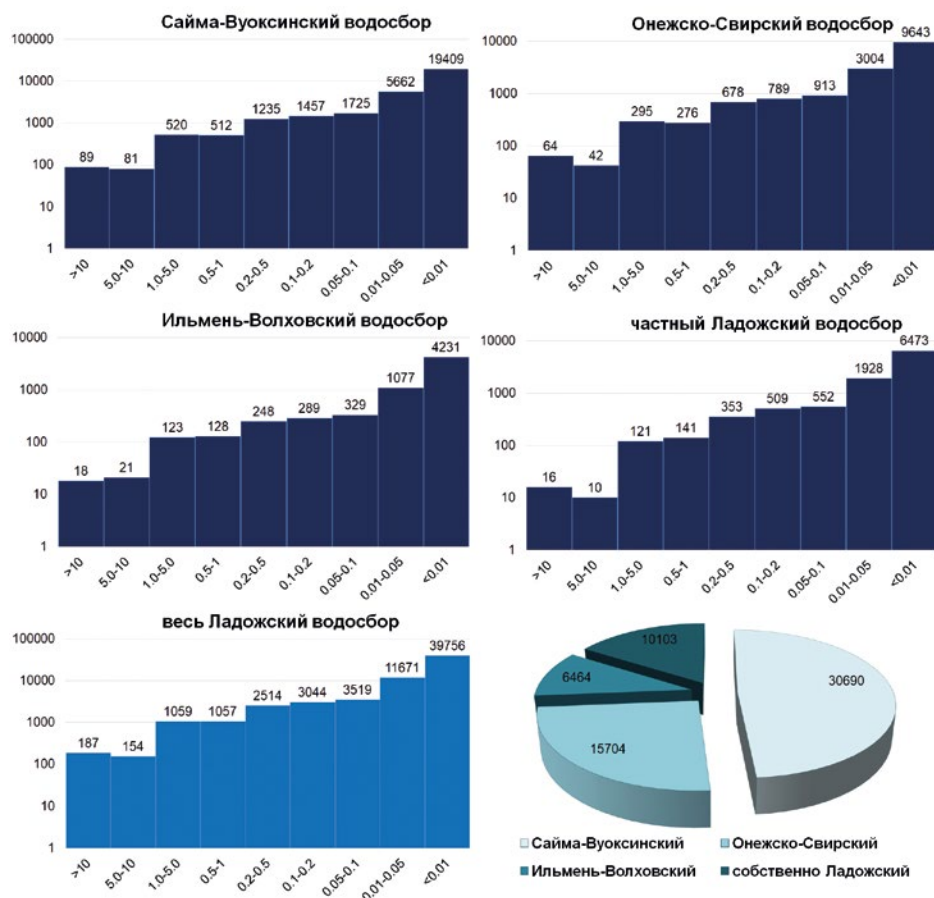


Рис. 2.6.1 – Количество водоемов различной крупности, расположенных в бассейне Ладожского оз., по результатам дешифрирования

Таблица 2.6.1

Результаты оценки суммарных площадей водной поверхности естественных и искусственных водоемов для водосбора Ладожского оз. и 4 его частных водосборов, согласно результатам дешифрирования

Водосборный бассейн	Суммарная площадь водной поверхности по градациям площади									Всего по водосбору, с учетом	
	>10	5,0–10	1,0–5,0	0,5–1	0,2–0,5	0,1–0,2	0,05–0,1	0,01–0,05	<0,01	всех водоемов	превышающих 1 га
Сайма-Вуоксинский	8993	573	1013	352	382	198	119	133	46	11810	11764
Онежско-Свирский	12100	294	604	187	205	108	63	70	23	13654	13630
Ильмень-Волховский	1325	143	257	86	78	40	23	26	9.3	1987	1977
собственно Ладожский	17946	81	250	94	107	70	38	45	15	18646	18632
Весь водосбор	40365	1091	2123	720	772	416	243	272	94	46100	46000

По степени насыщенности озерами водосбор распадается на две основные части: одна расположена к северу от линии р. Свирь – р. Нева, вторая – к югу от нее. Основной озерный фонд сосредоточен севернее указанной линии, прежде всего в той части бассейна, которая относится к Балтийскому кристаллическому щиту [Измайлова, Корнеевкова, 2020]. Как результат – озерность Сайма-Вуоксинского и Онежско-Свирского водосборов превышает 16% (16,9 и 16,6%), а Ильмень-Волховского составляет всего 2,4%. Озерность частного водосбора Ладожского оз. составляет 38,6%, при этом более трети его площади занимает само Ладожское оз. С учетом включения в расчет акваторий всех крупнейших озер, средняя озерность по всему Ладожскому водосбору оценивается в 16,3%. На Сайма-Вуоксинский водосбор приходится чуть менее половины всех дешифрируемых водоемов (48,7%), на Онежско-Свирский – около четверти (26%), на Ильмень-Волховский – около 1/10 (9,6%), и на собственно Ладожский – около 1/6 (15,7%).

Значительная часть озер Ладожского водосбора обязана своим происхождением последнему четвертичному оледенению (валдайскому). По происхождению их озерные котловины разделяются на ледниково-тектонические – образованные в трещинах, которые в период четвертичного оледенения были в значительной степени переформированы эрозионной деятельностью ледника, ледниковые и запрудноречные. К ледниковым относятся озера, образовавшиеся в выпаханных ледником впадинах или в областях распространения зандрового и холмисто-моренного рельефа, на месте захоронения огромных глыб льда, откалывавшихся от ледника при его отступании, и перекрытых толстым слоем моренного материала. Котловины ледниковых озер обычно имеют округлую или вытянутую форму. Их глубины часто не превышают 5–10 м, периодически составляя до 25–30 м и выше. Широкое распространение имеют и подпрудные озера, образовавшиеся вследствие перегораживания речных долин ледниковыми наносами; они имеют много общих черт с ледниковыми озерами. Встречаются узкие, вытянутые в длину ложбинные озера, возникшие по основным руслам стока ледниковых вод и имеющие характерную ориентацию с северо-запада на юго-восток, в направлении движения ледника. Обычно они имеют значительные глубины; таких озер много в Центральной части Карельского перешейка. В южной и восточной части водосбора значительное распространение имеют остаточные озера, сохранившиеся на месте обширных приледниковых водоемов. Их котловины залегают на плоских и слабоволнистых моренных и озерно-ледниковых равнинах и обычно заполнены мощной толщей ила и сапропеля. Встречаются озера с удлинённым ложем, возникшие в углублениях русел бывших ледниковых потоков. Для многих озер юго-восточной части водосбора характерна достаточно сложная, лопастная форма и небольшие глубины. Многие, особенно малые водоемы, зарастают и заболачиваются.

Наряду с озерами ледникового происхождения, на водосборе множество речных, старичных озер и болотных водоемов. Старичные озера занимают углубления прежнего русла реки, в период половодья они соединяются с рекой и пополняются водой. Некоторые озера-старицы во время жаркого и сухого лета могут пересыхать. Для плоских, пониженных частей характерно большое количество вторичных болотных водоемов (мочажин и озер-

ков). На болотах довольно многочисленны небольшие озера-«окна» – остатки еще недавно существовавших озер, на сегодняшний день окруженные со всех сторон болотами, то есть озера в той стадии заболачивания, когда середина водоема еще не завоевана растениями.

В районах распространения легко карстующихся пород, имеющих более широкое распространение в восточной части водосбора, на месте провалов и пустот в известняках встречаются карстовые озера. Они характеризуются небольшими размерами, округлой формой и значительной глубиной. Их особенностью является периодическое исчезновение. Размывая карстующиеся породы, водные потоки нередко, соединившись между собой, образуют сложные подземные системы. Вода периодически уходит в такие системы через образованные на дне карстовые воронки. Чаще всего карстовые озера исчезают после засухи. Иногда они существуют долгое время, что обычно связано или с достаточным поступлением воды, или с засыпанием в результате обвала какого-нибудь из подземных русел, на время прекращающего сток из озера.

Преобладающий размер озер – до 1 км² (на их долю приходится 94% всех озер или 97,8% всех дешифрируемых водоемов). Все крупные, средние и многие малые озера являются проточными или сточными, однако среди малых водоемов значительное количество и временно-сточных, а также озер с отсутствием поверхностного стока. Такие водоемы представлены лесными и болотными озерцами, они имеют торфяные берега и вязкое дно. Озера, лишившиеся поверхностного стока, быстро зарастают и заболачиваются.

Гидрологический и термический режимы озер Ладожского бассейна имеют ряд схожих особенностей. Большая часть озер в силу их проточности и взаимосвязанности отличается небольшими изменениями уровня воды. Уровенный режим характеризуется максимальным подъемом в период весеннего снеготаяния и относительно устойчивой летней и зимней меженью. В осенний период наблюдаются небольшие подъемы уровня, связанные с выпадением осадков. Амплитуда колебания уровня воды озер в основном не превышает 1,5 м, на малых водоемах, характеризующихся резким уклоном дна, возможны подъемы уровня до 3 м. Значительные изменения уровня наблюдаются на большинстве карстовых озер и на непроточных озерах, крайне чувствительных к паводкам. Ярким исключением является оз. Ильмень, уровень которого может колебаться в пределах 7 м.

Для всех озер характерен довольно длительный период ледостава, который чаще всего устанавливается в октябре – декабре и длится до середины весны. Его средняя продолжительность, рассчитанная по данным наблюдений, полученным в XX веке, изменялась от 120 дней в южной части водосбора до 180 дней в северной [Румянцев и др., 2015]. Наблюдающееся в последние десятилетия повышение зимних температур воздуха привело к сокращению продолжительности ледостава. На ряде водоемов сплошной ледяной покров образуется не ежегодно. В северных водоемах низкие температуры воды держатся до 9 месяцев, и поверхностные воды, как правило, летом не прогреваются выше 15–18 °С. В южных озерах низкие температуры сохраняются 6–7 месяцев, летом поверхностные воды в наиболее глубоководных водоемах прогреваются до 18–20 °С, в мелководных – до 24–26 °С. Прогревание

водоемов, как правило, начинается в апреле, максимальных значений температуры воды достигают в конце июля. Охлаждение происходит с августа – сентября, и уже в октябре, в зависимости от метеорологических условий, появляются первые забереги. Наряду с широтным положением, на скорости установления ледяного покрова и амплитуде годовых температур воды сказываются морфометрические особенности озерных котловин, чем мельче озеро, тем быстрее оно отдает тепло осенью и прогревается в теплый период года. Образование сплошного ледяного покрова на таких озерах происходит достаточно быстро, тогда как глубокие водоемы могут на протяжении значительного времени сохранять запасы тепла, что замедляет скорость установления ледяного покрова по всей акватории. Большинство глубоких и средних озер характеризуется формированием прямой стратификации в течение лета, обратной в течение зимы и двумя периодами гомотермии (весенним и осенним). Однако формирование четкого термоклина и значительные расхождения между поверхностной и придонной температурами наблюдаются лишь у немногих, наиболее глубоких озер [Румянцев и др., 2015]. На мелководье вода обычно перемешивается почти полностью. Хорошее перемешивание характерно и для достаточно глубоких озер, плохо защищенных от действия преобладающих ветров.

Для большинства озер северной части водосбора, расположенной на кристаллическом щите, составленном трудно размываемыми породами, характерна невысокая минерализация. Ее средние значения для карельских озер находятся в пределах 15–40, и крайне редко превышают 100 мг/л [Каталог..., 2001]. Озера южной части водосбора характеризуются более высокими значениями минерализации, средние значения которой находятся в пределах 40–100–200 мг/л. На востоке водосбора минерализация большинства озер составляет 20–80 мг/л, в некоторых болотных водоемах она не превышает 10–15 мг/л. В то же время для озер районов, где имеют распространение легко выщелачиваемые породы, характерны повышенные значения минерализации. Среди анионов обычно преобладают гидрокарбонаты, среди катионов – кальций, значительно реже – магний, и еще реже – натрий. По величине рН озера весьма разнообразны, от кислых – слабокислых до нейтральных – слабощелочных, в редких случаях встречаются и щелочные. Повышение величины рН может быть связано с выходами карстующихся пород, активным протеканием процесса фотосинтеза, понижение – с накоплением CO_2 в результате биохимического окисления органического вещества. Наиболее низкие значения рН характерны для высокогумусных водоемов с сильно заболоченными водосборами, а также для светловодных озер, находящихся на речных водоразделах с высокой долей атмосферного питания.

Поскольку большая часть водосбора характеризуется высокой степенью заболоченности, для многих озер, особенно на его севере и востоке, характерно значительное содержание органического вещества гумусовой природы. В целом содержание органического вещества варьирует по территории в широком пределе от очень низких значений до очень высоких [Каталог..., 2001; Лозовик, Филатов, 2006; Румянцев и др., 2015]. Преобладают среднегумусные и высокогумусные водоемы. По причине повышенного содержания органического вещества вода может характеризоваться «недонасыщен-

ностью» кислородом, наименьшее насыщение наблюдается зимой, тогда как весной и осенью оно обычно приближается к 100%.

Для большинства озер северной части водосбора характерна относительная бедность фосфором, как минеральным (варьирующим в пределах 1–60, среднее значение – 2 мкг/л), так и общим (2–200 (16) мкг/л, соответственно) [Каталог..., 2001; Лозовик, Филатов, 2006]. При этом доля минерального фосфора обычно незначительна – 10–20%. В озерной воде южной части водосбора содержание фосфора и азота более высокое. Если в северной части водосбора относительно высока доля олиготрофных водоемов, то в южной многие озера даже в естественных условиях характеризовались как мезотрофные, а некоторые – эвтрофные. Среди мезотрофных водоемов северной части водосбора – озера Пюхьяярви, Котьяярви, Яймяярви, Нялмозеро, Никоново и др. Местонахождение эвтрофных водоемов чаще всего связано с культурным ландшафтом, однако среди них много и озер, трофность которых обусловлена малыми глубинами котловин или другими причинами естественной природы. Их примером в северной части водосбора могут служить озера Хлебное, Пелтери, Каскозеро и др. Еще одним типом озер являются кислотные (ацидотрофные), к ним относятся бессточные или малопроточные водоемы, часто расположенные у водоразделов, коэффициент их условного водообмена обычно не превышает 0,6; почти половина таких озер не имеет видимого стока. По своей площади наиболее значительные из них не превышают 50 га [Каталог..., 2001].

Фитопланктон, встречающийся в озерах Ладожского водосбора, типичен для флоры Европейского северо-запада [Альгофлора, 2006]. Структура сообщества зоопланктона характеризуется наличием как холодноводного малокомпонентного, так и бореально-лимнического многокомпонентного комплексов, причем последний, составленный эвритермными и умеренно-тепловодными видами, встречается наиболее часто.

Наряду с озерами на Ладожском водосборе широко развиты болота, занимающие на ряде участков значительные площади. В бассейне р. Вуоксы на территории Финляндии уровень заболоченности колеблется по отдельным участкам в пределах 10–50%, в бассейнах рек Ловать, Полисть, Шелонь он составляет до 60–70%. К югу от оз. Ильмень заболоченность территории достигает 3–35%, а в Полистовском болотном ландшафте – даже 60–70% [Лесненко и др., 1988; Истомина, Яковлев, 1989]. Высокая степень озерности и заболоченности водосбора Ладожского оз. приводит к значительной зарегулированности протекающих здесь водотоков. Большое количество озер способствует перехвату поступающих с водосбора органических и минеральных веществ.

2.7 Пространственно-временная динамика водной поверхности бассейна Ладожского озера

Как показано ранее, Ладожский водосбор характеризуется высокой степенью озерности, заболоченности и густоты речной сети. Открытые водные поверхности в теплое время года составляют более 16% его площади. В зависимости от периода водности и сезонной изменчивости стока происхо-

дит варьирование данной величины. Современные возможности обработки спутниковых снимков позволяют производить идентификацию водной поверхности с последующим анализом ее динамики в различных частях бассейна. Анализ этих изменений предоставляет дополнительную информацию для определения зон экологического риска.

Исследования изменений площади водной поверхности на водосборе проводились по данным проекта Global Surface Water (GSW), созданным на основе спутниковых снимков Landsat и обработанным с помощью уникальных алгоритмов в глобальном масштабе всей поверхности Земли [Pekel, 2016]. Для водосбора Ладожского оз. был проведен расчет площади водной поверхности и ее изменений на основе дистанционной информации и современных компьютерных методов обработки с максимально возможной степенью детализации. При этом оценивалась вся водная поверхность, без учета ее классификации на различные водные объекты суши (водоемы, речная сеть, области открытой воды на заболоченных участках водосбора). Работа была выполнена с помощью облачной платформы анализа геопространственных данных Google Earth Engine (GEE) [Google Earth Engine]. Платформа работает на вычислительном серверном кластере, рассчитанном на параллельные вычисления. Взаимодействие между пользователем и платформой основано на API, которое осуществляется посредством редактора кода. Выбор облачной платформы GEE связан с удобством вычислений на серверной стороне. В отличие от десктопных ГИС, вычисления на которых зависят от мощности процессора и видеокарты. Также одним из плюсов является наличие каталогов данных большинства распространенных спутниковых сенсоров (Landsat, MODIS, Sentinel, ASTER и др.).

Каталоги GEE включают как наборы стандартных растровых спутниковых снимков, так и уже обработанные модели данных [Feng, 2016; Abatzoglou, 2018; Pekel, 2016; LP DAAC; Hengl, 2019]. Каталоги JRC Global Surface Water, которые использовались в данном исследовании, сгенерированы в результате выполнения проекта Объединенного исследовательского центра Европейской комиссии (European Commission Joint Research Centre (EC/JRC)), который занимается глобальным изучением поверхностных вод и их долгосрочными изменениями на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [Global Surface Water Explorer; Copernicus: Europe's eyes on Earth]. В проекте использовались снимки с Landsat 5 Thematic Mapper (TM), Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper-plus (ETM+) и Landsat 8 Operational Land Imager (OLI), начиная с марта 1984 г. по декабрь 2019 г. Понимание обработки спутниковых снимков для каталогов GSW важно для предположения о возможных неточностях идентификации водной поверхности на конкретном водосборе. Основой выявления и классификации объектов на спутниковых снимках послужило вычисление спектральных индексов поверхностей. Расчет водных индексов основан на спектральном коэффициенте отражения водной поверхности, который максимальный в сине-зеленой области спектра и минимальный – в ИК [Thissen, 2019]. Поскольку каталоги водных поверхностей GSW включают в себя не только «постоянную» воду, но и другие классы поверхностных вод, в процессе обработки снимков также рассматривались и другие спектральные индексы, отвечающие за подстила-

ющую поверхность, атмосферные искажения, растительность [Катаев, 2017] и многие другие комбинации спектральных каналов.

В соответствии с классификацией GSW поверхностные воды были разделены на три основных класса по динамике появления – постоянная (многолетняя), сезонная и с неопределенным (случайным) гидрологическим режимом. Здесь под «постоянной водой» понимается совокупность пикселей, которые идентифицируются как вода с вероятностью 100%, то есть в течение всего выбранного периода наблюдений. Под «сезонной» понимается появление воды в одном и том же месте в определённый период года, т. е. пиксель идентифицируется как вода только в определённый сезон, но со 100%-й вероятностью – ежегодно на протяжении всего периода наблюдений. Водной поверхностью с неопределенным гидрологическим режимом называются такие участки, где вода идентифицируется случайным образом или периодически, что обуславливается сложным гидрологическим режимом. Также за временной промежуток в три десятилетия определены участки поверхности, где полностью исчезли постоянная и сезонная вода или же появились их новые участки. Выделены переходные классы – в некоторых регионах произошел переход от сезонных к постоянным или наоборот и появление случайных, сезонных или постоянных водных поверхностей.

Несмотря на, казалось бы, несложную задачу идентификации и классификации с помощью спектральных индексов, в масштабе десятилетий она сильно усложняется высокой степенью изменчивости водных объектов. Так, изменение температуры воды, концентрации взвешенных твердых частиц, химического и биологического состава, вариации глубины водного объекта и многое другое сильно влияет на его спектральные свойства, а следовательно, и на восприятие спектральных датчиков спутника. Для решения этой проблемы были использованы методы обработки больших данных, экспертные системы, визуальная аналитика [Keim, 2008].

В проекте GSW были применены экспертные системы при анализе изображений для устранения неопределенности данных в процессе классификации. При обработке информации экспертная система присваивает каждому пикселю один из трех классов – вода, суша и невалидные данные. Причем последние в себя включают снег, лед, облачность или технические ошибки сенсоров. После создания спектральной библиотеки и расчета спектральных индексов производился ее анализ посредством визуальной аналитики. С ее помощью были получены уравнения оболочки кластеров в многомерном пространстве признаков для экспертной системы и выделены неопределенности классов. Необходимость этого связана с тем, что спектральные свойства воды могут совпадать со свойствами других целевых классов, и тогда исследуется все пространство признаков для спектрального разделения. Если пиксели и в этом случае нельзя было классифицировать, применялась доказательная аргументация с учетом географического места точек и их хронологии в пространстве признаков. С помощью нее определяют сезонную принадлежность пикселя к тому или иному кластеру [Zhu, 2012].

Проверка погрешностей данных каталогов GSW производилась на основе отношения пропусков пикселей к их общему числу. Анализ показал, что при идентичной работе датчиков пропуск постоянной воды был меньше,

чем сезонной. На технические ошибки датчиков пришлось 0,2%, пропуски составили 1,2%. Также для сезонной воды 0,78% пикселей признаны невалидными и не наносились на карту. Завершающим этапом обработки данных GSW стал визуальный осмотр карт и выявление ложных срабатываний, которые удалялись вручную. На них пришлось 72 км² (0,002%) от всей площади водной поверхности. Такие ошибки в основном вызваны засветками от городов и взлетно-посадочных полос аэропортов [The European Commission's science and knowledge service]. Сейчас GEE предоставляет веб-интерфейс к каталогам данным GSW [JRC Global Surface Water Mapping Layers.; JRC Global Surface Water Metadata; JRC Monthly Water History; JRC Monthly Water Recurrence; JRC Yearly Water Classification History].

Из изложенного выше описания обработки спутниковых данных следует, что каталоги GSW обладают достаточно высокой степенью точности. И поскольку регион Ладожского водосбора достаточно стабилен, как в геологическом, так и гидрологическом плане, то в данных GSW не должно возникать много невалидных пикселей, вызванных неопределенностью класса. Однако данный район обладает высокой облачностью, что в основном может влиять на точность идентификации непостоянных водных пикселей. Однако, как будет показано далее, 89,6% всей водной поверхности на водосборе – составляет постоянная вода. Таким образом, точность идентификации водной поверхности бассейна Ладожского оз. по большей части ограничена только разрешающей способностью спутниковых сенсоров. Оценка изменений водной поверхности на основе данных каталогов GSW впервые проводилась как для всего водосбора Ладожского оз., так и для четырех его частных водосборов. Ниже рассмотрены результаты применения каталогов GWS к Ладожскому водосбору.

Набор данных GSW Occurrence показывает, где находились поверхностные воды в период с 1984 по 2019 г., и предоставляет информацию об общей динамике воды. Этот каталог фиксирует как внутригодовую, так и межгодовую изменчивость. Под возникновением воды здесь понимается измерение частоты присутствия воды (выраженное в процентах от доступных наблюдений во времени, фактически идентифицированных как вода) (рис. 2.7.1).

На рис. 2.7.1 постоянная вода представлена синим, а области, где иногда встречается вода, показаны оттенками от розового до фиолетового (где 0% розовый – вода не встречается, 100% фиолетовый – частота появления воды 100%). Чем светлее оттенок, тем реже встречаются районы, которые периодически покрываются водой в данном регионе. Из рис. 2.7.1 видно, что в основном на площади водосбора имеют место постоянно существующие водоемы и водотоки. Однако особого внимания заслуживает Ильмень-Волховский водосбор и оз. Ильмень (на вкладке рис. 2.7.1), где наглядно видно большое количество розовых пикселей, указывающих на водные поверхности, существующие непостоянно в течение года. Данный каталог помогает оценить частотность появления воды за период наблюдений, но не рассматривает причину их исчезновения или появления. Вероятно, это может быть связано с сезонным паводком или полным пересыханием участка.

Идентификация появления новых водных поверхностей или исчезновения существующих рассматривается в каталоге данных GSW Occurrence

Change Intensity, где наличие водных поверхностей увеличилось, уменьшилось или оставалось неизменным. Данный каталог получен на основе расчета изменений интенсивности распространения воды между двумя эпохами (с 16 марта 1984 г. по 31 декабря 1999 г. и с 1 января 2000 г. по 10 октября 2015 г.). Выбирались гомологичные пары месяцев (то есть одни и те же месяцы содержали достоверные наблюдения в обеих эпохах). Для каждой такой пары вычислялась разница встречаемости между эпохами, а затем различия между всеми гомологичными парами месяцев были усреднены для создания карты интенсивности изменения поверхностных вод. Области, где нет пар гомологичных месяцев, не наносились на карту.

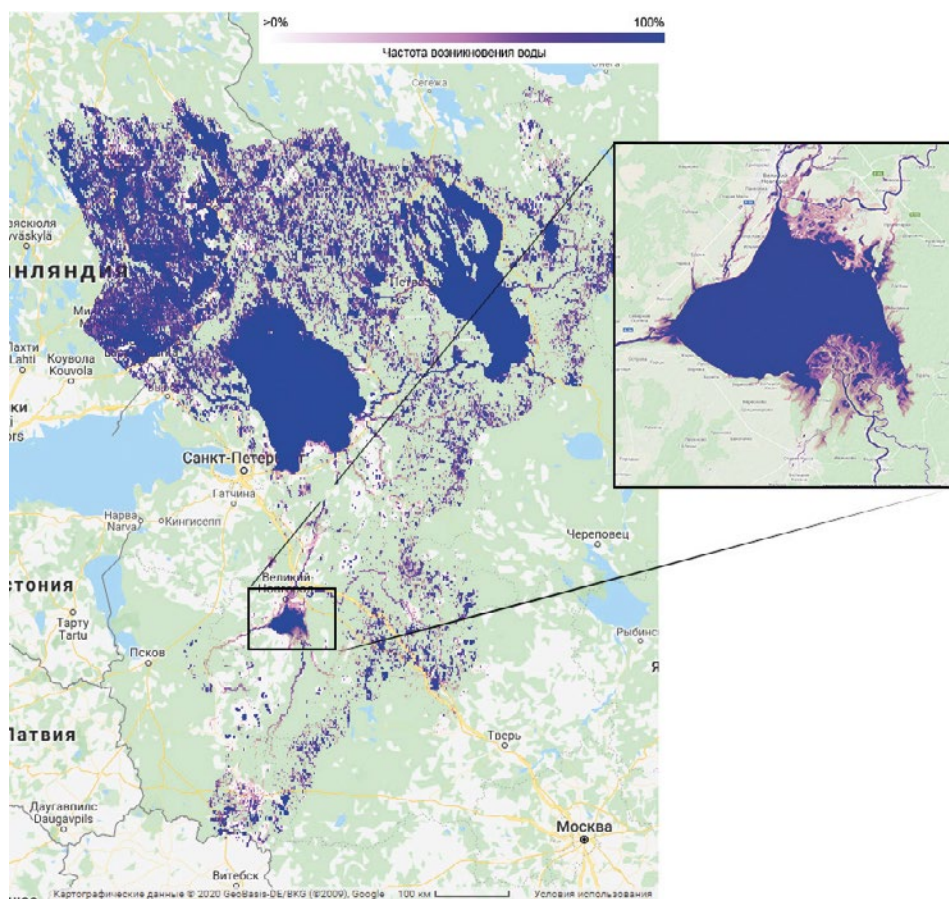


Рис. 2.7.1 – Частота изменения водной поверхности на Ладожском водосборе с 1984 по 2019 г. по данным каталога GSW Occurrence

Поскольку регион является достаточно стабильным в гидрологическом плане и в масштабах карты, охватывающей его целиком, почти не видны изменяющиеся участки, вся карта поверхности водосбора, полученная посредством каталога данных GSW Occurrence Change Intensity, не приводится. В качестве примеров рассмотрены наиболее нестабильные участки в бас-

сейне Ладожского оз., которые были обнаружены при детальном анализе. На рисунке 2.7.2 приведены несколько примеров участков, где изменения сказываются наиболее сильно. Увеличение водной поверхности за период с 1984 по 2019 г. показано зеленым цветом (рис. 2.7.2, а), а исчезновение – красным (рис. 2.7.2, б). Черные области на карте показывают отсутствие или незначительные изменения. Интенсивность цвета представляет собой степень изменения (в процентах). Например, ярко-красные области показывают большую потерю воды, чем темно-красные области. Области серого цвета – это места, где недостаточно данных для расчета значимой статистики изменений. В исследуемом регионе таких участков не обнаружено.

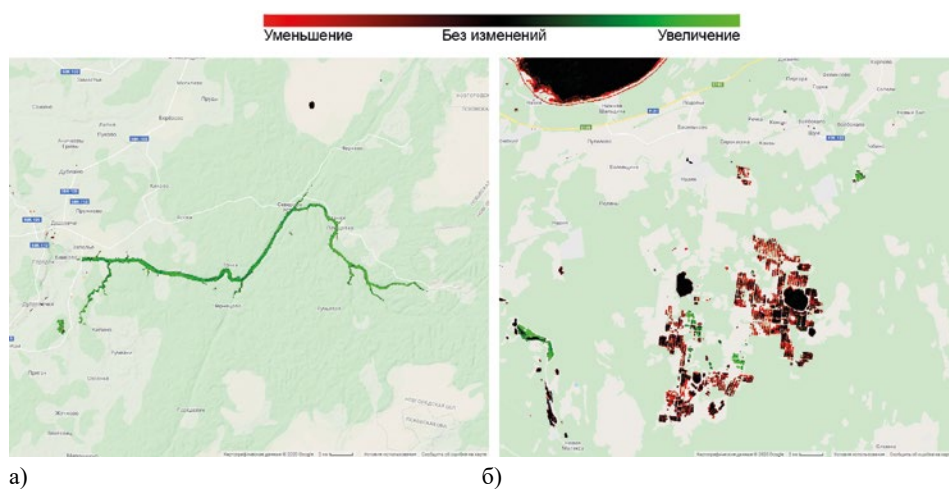


Рис. 2.7.2 – Некоторые участки Ладожского водосбора по данным каталога GSW Occurrence Change Intensity (1984–2019 гг.). а) р. Шелонь, б) заброшенная торфяная разработка к югу пос. Назия

Участки с зелеными пикселями, показывающие увеличение воды (рис. 2.7.2, а), могут свидетельствовать не только о присутствии сезонной воды, но и о серьезных сезонных затоплениях. Так, увеличение водной поверхности на р. Шелонь, входящей в Ильмень-Волховский водосбор, связано с ее сильными периодическими разливами, вследствие аномального увеличения дождевых осадков.

С помощью данного каталога удобно отслеживать зоны экологического риска, как, например, заброшенные торфяные разработки к югу от поселка Назия (рис. 2.7.2, б). В 30-х гг. XX в. активно велись торфоразработки на территории Ленинградской области, самые большие из которых вблизи поселков Назия (бывшие 1–5-й Рабочие Поселки) и Молодцово. Сейчас они уже покинуты и должны активно заболачиваться, однако по данным GSW Occurrence Change Intensity видно, что площадь водной поверхности за последние 30 лет активно уменьшается, она приобрела сезонный характер и следует дальнейшей тенденции осушения. Данный факт говорит об опасности возникновения пожаров, а сами заброшенные торфоразработки требуют пристального внимания.

Однако сам по себе факт увеличения или уменьшения водной поверхности не всегда говорит о причинах данного явления. Для решения задач классификации водных поверхностей используют каталог данных GSW Transitions. Он содержит данные о принадлежности водных пикселей к одному из 10 классов:

1. Постоянная водная поверхность.
2. Новые появившиеся за годы наблюдений постоянные водные поверхности (полная смена класса пикселя «суша – вода»).
3. Исчезнувшая постоянная водная поверхность (пиксель меняет свой класс «вода – суша»).
4. Сезонная вода (т.е. пиксели идентифицировались как сезонная вода на протяжении всего периода наблюдений).
5. Новые сезонные водные поверхности (преобразование пикселя суши в сезонную воду).
6. Исчезнувшие сезонные водные поверхности (преобразование сезонной воды в сушу).
7. Переход сезонной воды в постоянную воду.
8. Переход постоянной воды в сезонную воду.
9. Водная поверхность с неопределенным многолетним гидрологическим режимом (к данному классу относятся поверхности, на которых за три десятилетия наблюдений периодически возникала и исчезала вода, при этом данные явления никак не коррелировали с внутригодовой изменчивостью).
10. Водная поверхность с неопределенным кратковременным (сезонным) гидрологическим режимом (к этому типу поверхностей относятся водные пиксели, которые имеют сезонный характер в течение года, но появлялись при этом не каждый год за весь период наблюдений).

Карта составлялась на основе изменений признаков пикселя за весь период наблюдений. Определялись конкретные даты изменения и сравнивались с сезонными колебаниями и межгодовой изменчивостью. Расчет площадей с помощью данного каталога приведен на рис. 2.7.3. На вкладке рис 2.7.3 представлена, для примера, область в районе оз. Ильмень, где отчетливо видно наличие постоянной водной поверхности (синий цвет), сезонной (голубой цвет) и участки, где полностью исчезла сезонная вода (розовый цвет).

Подробный расчет площадей различных классов водной поверхности по данным GSW для частных водосборов Ладожского водосбора представлен в табл. 2.7.1. Из табл. 2.7.1 видно, что на постоянную водную поверхность приходится 89,61% от всей водной поверхности на водосборе и 3,80% – на регулярную сезонную. При этом большая часть сезонной воды приходится на Ильмень-Волховский водосбор. Полностью исчезнувшие водные поверхности составляют только 0,26% на весь водосбор, прежде всего они наблюдаются на Сайма-Вуоксинском водосборе. Исчезнувшей сезонной воды – 2,65%, по большей части также в Сайма-Вуоксинском и Ильмень-Волховском водосборах. Таким образом, самым нестабильным частным водосбором является Ильмень-Волховский.

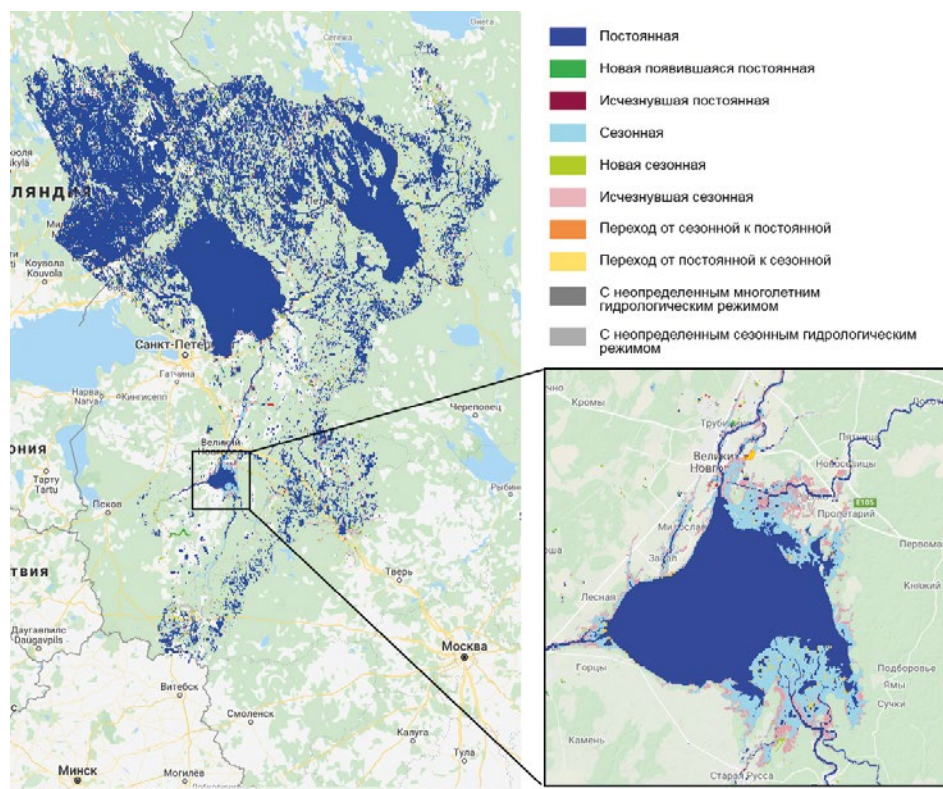


Рис. 2.7.3. – Классификация водной поверхности на Ладожском водосборе по данным архива GSW Transitions за 1984–2019 гг.

Таблица 2.7.1

Площадь классифицированной водной поверхности на частных водосборах

Класс водной поверхности	Весь водосбор, км ²	Онежско-Свирский, км ²	Ильмень-Волховский, км ²	собственно Ладожский, км ²	Сайма-Вуоксинский, км ²
Постоянная	52072,16 (89,61%)	15573,59 (91,80%)	2743,83 (60,02%)	19211,51 (96,14%)	16041,28 (88,25%)
Новая появившаяся постоянная	308,38 (0,53%)	101,83 (0,60%)	47,03 (1,03%)	41,12 (0,21%)	148,45 (0,82%)
Исчезнувшая постоянная	153,98 (0,26%)	36,19 (0,21%)	24,29 (0,53%)	35,77 (0,18%)	60,81 (0,33%)
Сезонная	2207,8 (3,80%)	395,47 (2,33%)	940,00 (20,57%)	206,45 (1,03%)	644,25 (3,54%)
Новая сезонная	757,24 (1,30%)	248,42 (1,46%)	137,37 (3,01%)	119,94 (0,60%)	261,51 (1,44%)
Исчезнувшая сезонная	1477,20 (2,54%)	304,64 (1,80%)	453,77 (9,93%)	224,55 (1,12%)	481,64 (2,65%)
Переход от сезонной к постоянной	129,41 (0,22%)	38,71 (0,23%)	3,40 (0,07%)	13,06 (0,07%)	98,60 (0,54%)
Переход от постоянной к сезонной	341,69 (0,59%)	54,90 (0,32%)	64,34 (1,41%)	53,54 (0,27%)	176,63 (0,97%)

Класс водной поверхности	Весь водосбор, км ²	Онежско-Свирский, км ²	Ильмень-Волховский, км ²	собственно Ладожский, км ²	Сайма-Вуоксинский, км ²
С неопределенным многолетним гидрологическим режимом	46,98 (0,08%)	15,83 (0,09%)	4,76 (0,10%)	5,55 (0,03%)	26,96 (0,15%)
С неопределенным кратковременным (сезонным) гидрологическим режимом	613,43 (1,06%)	194,98 (1,15%)	152,07 (3,33%)	69,81 (0,35%)	237,42 (1,31%)

2.8 Котловина Ладожского озера и характер берегов

Как уже упоминалось, Ладожское оз. расположено на границе двух крупнейших геологических структур Европы – Балтийского кристаллического щита и Русской платформы. Различие в геологическом строении отражается на устройстве озерной котловины и характере береговой линии. Рельеф дна северной части Ладожского оз. сложный, характеризующийся чередованием глубоких впадин с мелководными участками. Самое глубокое место озера (230 м) находится западнее о-ва Валаам, для северной части Ладоги характерен еще целый ряд впадин глубиной 50–220 м. Оконтуривающие озеро с севера и северо-запада берега высокие и сильно расчлененные. Побережье окаймлено многочисленными островами. Сочетание островов, проливов и глубоко врезанных в сушу заливов создает своеобразный шхерный район Ладоги. На озере насчитывается более 600 островов, большинство из которых находится в северной части водоема. К самым крупным относятся о-ва Риеккалансари (55,3 км²), Кильполе (32,1 км²), Тулолансари (30,3 км²) и Валаам (27,8 км²).

По направлению на юг, по мере перехода к Русской платформе, рельеф дна становится более спокойным и ровным, глубины уменьшаются. На дне наблюдается большое количество валунов. В прибрежной зоне много мелей, каменистых рифов и банок. Берега более пологие, слабо изрезанные, подтапливаемые, местами оконтуренные песчаными и каменистыми косами. Побережье представляет собой низменную равнину с небольшим уклоном в сторону озера. В южной половине озера – три крупных залива: Свирская, Волховская и Шлиссельбургская губы. В восточный берег вдаются два залива – Лункуланлахти и Уксунлахти, отгороженные со стороны озера одним из крупнейших островов Ладоги – Мантинсари (39,4 км²).

Геологическое строение территории и ее геологическая история определяют особенности структуры котловины Ладожского оз., а также ее морфометрию. Необходимо отметить, что морфометрия водоема является его важнейшей первичной лимнической характеристикой, обуславливающей процессы обмена веществом и энергией как внутри водной массы, так и на границе взаимодействия поверхности воды и прилегающего слоя воздуха [Молчанов, 1945]. Огромные запасы тепла и инерционность водной массы Ладожского озера способствуют формированию локального климата в близлежащих районах.

На основе созданных цифровых батиметрических моделей Ладожского оз. [Науменко, 2013] были обновлены и скорректированы морфометрические характеристики озера, проведено лимническое районирование глубин,

выделено шесть районов (рис. 2.8.1). В крупных озерах в силу больших размеров и разнообразия глубин необходимо проводить районирование их акватории, выделяя районы, где лимнические процессы имеют одинаковую направленность. В зависимости от глубины и объема вод лимнических районов теплосодержание изменяется как по сезонам, так и по акватории озера. Ладожское оз. (площадь акватории 17765,4 км²) было разбито на шесть районов: 1) мелководный, 2) переходный, 3) район озерного уступа, 4) склоновый, 5) глубоководный, 6) впадины, характеристики которых подробно обсуждаются в монографии [Ладожское озеро..., 2002; Науменко, 2013], и обобщение представлено в табл. 2.8.1.

Таблица 2.8.1

Морфометрические характеристики лимнических районов Ладожского оз.

Район	Площадь, км ²	%	Объём, км ³	%	Характеристики	Среднее	Медиана	Диапазон Н (м) и γ (град)	Ср. квд. откл.
I	5465,0	30,8	46,7	5,5	Глубина, м	8,8	8,9	0,0–18	5,06
					Уклон γ, град	0,22	0,09	0,0–6,8	0,40
II	4631,3	26,1	153,6	18,1	Глубина, м	33,2	32,7	18–50	9,46
					Уклон γ, град	0,44	0,17	0,0–11,0	0,73
III	3693,4	20,8	221,1	26,1	Глубина, м	59,9	60,0	50–70	5,40
					Уклон γ, град	0,44	0,24	0,0–8,5	0,66
IV	1910,0	10,8	158,4	18,7	Глубина, м	82,9	81,7	70–100	8,84
					Уклон γ, град	0,81	0,42	0,0–11,1	1,01
V	1487,9	8,4	174,7	20,6	Глубина, м	117,3	116,6	100–140	11,41
					Уклон γ, град	0,99	0,65	0,0–10,2	1,02
VI	577,8	3,2	93,3	11,0	Глубина, м	161,9	157,2	140–230	17,11
					Уклон γ, град	1,16	0,88	0,0–11,8	1,01
все озеро	17765,4	100	847,8	100	Глубина, м	48,3	41,6	0,0–230	39,9
					Уклон γ, град	0,49	0,20	0,0–11,8	0,76

Данные таблицы указывают на увеличение степени пространственной вертикальной расчлененности (среднеквадратическое отклонение) подводного рельефа с увеличением глубины районов. Наибольшей расчлененностью характеризуется район впадин с глубинами более 140 м. Наибольшую площадь занимает мелководный район (около 30%) с глубинами до 18 м, однако в нем заключено наименьшее количество воды, что требует к нему повышенного внимания, так как попадающие с водосбора загрязняющие вещества различной природы прежде всего будут трансформироваться именно в этом районе. Здесь располагается и литоральная зона озера с площадью 2543 км², которая включает в себя 9,67 км³. Наибольший объем воды содержится в районе озерного уступа с глубинами от 50 до 70 м (26% от общего объема озера). В два раза больший объем, чем в мелководном районе, сосредоточен в глубоководных впадинах (Н >140 м).

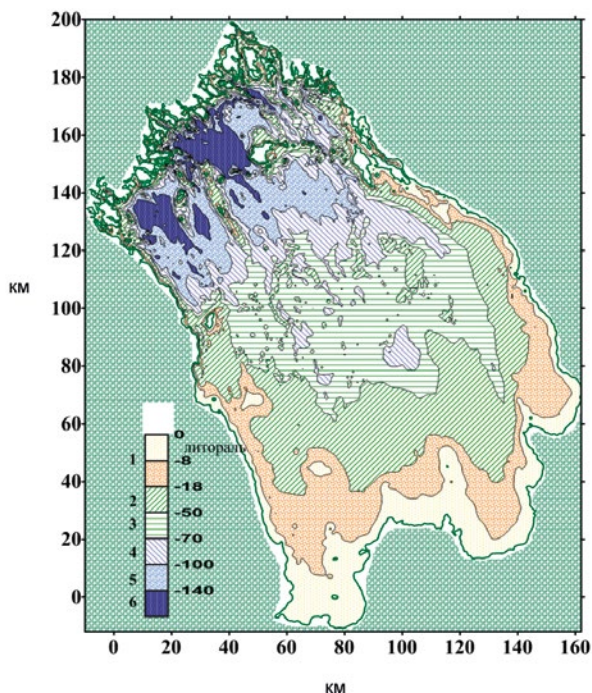


Рис. 2.8.1 – Лимнические районы Ладожского оз.

В подводном рельефе Ладожского оз. существует 16 обособленных впадин, которые не взаимодействуют между собой и аккумулируют наибольшее количество донных отложений. Цифровая батиметрическая модель Ладожского оз. уточнила объём водной массы, что является крайне важным при составлении водного, теплового и химического баланса озера [Науменко, 2013; Naumenko, 2020]. Следует подчеркнуть, что цифровая батиметрическая модель подводного рельефа является необходимым инструментом для привязки космической информации, а также важна для исследования взаимодействия биотических и абиотических факторов в крупном озере, выявления геоморфологических особенностей дна озера [Науменко и др., 2000; Naumenko, 2020; Aksenov et al., 2020; Петухов и др., 2020].

2.9 Современная освоенность водосбора и его влияние на экосистему озера

Ладожское оз. и связанные с ним водным стоком озера Онежское, Ильмень и Сайма, а также отдельно расположенное Псковско-Чудское оз. формируют уникальную систему Великих Североевропейских озёр, играющих важную роль в социально-экономической жизни Северо-Западного региона России.

В настоящее время на территории водосбора Ладожского озера проживает около 4 млн человек. Плотность населения на российской части водосбора в среднем составляет 12,4 чел./км² [Румянцев, Драбкова, 2007], в бассей-

не р. Волхов – 40 чел./км², и р. Сяси – 20 чел./км² [Расплетина, Сусарева, 2006]. В береговой зоне Ладоги расположены такие города, как Приозерск, Новая Ладога, Сясьстрой, Видлица, Питкяранта, Импилахти, Сортавала, Ляскеля, Лахденпохья и др., в которых совокупно проживает около 0,5 млн человек. На водосборе находятся Великий Новгород, Петрозаводск, Тихвин, Волхов, Кириши, Старая Русса, Боровичи, Бологое, Вышний Волочок и Великие Луки, в финской части водосбора – Йозенсу, Иматра и Лаппенранта. Водосбор характеризуется высоким уровнем промышленного и сельскохозяйственного производства. Здесь развиты горнодобывающая промышленность, лесоразработки, сельскохозяйственное производство, водный транспорт, рекреационная и туристическая деятельность и др. Определенное развитие имеет гидроэнергетика.

Среди промышленных предприятий, расположенных на Ладожском водосборе, преобладают водо- и ресурсоемкие отрасли. Большой удельный вес приходится на целлюлозно-бумажные, деревообрабатывающие, химические, нефтехимические, топливно-энергетические предприятия, машиностроение, энергетику, цветную металлургию, предприятия по разработке нерудных ископаемых. Такие отрасли характеризуются высокой степенью отходов и, следовательно, загрязнений, благодаря чему оказывают наибольшую нагрузку на природно-ресурсный потенциал водоема. В границах Ленинградской области в водоохранной зоне Ладожского бассейна размещено большое число складов минеральных удобрений и сельскохозяйственных ядохимикатов.

В северной части водосбора в пределах РФ основными предприятиями, сбрасывающими сточные воды в водоемы Ладожского водосбора, являются расположенный на берегу Кондопожской губы Онежского озера Кондопожский целлюлозно-бумажный комбинат (ОАО «Кондопога»), находящийся на северном берегу Ладожского оз. Ляскельский бумажный завод, расположенный на острове Пусунсаари Ладожского оз. целлюлозный завод «Питкяранта», расположенный в г. Выборг комбинат «Выборгская целлюлоза», а также многочисленные предприятия г. Петрозаводска. До 1986 г. серьезным загрязнителем Ладожских вод был Приозерский ЦБК, однако с целью улучшения экологической обстановки в регионе ЦБК был перепрофилирован в Приозерский мебельный деревообрабатывающий комбинат (ПМДК). С финской части водосбора загрязнение поступает с водами р. Вуоксы, характеризующимися повышенным содержанием органических веществ. Согласно [Государственный, 2019], объем поступления органических веществ в створе близ пос. Лесогорский в 2018 г. оценивался в 46 тыс. т в год, азота минерального – 2,53 т, общего фосфора – 0,242 т. Кроме того, с водой р. Вуоксы за период 2014–2018 гг. было перенесено через границу повышенное количество общего железа (12,1 тыс. т) и соединений меди (354 т).

В восточной и южной части Ладожского водосбора в загрязнении водоемов и водотоков значительная роль принадлежит стокам «Сясьского ЦБК» (г. Сясьстрой), ОАО «Акрон» (г. Новгород) и ООО «Производственное объединение «Киришинефтеоргсинтез» в г. Кириши. Доля ООО «Производственное объединение «Киришинефтеоргсинтез» составляет более 1/3 от общего объема загрязненных сточных вод Ленинградской области,

а ОАО «Акрон» превышает 1/2 всех загрязненных сточных вод, сбрасываемых в водные объекты Новгородской области [Румянцев др., 2015].

В значительной степени водоемы и водотоки водосбора Ладожского оз. страдают от коммунальных стоков. Наряду с концентрированным поступлением прошедших определенную очистку стоков крупных городов, в водотоки, а также в малые и средние водоемы сбрасываются сточные воды небольших городов и поселений региона, часто не прошедшие обработку. Это приводит к значительному антропогенному эвтрофированию водоемов Ладожского водосбора. К тому же с бытовыми стоками в воду периодически поступают и токсические вещества. С речным стоком все они разносятся по водосбору, на завершающем этапе в разбавленном состоянии попадая в Ладогу.

Под сельскохозяйственными угодьями находится около 1/10 Ладожского водосбора. Функционирование сельского хозяйства связано с широкомаштабными мелиоративными работами, изменяющими характер водного стока и влияющими на качество воды. Его развитие также сопряжено с активным использованием минеральных и органических удобрений для повышения урожайности, что приводит к активному сносу с полей большого количества органического и минерального фосфора, и с использованием пестицидов для борьбы с вредителями и болезнями растений. Значительное распространение на водосборе имеют предприятия животноводства: птицефабрики, комплексы по выращиванию и откорму свиней, предприятия по разведению крупного рогатого скота, плохо очищенные стоки которых вносят дополнительную нагрузку на водотоки Ладожского бассейна, разгружающиеся в озеро.

Большая часть сточных вод от городов и промышленных предприятий поступает в Ладожское оз. локализованно, что обуславливает возникновение вблизи побережья повышенных «точечных» очагов загрязнения, крайне негативно отражающихся на конкретных водных биотопах, в которых исчезают типичные представители Ладожской фауны, и видовой состав беспозвоночных оказывается крайне ограниченным. При сильном загрязнении органическими веществами здесь могут возникать «мертвые» и полисапробные зоны. Прежде всего такие очаги охватывают устьевые участки рек, небольшие заливы и губы озера. В полисапробных зонах могут в массе развиваться лишь один-два вида организмов, крайне выносливых к органическому загрязнению.

Наряду с промышленными и городскими сточными водами Ладожское оз. получает загрязнение и воздушным путем благодаря атмосферным (трансграничным) переносам дымовых и пылевых выбросов, содержащих токсические вещества. Как уже указывалось, бассейн озера характеризуется достаточно высокой концентрацией промышленных предприятий, кроме того, аэротехногенное загрязнение вызывается работой широко распространенных на водосборе, прежде всего в крупных центрах, предприятий по производству, передаче и распределению электроэнергии, газа, пара и горячей воды, а также предприятий транспорта и связи. В непосредственной близости к водосбору находится такой крупнейший индустриальный центр, как Санкт-Петербург, а также города и промышленные предприятия Карелии, Финляндии, Эстонии. Не так далеко от бассейна Ладожского оз. находятся высокоразви-

тые в промышленном отношении крупные промышленные страны Западной Европы, откуда через атмосферу также поступают загрязняющие вещества. Согласно [Государственному..., 2019] в 2018 г. общий объем выбросов загрязняющих веществ (включая выбросы от ж/д транспорта) только по Ленинградской области составил 412,9 тыс. т, а по Новгородской – 132,4 тыс. т. В составе атмосферных выпадений на озерную акваторию доминируют диоксид серы, оксид углерода, окисленный азот [Государственные доклады..., 2016–2018]. Также поступают фтористые соединения, аммиак, сероводород, формальдегид, хлор, марганец, хром, ртуть и др. В итоге из атмосферы на акваторию озера выпадают с осадками или в виде пыли тысячи тонн железа, сотни тонн цинка, десятки тонн свинца, ванадия, марганца и др. Для ряда веществ модули атмосферного поступления в 2–5 раз выше, чем модули выноса с водным стоком [Lake..., 2009].

Наряду с хозяйственной деятельностью на водосборе и на соседних с ним территориях на экологическое состояние водоема негативное влияние оказывает и хозяйственная деятельность в самом озере, связанная с судоходством, рыболовством, рекреацией, захоронением различных отходов и т. д. Наибольшее влияние оказывает судоходство. Рыбный промысел ведется не на всей акватории, а в наиболее продуктивных районах, поэтому его «нагрузка» на экосистему преимущественно локальная.

Как результат высокой антропогенной нагрузки, воды вытекающей из Ладожского оз. р. Невы на большинстве створов (включая верхние) характеризуются как «загрязненные», основные загрязнители – органические вещества (по ХПК), соединения меди, цинка, железа, марганца, реже нефтепродукты [Государственный..., 2019]. На протяжении последнего десятилетия качество воды р. Невы сохраняется стабильным.

В естественных условиях совокупность природных условий водосбора Ладожского оз. способствовала формированию типичного олиготрофного водоема, характеризующегося высоким качеством воды, богатой кислородом с низким содержанием биогенных элементов. В 1949 г. С.В. Гердом озеро было выделено в группу ультраолиготрофных озер с низкой биологической продуктивностью [Герд, 1949]. Однако по мере интенсивного хозяйственного освоения водосбора его огромная территория стала оказывать негативное воздействие на озерную экосистему. Особенно сильно антропогенная деятельность стала сказываться со второй половины XX века, когда было положено начало бурному развитию промышленного производства, наиболее высокие темпы которого наблюдались в 1970-е гг. Как результат, уже к началу 1980-х годов в воде озера существенно повысилось содержание фосфора, а концентрация кислорода в глубоководных районах в зимний период понизилась не только у дна, но и на поверхности. Если в 1959–1962 гг. в озеро в среднем в год поступало 2430 т фосфора, то уже в 1976–1979 гг. объем поступлений увеличился до 6830 т. Оказался превышенным рубеж в 4000 т, который отделяет олиготрофное состояние Ладожского оз. от мезотрофного [Антропогенное..., 1982; Ладожское..., 1992]. Концентрация общего фосфора в озерной воде увеличилась в среднем до 27 мкг/л против 10 мкг/л в 1959–1962 гг., а минерального за этот период – до 12 мкг/л с 3 мкг/л [Расплетина, 2002].

Наряду с биогенными элементами со сточными водами, различными выбросами и трансграничными воздушными потоками в озеро поступало и огромное количество других загрязняющих веществ. Согласно [Экологическая обстановка..., 1998], объем сточных вод, проникающих в Ладожское оз., в конце XX века составлял 497,7 млн м³, для сравнения, в Онежское оз. поступало 137,5 млн м³, а в оз. Сайма – 583,0 млн м³ [Экосистема..., 1990; Saimaan alueen..., 1983], 443,0 млн м³ приходилось на сточные воды промышленных предприятий. В результате столь высокого антропогенного пресса на больших участках акватории Ладожского оз. (особенно в приустьевых участках рек и вблизи выпусков сточных вод) было отмечено ухудшение качества воды из-за присутствия в ней хлорорганических пестицидов, солей тяжелых металлов, нефтепродуктов, фенолов и др. На значительной части акватории периодически стала визуально наблюдаться нефтяная пленка. В воде и донных отложениях появились бензол, хлорфенолы, альдегиды, кетоны, спирты, терпеновые соединения, серосодержащие вещества.

Улучшение экологического состояния озера наметилось в конце 1980-х годов и было связано как с принятием целого ряда природоохранных мер (запрет молевого сплава леса в реках бассейна, перепрофилирование Приозерского целлюлозно-бумажного завода и аналогичного предприятия в Харлу (Карелия), установка по биологической очистке стоков и перенесение выпуска сточных вод в г. Питкяранте, проведение технологических изменений на Волховском алюминиевом заводе, и др.), так и с начавшимся в этот период экономическим спадом (сократилось производственное водопотребление и водоотведение). Природоохранные мероприятия позволили сократить поступление в озеро фосфора и ряда других вредных веществ. Внешняя фосфорная нагрузка снизилась до 0,32 г·Р·м²/год в 1992–1995 гг. и 0,20–0,23 г·Р·м²/год в 1997–1998 гг. Кроме того, за счет спада производства водопотребление в бассейне Ладожского оз. за счет уменьшения потребностей промышленности снизилось по сравнению с 1992 г. на 51%, сбросы сточных вод в водоем – на 24% [Smirnova, 1999], сократилось поступление сточных вод с экологически опасными ингредиентами. Как результат, в воде снизилось содержание фосфора – главного элемента, ответственного за рост эвтрофирования водной массы. Наступило уменьшение общей эвтрофированности водных масс в различных участках, произошло повышение прозрачности воды, содержания в ней кислорода и т. п. В составе бентоса вновь появились почти исчезнувшие во время максимального эвтрофирования реликтовые виды ракообразных и т. д. [Ladoga, 2009].

Однако восстановление экосистемы озера из-за значительной инертности внутриводоемных процессов проходило медленно и неравномерно в различных его частях. Наряду с общим улучшением экосистемы периодически отмечались ухудшения целого ряда ее характеристик. Сохранились проблемы восстановления биологических ресурсов водоема. Современные исследования, рассматриваемые в рамках настоящей монографии, свидетельствуют, что из-за огромных размеров озера и разнотипности отдельных его участков экологический статус водоема различен в разных его частях. Более подробно вопросы современного состояния Ладоги рассмотрены в следующих главах монографии.

Глава 3. Природное и антропогенное воздействие на Ладожское озеро и его водосбор в позднеледниковый и голоценовый периоды

Донные отложения озер являются наиболее достоверным источником информации для реконструкции природной среды в прошлом. Палеолимнологические исследования позволяют не только проследить историю озер на всем протяжении их развития, но и выявить климатические изменения на разных этапах существования озера, а также фиксировать динамику антропогенного влияния на озеро и его водосбор. Вопросы установления особенностей природных и антропогенных факторов в развитии озер представляются особенно актуальными в настоящее время в связи с активизацией использования озер человеком. В последнее время активно изучаются процессы эвтрофирования водоемов под воздействием антропогенных факторов. Механизм же естественного эвтрофирования до сих пор изучен недостаточно. Для этого нужны данные по реконструкции трофического состояния озер, его динамике и причинах изменения их продуктивности за длительный период (в течение тысячелетий).

3.1 История и методика палеолимнологических исследований

Начало изучения донных отложений Ладожского оз. в 1959 г. положила Ладожская комплексная экспедиция Института озераведения АН СССР, возглавляемая Н.И. Семеновичем [Семенович, 1966]. Тогда были сделаны первые заключения по особенностям осадконакопления в озере. Впервые была предпринята попытка биостратиграфического расчленения донных отложений по данным спорово-пыльцевого и диатомового анализов [Абрамова, Давыдова, 1966; Абрамова и др., 1967; Давыдова, 1961]. В 1970-х годах Институтом озераведения АН СССР проводятся комплексные исследования Ладожского оз., направленные на решение проблемы антропогенного эвтрофирования озера, включавшие и работы по донным отложениям. Итоги исследований отражены в монографии [Антропогенное эвтрофирование..., 1982]. К концу 1960-х – началу 1970-х годов приурочен ряд статей, затрагивающих вопросы палеогеографии голоцена Ладоги и формирующих представление об истории озера [Давыдова, 1961; 1968; Шеффер, 1967; Знаменская, Ананова, 1967 и др.], проанализированных и обобщенных в монографии Д.Д. Квасова [1975]. В 1980-е годы проводятся широкомасштабные исследования донных отложений Ладожского оз. Института озераведения совместно с ВСЕГЕИ и СЕВМОРГЕО. Изучение большого количества кернов донных отложений и поверхностных проб по всей акватории позволило получить новые данные о строении донных отложений Ладожского оз. Стратификация донных отложений была основана на материалах литологического, геохимического, палеонтологического, диатомового, палеомагнитного и других видов анализа. Важные сведения о строении и мощности четвертичных отложений, особенностях

строения коренных пород впервые были получены благодаря геоакустическому зондированию [Амантов, 1993; Бахмутов и др., 1993; Давыдова и др., 1993; 1998; Делюсина, 1988; Субетто, 1988; Delusina, 1991; Subetto et al., 1998 и др.]. Комплексные палеолимнологические и геологические исследования позволили получить новые данные о строении и распределении донных отложений, особенностях осадконакопления и истории Ладожского оз., а также послужили основой для построения литологической карты, карты четвертичных отложений Ладожского оз. и серии палеогеографических карт развития озера в позднем плейстоцене и голоцене [Атлас «Ладожское озеро», 2002; Субетто, 2002]. В 1990-е годы начинаются совместные исследования Института озера РОВЕ РАН с финским университетом г. Йенсуу и с Институтом водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (Петрозаводск). Работы проводились с целью выработки методической основы мониторинговых исследований, в том числе и палеогеомониторинга. Изучались поверхностные пробы и отложения из коротких колонок [Давыдова, Субетто, 2000; Давыдова и др., 1997; Slepukhina et al., 1996]. На Ладожском оз. было изучено 36 колонок донных отложений в диапазоне глубин от 13 до 230 м, что дало возможность охарактеризовать условия осадконакопления в различных морфологических районах Ладожского оз. на протяжении поздне- и послеледниковья. По геофизическим данным выявлена мощность четвертичных отложений в разных частях озера [Субетто, 2002; Subetto et al., 1998]. На основе исследования диатомовых комплексов донных отложений прослежена динамика экологического состояния озера. Для характеристики степени загрязнения и эвтрофирования различных участков акватории Ладожского оз. применены интегральные индексы сапробности диатомовых комплексов в донных отложениях озера [Давыдова, 1985; Давыдова и др., 1998; Subetto et al., 1998]. Изучение донных отложений Ладожского оз. с помощью палинологического анализа продолжается практически непрерывно с начала первых экспедиций на Ладожском оз. [Абрамова и др., 1967] и до настоящего времени. Длинные и короткие колонки донных отложений, а также поверхностные пробы палинологическим методом изучались Е. А. Анановой (1956–1960-е гг.), С. А. Абрамовой (1960–70-е гг.), И. В. Делюсиной (1980–90-е гг.), В. И. Хомутовой (1990-е гг.), Т. В. Сапелко (1990-е – по настоящее время). С 2000-х годов начали работать с ладожскими колонками донных отложений А. А. Андреев и Л. А. Савельева. В результате установлены условия формирования донных отложений Ладожского оз. в плейстоцене и голоцене, природные и антропогенные факторы, влияющие на развитие геосистемы озера. Установлен возраст накопления отдельных горизонтов донных отложений. История озера изучалась также по данным о распространении озерной фауны [Квасов, 1990].

С началом XXI века при проведении комплексных палеолимнологических исследований Ладожского оз. еще большее внимание стало уделяться геоэкологической проблематике. В последние годы на Ладожском оз. впервые была опробована разрабатываемая в ИНОЗ РАН методика разделения влияния природных и антропогенных факторов на экосистемы озер на основе палеолимнологических данных [Сапелко и др., 2015]. Для автоматизации статистических расчетов на основе критерия Манна – Уитни была создана программа «Расчет статистически значимых изменений осадконакопления

в индустриальный период» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018614971 от 20 апреля 2018 года). Продолжаются работы по реконструкции изменения уровня Ладожского оз. в период позднего плейстоцена – голоцена. Используются новые современные подходы, такие как, например, использование непыльцевых палиноморф при палинологическом анализе [Сапелко и др., 2018], использование цист хризифитов (кремнистых микроостатков золотистых водорослей) при диатомовом анализе [Лудикова, 2019]. Также совершенствуются старые методы, такие как комплексное изучение донных отложений малых озер, расположенных на разных абсолютных отметках и являвшихся на разных этапах своего развития частью Ладожского оз. Подобные работы в настоящее время ведутся на островах северной части Ладожского оз.: Путсаари, Лункулансаари, Валаам [Лудикова и др., 2005; Сапелко и др., 2014; Sapelko et al., 2020]. Уникальность расположения внутренних озер острова на небольшом расстоянии друг от друга и при этом на разных высотных отметках дает возможность восстановить период изоляции этих озер и, соответственно, изменение уровня Ладожского оз. Новые методики для изучения истории Ладожского оз. в последнее время также включают в себя историю заболачивания на примере островных озер [Сапелко, Корнеевская, 2017] и картирование этапов развития Ладожского оз. в голоцене [Terekhov, Sapelko, 2016]. В последние годы исследования проводились как на акватории современного Ладожского оз., так и на его берегах, которые в результате изменения уровня Ладоги на разных этапах голоцена были частью озера или его береговой зоной. В основном в монографии представлены результаты исследований по колонкам и поверхностным пробам донных отложений современной котловины Ладожского оз. (рис. 3.1.1).



Рис. 3.1.1 – Местоположение исследованных разрезов и отбора поверхностных проб. Условные обозначения: четырехконечные звезды – места отбора колонок донных отложений на Ладожском оз.; кружки – места отбора поверхностных проб; цифры – номера станций (в местах отбора колонок отбирались и поверхностные пробы)

Результаты комплексного анализа представлены для колонок донных отложений станций (ст.) 55, 82, 300 в центральной части Ладожского оз. и ст. 304 в северной части озера. Для остальных колонок выполнены литостратиграфия (рис. 3.1.2) и анализ потери при прокаливании. Границы литологических слоев в изученных колонках в основном постепенные. Донные отложения представлены преимущественно глинами, глинистыми и алевритовыми гиттиями и слоистыми гиттиями. Часто отмечаются прослои гидротроилита, а в верхней части колонок – железомарганцевые корки. По поверхностным пробам представлены результаты диатомового анализа. Для островных озер представлены результаты исследования по изучению заболачивания берегов Ладожского оз. и реконструкция этапов Ладожской трансгрессии.

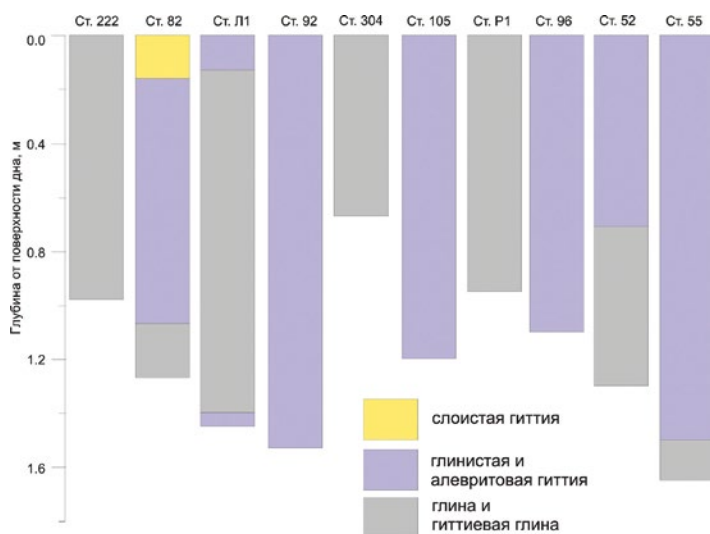


Рис. 3.1.2 – Литостратиграфия колонок донных отложений Ладожского оз.

Комплексные палеолимнологические исследования Ладожского оз. последних лет включают в себя полевые и аналитические исследования. Полевые работы по отбору поверхностных проб и колонок донных отложений проводились с борта научно-исследовательских судов «Талан» и «Эколог». Для отбора поверхностных проб донных отложений использовался дночерпатель Экмана – Берджи, а для отбора колонок – ударная трубка ГОИН (длина 1,0 и 1,5 м, диаметр 5 см). Для аналитических работ использован комплексный анализ, включающий в себя литостратиграфический и анализ потерь при прокаливании, радиоуглеродный (AMS) палинологический, диатомовый анализы, ботанический анализ торфа, а также анализ металлов и фосфора в колонках донных отложений. Использованы также статистические методы обработки данных, полученных по динамике содержания металлов, фосфора и органического вещества.

При изучении экологических последствий эвтрофирования озер в комплекс работ, как правило, включают исследование фосфора в поверхностных донных отложениях с целью оценки их роли в круговороте фосфора

в озерной экосистеме на современном этапе [Жукова, 1990; Игнатьева, 1997; 2002; 2014; Кондратьев и др., 2016; Мартынова, 1984; 2010; Терехов и др., 2019; Boström et al., 1982 и др.]. Однако в программу палеоолимологических исследований фосфор включается нечасто [Сапелко и др., 2011; 2015; 2017а; Сапелко, 2018; Сигарева и др., 2019; Каранен, 2009]. Между тем анализ вертикального распределения содержания фосфора в колонке донных отложений дает косвенное представление об обеспеченности озерной экосистемы этим главнейшим биогенным элементом, определяющим биологическую продуктивность озера в историческом аспекте. Содержание фосфора общего (TP) и неорганического (IP) определялось по методу Мета в модификации М. В. Мартыновой и Н. А. Шмидеберг [Мартынова, Шмидеберг, 1983] путем ряда последовательных экстракций концентрированной HCl и 0,5 н NaOH и определения TP и IP в объединенных экстрактах молибдатным методом. Содержание органического фосфора (OP) рассчитано по разности между TP и IP. Анализ содержания металлов выполнялся методом эмиссионного спектрального анализа (ЭСА). Потери при прокаливании (ППП) определялись по разнице в массе золы, оставшейся после прокаливания проб абсолютно сухого осадка при температуре 500 °С в течение 6 часов. Значения PPP характеризуют соотношение органического и минерального вещества в осадках. Палинологический анализ является одним из важнейших методов, используемых при изучении биостратиграфии донных отложений, динамики природных условий и антропогенного воздействия прошлого. Помимо изменений растительного покрова на основании разработанных схем [Хотинский, 1977; Клейменова, 2000 и др.] можно устанавливать хронологические границы выделяемых палинозон и определять их относительный возраст. Обработка образцов на спорово-пыльцевой анализ выполнена по стандартной методике [Гричук, 1940; Berglund, Ralska-Jasiewiczowa, 1986]. Все спорово-пыльцевые диаграммы выполнены с помощью компьютерных программ TILIA2, TILIA GRAPH2 [Grimm, 1991] и TGView. Процентные для каждого таксона подсчитывались от общей суммы пыльцы древесных, трав и спор. В последнее время все чаще палинологи во всем мире используют различные непыльцевые палиноморфы в целях получения дополнительной информации к результатам спорово-пыльцевого анализа [Сапелко и др., 2018]. В представленных исследованиях дополнительно определялись в основном зеленые водоросли *Botryococcus braunii* и *Pediastrum*. Для адекватных палинологических реконструкций полученные по колонкам донных отложений палиноспектры сопоставлены со спорово-пыльцевым анализом поверхностных проб, отбираемых по всей площади озера [Sapelko et al., 2003]. Для изучения заболачивания побережья применялся ботанический анализ торфа. Заболачивание находится под влиянием колебаний уровня Ладожского оз., которые накладываются на циклы увлажненности климата. Анализ разрезов торфяников береговой зоны озера позволяет отнести этапы заболачивания к отдельным событиям голоцена, в частности, к трансгрессиям и регрессиям озера [Елина и др., 2000]. Определение растительных остатков в волокне торфа производилось под микроскопом с 80-кратным увеличением с использованием атласов-определителей [Домбровская и др., 1959; Кац и др., 1977]. Определение видов торфов проводилось по класси-

фикации С. Н. Тюремнова [Тюремнов, 1976]. Одной из важнейших индикаторных групп организмов, используемых для изучения эволюции и оценки экологического состояния озерных экосистем, являются диатомовые водоросли (*Bacillariophyta*). Изучение диатомовых комплексов из донных отложений позволяет реконструировать основные этапы развития озер, судить о скорости и направленности происходящих в них изменений, выявлять роль природных и антропогенных факторов в этих процессах [Smol, 2010]. Пробоподготовка выполнялась по стандартной методике с использованием 30% H_2O_2 для окисления органического вещества [Давыдова, 1985]. Для идентификации видов диатомей использовались определители [Krammer, Lange-Bertalot, 1991]. Соотношение «цисты:диатомей» рассчитывалось как отношение числа подсчитанных цист хризифитов к сумме цист и диатомей, выраженное в процентах [Smol, 1985]. Вычисление концентрации створок диатомей и цист хризифитов в сухом осадке, а также подразделение видов на доминантов (>10% от общей суммы диатомей в пробе), субдоминантов (5–10%), «обычных» (1–5%) и единичных (<1%) выполнено согласно [Давыдова, 1985]. Для статистических расчетов изменений концентрации металлов, форм фосфора и органического вещества в колонках донных отложений была разработана программа «Расчет статистически значимых изменений осадконакопления в индустриальный период».

3.2 Отражение климатических и антропогенных изменений позднеледниковья и голоцена в колонках донных отложений Ладожского озера

Новые результаты, полученные по комплексному анализу четырех колонок донных отложений Ладожского оз., позволили установить условия осадконакопления в разных точках озера на протяжении позднеледникового и голоценового периодов. Возраст отложений определялся с помощью радиоуглеродного и палинологического анализов. В итоге полученные результаты комплексных исследований позволили охарактеризовать выделенные и датированные периоды развития озера.

Позднеледниковый период. В этот период самая большая мощность позднеледниковых отложений накапливалась на севере Ладожского оз. Мощность отобранной на севере с глубины 30 м колонки донных отложений на ст. 304 (61°28'.98 с. ш.; 31°02'.6 в. д.) составила 67 см (рис. 3.1.1). Отложения здесь представлены темно-серыми алеврит-пелитовыми глинами (50–67 см) и бурыми алеврит-пелитовыми слабослоистыми глинами (1–50 см). Верхний 1 см представляет собой опесчаненный наилок. Содержание органического вещества в осадках составляет 2–2,5%, отмечен незначительный тренд к увеличению значений вверх по колонке. Значения такого порядка характерны для позднеледниковых глин, залегающих в глубоководных частях Ладожского оз. под голоценовыми пелитовыми илами [Квасов, 1990]. Результаты палинологического анализа (рис. 3.2.1) колонки показали позднеледниковый возраст всей изученной толщи отложений. Полученные результаты подтверждают данные о том, что позднеледниковые отложения в северной части Ладожского оз. залегают у поверхности дна

и не перекрываются сверху другими осадками [Субетто, 2009]. Все выделенные палинозоны характеризуют холодные сухие условия позднеледниковья. Низкая концентрация пыльцы в донных отложениях и отмечаемые на протяжении всей колонки переотложенные формы также свидетельствуют о неблагоприятных условиях. Ладога в это время представляла собой восточный залив крупного приледникового бассейна – Балтийского ледникового озера (БЛО) [История..., 1990; Björck, 2008]. Водосборный бассейн водоема значительно превышал современный [Субетто, 2009]. Водосбор покрывала перигляциальная растительность, представляющая собой тундрово-степные сообщества. Незначительное количество пыльцы древесных пород, которое периодически отмечается во всех пыльцевых зонах, очевидно, переносится на север с юга обширного водосбора, где в это время климат был теплее. Для разрезов южнотаежной зоны характерно распространение древесных пород, например, ели, в аллереде (так называемый нижний максимум ели). Оттуда, как по воде, так и по воздуху, пыльца древесных пород могла переноситься по всему водоему. А потому палинозоны 1 и 3, несмотря на наличие пыльцы древесных пород, можно отнести к холодным этапам позднеледниковья – позднему дриасу и среднему дриасу соответственно. Палинозона 2 немного отличается от других зон. Увеличение общей концентрации пыльцы, а также рост содержания и разнообразия пыльцы древесных пород свидетельствует об улучшении условий для развития растительного покрова и потеплении климата. Очевидно, что в этот период происходило увеличение заноса пыльцы древесных пород, которые в это время распространялись в южной части водосбора. В связи с этим палинозону 2 можно отнести к аллереде. Постепенно снизу вверх по разрезу происходят и изменения в травянистом покрове. Если в среднем дриасе и аллереде преобладали маревые, то в позднем дриасе – полыни. Отдельно от колонки в той же точке была отобрана поверхностная проба. Содержание пыльцы трав в ней незначительно. Другие ранее изученные поверхностные пробы северной части Ладожского оз. также показывают спектры с большим содержанием пыльцы древесных пород, основную роль в которых играет пыльца *Pinus* [Sapelko et al., 2003]. В связи с этим можно подтвердить полученные по изучению колонки 304 данные, что верхний образец колонки (верхние 5 см) не соответствует современным отложениям. Это еще раз подтверждает низкую скорость седиментации, а иногда и полное отсутствие осадконакопления в голоцене в изученном районе «открытой Ладоги». Ранее мощные слои позднеледниковых отложений с помощью спорово-пыльцевого анализа были изучены в основном для шхерных районов Ладоги [История..., 1990; Delusin, 1991]. Сравнивая полученные результаты, можно отметить в изученной толще низкую концентрацию пыльцы, более бедный осредненный состав пыльцы, полное отсутствие спор, более низкий процент содержания пыльцы древесных пород, чем для разрезов шхерной зоны.

В глинистых отложениях отмечено 36 видов пресноводных и 7 таксонов морских диатомей (споры *Chaetoceros* не определялись до вида) (рис. 3.2.2). В целом для всей исследованной толщи отложений, за исключением интервала 0–5 см, характерно крайне низкое содержание створок диатомей (не более 2–3 тыс. в 1 г сухого осадка). Видовое богатство в большей ча-

сти образцов, за исключением указанного интервала, также весьма низкое (10–15 таксонов и менее). Из пресноводных диатомей наиболее характерной является планктонная *Aulacoseira islandica*, доминирующая в составе диатомовых комплексов Ладожского оз., в течение позднего плейстоцена – голоцена [Давыдова, 1985], которая, однако, имеет крайне низкую численность в изученном разрезе. Встречаются также единичные створки других диатомей рода *Aulacoseira* (*A. ambigua*, *A. nivaloides*, *A. subarctica*).

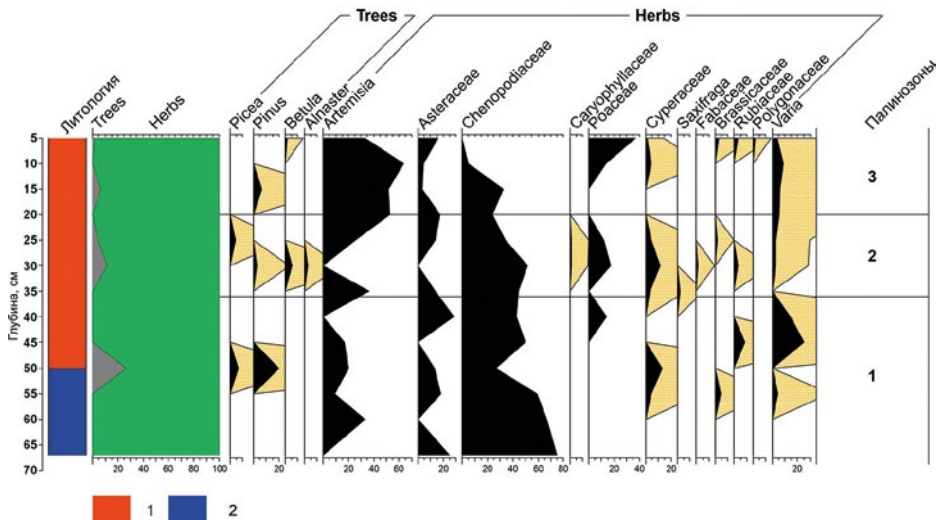


Рис. 3.2.1 – Спорово-пыльцевая диаграмма колонки донных отложений Ладожского оз. (ст. 304). Условные обозначения: 1 – бурые алеврит-пелитовые слабослоистые глины; 2 – темно-серые алеврит-пелитовые глины

В некоторых горизонтах отмечены также створки обрастателей родов *Fragilaria*, *Cymbella*, *Eunotia*, донных диатомей родов *Navicula* и *Pinnularia*. Во всей изученной толще обнаружены споры морских диатомей – планктонных *Chaetoceros* spp. и *Thalassiosira gravida*, единичные створки *Grammatophora oceanica*, *Paralia sulcata*, *Thalassionema nitzschioides*. Содержание цист хризифитов, за исключением верхней части колонки, не превышает 1 тыс. в 1 г сухого осадка. Такие особенности состава диатомовых комплексов свидетельствуют об их формировании в условиях БЛО, воды которого заполнили ладожскую котловину после отступления ледника невисской стадии [Subetto et al., 1998]. Небольшие концентрации створок диатомей и цист золотистых водорослей связаны с низкой продуктивностью БЛО в условиях дефицита биогенных элементов, характерного для ультрапресных талых ледниковых вод. Кроме того, большие объемы минеральных частиц, поступавших в водоем, приводили к высокому терригенному «разбавлению» численности створок диатомей в донных осадках. Крайне низкие значения концентрации створок диатомей отмечались в отложениях БЛО в других районах Ладожского оз. [Давыдова, 1985, Лудикова, 2017]. Присутствие створок морских диатомей также характерно для отложений БЛО и обусловлено их переотложением из активно размываемых морских осадков

Микулинского межледниковья, распространенных на территории Приладожья [Малаховский и др., 1989]. В верхней части колонки (0–5 см) отмечается резкое увеличение концентрации створок в осадке до 70 тыс. в 1 г сухого осадка. Кроме того, происходит значительное увеличение видового богатства (здесь встречено более 50 видов диатомей). При этом показательно, что большинство отмеченных здесь видов характеризуется довольно низкой численностью и представлено зачастую единичными створками. Несколько возрастает содержание *A. islandica*, однако еще более многочисленны другие представители рода *Aulacoseira*: *A. ambigua*, *A. nivaloides*, *A. valida*. Существенно увеличивается концентрация диатомей-обрастателей *Fragilaria brevistriata*, *F. construens* et vars., *F. exigua*, *F. lapponica*, *F. pinnata*. По-прежнему отмечаются споры морских *Chaetoceros* spp. Концентрация цист хризофитов возрастает до 3 тыс. Доминирование бентосных видов, при низкой численности массовых видов ладожского планктона (*A. islandica*, *Cyclotella radiosa*, *Stephanodiscus* spp. и др.), вероятно, является результатом регрессии БЛО и активизации сноса материала с прибрежных мелководий. Уменьшение объемов поступления в Ладожское оз. аллохтонного минерального материала и, как следствие, уменьшение терригенного разбавления способствовало увеличению концентраций створок диатомей и цист хризофитов в отложениях верхней части изученного разреза. Кроме того, резкий рост содержания мелкоклеточных представителей *Fragilariaceae* также является свидетельством изменения обстановок осадконакопления. Эти диатомеи известны своей способностью быстро адаптироваться к меняющимся условиям среды и потому, как правило, массово развиваются в водоемах, недавно освободившихся от ледника либо изолировавшихся от морских или приледниковых бассейнов [Shala et al., 2013].

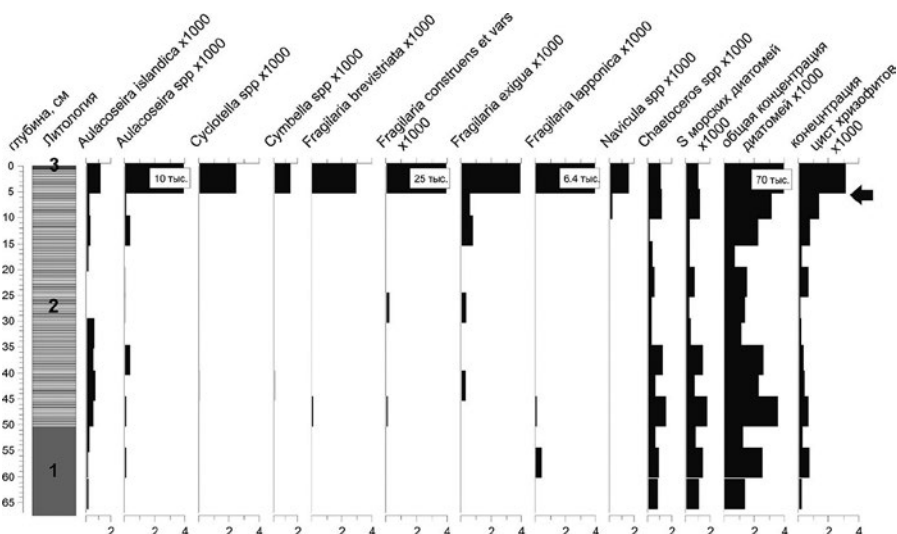


Рис. 3.2.2 – Концентрация основных таксонов диатомей, общая концентрация створок и цист хризофитов (тысяч в 1 г сухого осадка) в донных отложениях Ладожского оз. (ст. 304); литология: 1 – темно-серые алевроит-пелитовые глины, 2 – бурые алевроит-пелитовые неясно-слоистые глины, 3 – опесчаненный наилок; стрелка – регрессия БЛО



Отложения позднеледникового периода в меньшей степени изучены в центральной части Ладожского оз., здесь они перекрыты толщей голоценовых отложений. Позднеледниковые отложения колонки донных отложений, отобранной в центральной части Ладожского оз. на ст. 300 (60°40,3 с. ш.; 31°41,5 в. д.) с глубины 50 м (рис. 3.1.1), представлены серыми плотными глинами, вскрытая мощность которых составила 20 см. По результатам палинологического анализа охарактеризованы этапы осадконакопления в центральной части Ладожского оз. с позднеледникового и за весь период голоцена (рис. 3.2.3). Нижний слой серых глин достаточно хорошо насыщен пылью. Основная роль в формировании растительности принадлежала травам. Среди трав доминировала пыльца ксерофитов *Artemisia*, *Chenopodiaceae*. Велико видовое разнообразие травянистого покрова. Среди древесных пород доминирует пыльца берез. Преобладают кустарниковые и кустарничковые виды. Среди спор доминируют *Sphagnum* и *Polypodiaceae*. На водосборной площади озера развита в основном перигляциальная растительность. В более влажных понижениях рельефа отмечались березняки. Пыльца сосны (9%) очевидно в большинстве своем заносная. Описанный период относится к позднему дриасу. В позднем дриасе климат был сухой и холодный.

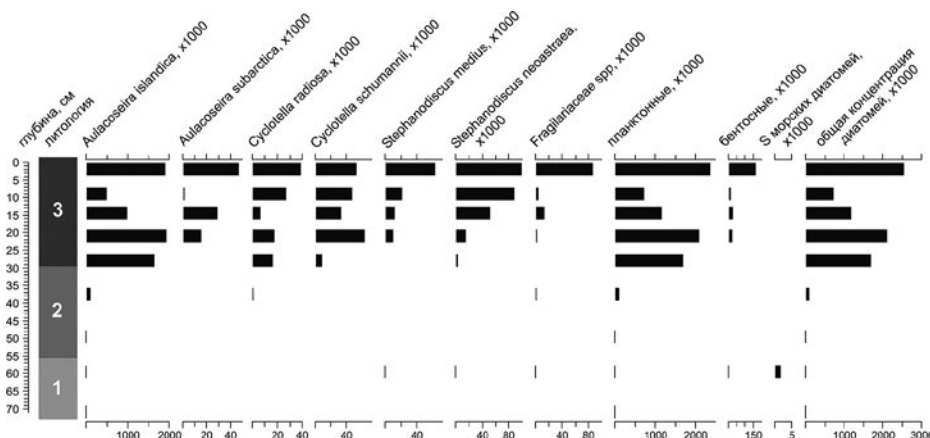


Рис. 3.2.4 – Концентрация основных таксонов диатомей и общая концентрация створок (тысяч в 1 г сухого осадка) в донных отложениях Ладожского оз. (ст. 300); литология: см. условные обозначения на рис. 3.2.3

Таблица 3.2.1

Радиоуглеродные (AMS) датировки колонки донных отложений Ладожского оз. (ст. 82)

Лабораторный номер	Глубина, см	Материал датирования	Радиоуглеродный возраст (лет назад)	Калиброванный возраст (кал. лет назад)
IGAN-6053	94–95	ТОС	7970±30	8993–8774
IGAN-6054	27–28	ТОС	2725±25	2864–2786
IGAN-6055	17–18	растительный детрит	1845±25	1863–1737
IGAN-6056	9–10	ТОС	1400±20	1338–1292
IGAN-6057	3–4	ТОС	1380±20	1320–1289

Для позднеледниковых отложений нижней части колонки характерно крайне низкое содержание створок диатомей (менее 7 тыс. в 1 г сухого осадка). В составе диатомовых комплексов встречаются редкие створки *Aulacoseira islandica*, единичные створки планктонных *Stephanodiscus medius* и *S. neoastraea* (рис. 3.2.4). Здесь же отмечено 8 таксонов морских диатомей – споры *Chaetoceros spp.*, отдельные створки *Grammatophora spp.*, *Thalassiosira gravida* и др. Низкие концентрации створок диатомей и смешанный состав диатомовых комплексов (присутствие экологически несовместимых групп диатомей), как уже было показано (ст. 304), характерны для отложений БЛО, что позволяет отнести данный осадочный горизонт ко времени позднеледниковья.

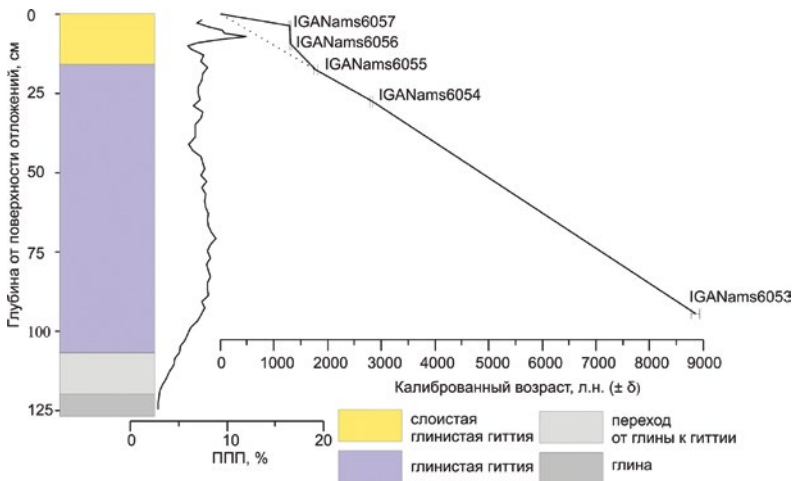


Рис. 3.2.5 – Литологическая колонка с динамикой содержания органического вещества (ППП) и возрастной моделью колонки донных отложений Ладожского оз. (ст. 82)

Позднеледниковые отложения залегают в основании еще одной колонки донных отложений (1,20–1,27 м), отобранной в центральной части озера на ст. 82 (60°59,110' с. ш.; 31°09,008' в. д.) с глубины 66 м (рис. 3.1.1). Стабильно низкое содержание органического вещества в глинистых отложениях, не превышающее 3% (рис. 3.2.5), характерное для позднеплейстоценовых ленточных глин, отмечалось также и в более глубоких частях Ладожского оз. под отложениями голоцена [Субетто, 2002]. Возраст осадков определен с помощью палинологического анализа. Отложения *палинозоны 1* (рис. 3.2.6) сформировались в холодном позднеледниковом климате с преобладанием перигляциальных ландшафтов. Содержание пыльцы древесных пород самое низкое в разрезе, а пыльцы трав – самое высокое. О сухом и прохладном климате свидетельствует значительное распространение *Betula nana*, *Artemisia*, *Chenopodiaceae*, *Roaceae*, *Cyperaceae*. Подобный климат характерен для периода позднего дриаса.

Низкое видовое разнообразие диатомовых водорослей (нижняя часть ДЗ-1) указывает на условия, благоприятствующие формированию монодоминантных диатомовых комплексов (рис. 3.2.9).

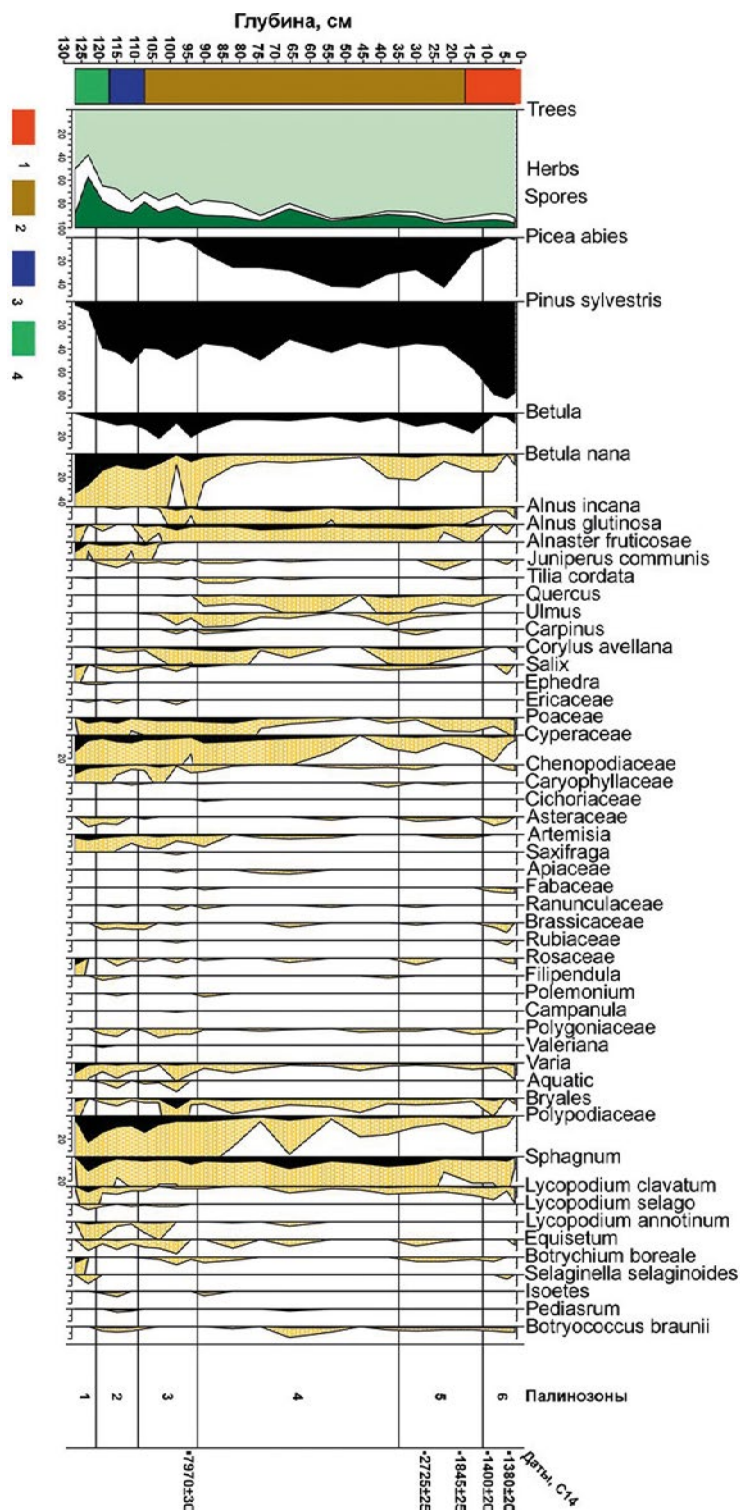


Рис. 3.2.6 – Спорово-пыльцевая диаграмма колонки донных отложений Ладожского оз. (ст. 82). Условные обозначения на рис. 3.2.6

Начало голоценового периода до 9000 кал. лет назад. Отложения раннего голоцена представлены в центре озера на ст. 82 и 300 (рис. 3.1.1). Материалом для датирования являлись общий органический углерод (ТОС) и растительный детрит [Sapelko et al., 2019]. Отложения представлены гиттиевым алевроитом с большим количеством прослоев гидротроилита и зеленоватыми прослоями (рис. 3.2.5).

В отложениях со ст. 82 потепление начала голоцена (*палинозона 2*) характеризуется увеличением древесных пород на водосборе Ладожского оз. в основном за счет сосны (рис. 3.2.6). Распространение открытых ландшафтов сокращается. Появляются водные и прибрежно-водные растения, появляются озерный полушник, зеленые водоросли *Botryococcus braunii* и *Pediastrum*. Это указывает на возможное понижение уровня озера и некоторое потепление холодноводного олиготрофного озера. Для гомогенных глин раннего голоцена также характерно низкое содержание органического вещества. Следующий этап (*палинозона 3*) связан с дальнейшим расширением площадей сосновых и березовых лесов за счет ольхи и небольшого содержания широколиственных пород деревьев (*Ulmus*, *Quercus*, *Tilia*, *Carpinus*), что указывает на потепление климата. Водные и прибрежные водные растения встречаются постоянно, исчезнув в конце периода. Зеленые водоросли также почти исчезают в конце периода (в бореальном периоде). Развитие водных и прибрежных водных растений указывает на более низкий уровень Ладожского оз. в этот период. В составе диатомовых комплексов монодоминантом является планктонная *A. islandica*. Отмечаемое здесь низкое видовое разнообразие диатомей характерно для отложений первой половины голоцена [Давыдова, 2002; Лудикова, 2018]. Низкие концентрации створок диатомей и цист хризифитов свидетельствуют о низкой продуктивности водорослевых сообществ. Более высокая доля диатомей бентоса (рис. 3.2.7) в отложениях начала раннего голоцена указывает на доступность мелководных местообитаний. В бореальный период наблюдается устойчивый рост в содержании органических веществ, свидетельствующий о повышении продуктивности водной экосистемы с постепенным улучшением климата. В этот период отмечены самые высокие концентрации Mg и Ca, а также повышенное по сравнению со следующим периодом содержание таких металлов, как никель, кобальт, медь и ванадий (рис. 3.2.8).

Гомогенные глины на ст. 300 (рис. 3.1.1) также начали накапливаться в благоприятных климатических условиях пребореального периода. Резко увеличивается содержание пыльцы древесных пород (рис. 3.2.3). Доминирует пыльца берез (35%). Пыльца сосны все так же составляет небольшой процент (6,4%) с большой вероятностью заноса. Увеличивается пыльца ольхи, ольховника. Уменьшается процент пыльцы трав, снижается и видовое разнообразие. Среди спор абсолютно доминирует *Polypodiaceae* (18%). Общее содержание спор также увеличивается. Происходит перестройка растительного покрова на водосборе. Широко развиваются березовые леса, широко представлены разнотравные луга. Климат меняется в сторону потепления. В это время Ладога становится самостоятельным водоемом.

Начало формирования горизонта слоистых зеленовато-серых илов (ст. 300) соответствует периоду увеличения влажности. Резко увеличивается

как концентрация пыльцы, так и процентное содержание древесных пород. Доминирует пыльца сосны и достигает 39%. Впервые появляется пыльца ели. Содержание пыльцы трав невелико, преобладает пыльца *Superaceae*. Среди спор все так же преобладает *Polypodiaceae* и достигает здесь своего максимума по разрезу (26,7%), снижаясь к концу периода. При этом возрастает процент *Sphagnum*. Впервые отмечены водоросли *Pediastrum boryanum*. Слой можно отнести к бореальному периоду. В бореальное время Ладожская котловина сообщается с Анциловым озером Балтики. Именно в это время в водоеме начинают отлагаться иловые осадки. На берегах с началом бореального периода связано развитие болот. В конце бореального периода болота зарастают и перекрываются песками анциловой трансгрессии. Получают широкое распространение хвойные леса. Для этого периода характерно максимальное развитие сосновых лесов. В начале бореального периода температура была ниже современной. Изменяется характер осадко-накопления. В связи с потеплением климата в озере активизируются биотические процессы, в илах наблюдается более высокое содержание органического вещества по сравнению с подстилающими их глинами.

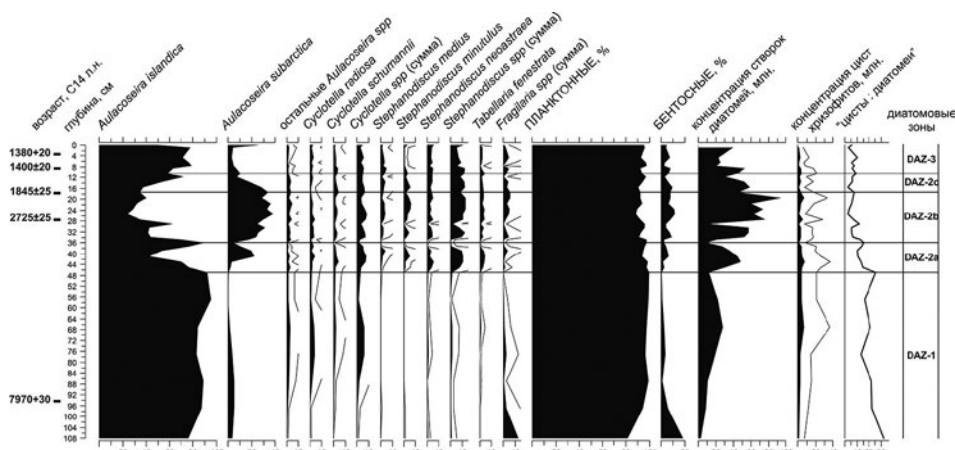


Рис. 3.2.7 – Относительное содержание основных таксонов диатомей и экологических групп в донных осадках колонки донных отложений (ст. 82), концентрации створок диатомей и цист хризифитов (мгн, в 1 г сухого осадка), соотношение «цисты: диатомей» (%), возраст (C^{14} л. н.), диатомовые зоны

Видовое богатство диатомей (ст. 300), а также концентрация створок по-прежнему остаются низкими (рис. 3.2.4). Морские диатомеи исчезают из состава диатомовых комплексов, что косвенно указывает на прекращение или уменьшение интенсивности размыва морских осадков вследствие сокращения площади Ладожского оз. после регрессии БЛО. *A. islandica*, представленная единичными экземплярами, является единственным видом, определяемым в отложениях данного горизонта. Это может свидетельствовать о по-прежнему достаточно суровых климатических условиях раннего голоцена и, как следствие, низкой продуктивности озерной экосистемы. Вероятно, условия среды в Ладожском оз. в этот период были наиболее

благоприятными для развития планктонной *A. islandica*, но менее способствовали развитию сопутствующих видов [Ludikova, 2020]. Дальнейшее возрастание концентрации створок диатомей и обогащение видового состава диатомовых комплексов, отмечаемые во второй половине выделенного периода, указывают на постепенное увеличение продуктивности экосистемы в результате потепления климата.

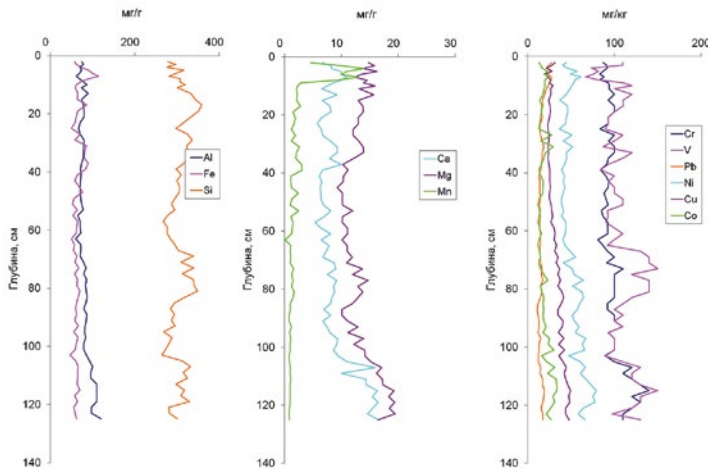


Рис. 3.2.8 – Динамика содержания металлов в колонке донных отложений Ладожского оз. (ст. 82)

9000–4700 кал. лет назад. В этот период на ст. 82 накапливается мощная толща глинистой гиттии (рис. 3.2.6). Дальнейшее потепление климата (палинозона 4) способствовало развитию смешанных хвойно-широколиственных лесов в пределах водосборного бассейна Ладожского оз. (рис. 3.2.8). Преобладают хвойные леса с елью, сосной и с включением широколиственных пород. Постоянно присутствуют *Alnus incana* и *Alnus glutinosa*. Среди широколиственных пород преобладают *Ulmus* и *Quercus*. Снижается распространение открытых ландшафтов. В травянистом покрове преобладают осоковые. Водные и прибрежные водные растения исчезают, но снова появляются зеленые водоросли, представленные *Botryococcus braunii* и *Pediastrum*. Подобные комфортные условия для развития растительности можно отнести к атлантическому периоду. Полученные результаты хорошо коррелируют с имеющимися палинологическими данными, также подтвержденными радиоуглеродными датировками около 7000–8000 кал. лет назад, полученными для северо-восточной части Ладожского оз. [Арсланов и др., 1996], Валаамского архипелага [Давыдова, Хомутова, 1998] и о. Коневец [Savelieva et al., 2019]. По геохимическим данным, около 7100–6200 кал. лет назад условия среды становятся более щелочными. Вторая половина периода характеризуется постепенным снижением содержания тяжелых металлов. В составе диатомовых комплексов доминируют диатомей планктона, представленные главным образом *A. islandica*. Рост концентраций створок диатомей и цист хризифитов указывает на повышение продук-

тивности экосистемы, происходившее в атлантический период [Давыдова, 2002]. Более высокие значения соотношения «цисты: диатомеи» могут свидетельствовать об установлении условий, в которых золотистые водоросли более успешно конкурировали с диатомовыми за основные биогенные элементы, например, растворенный кремнезем [Zeeb, Smol, 2001]. Относительно высокое содержание органического вещества (средние значения ППП около 8%) также указывает на более высокую продуктивность под воздействием более теплого климата. Повышенное содержание органического вещества в донных отложениях обычно характерно для атлантического периода [Давыдова, 2002]. По палинологическим и радиоуглеродным данным, средняя скорость осадконакопления в Ладожском оз. за этот период составляла около 0,1 мм/год. В это время на ст. 300 происходило накопление слоистых илов в условиях продолжающегося потепления климата атлантического периода. Начало периода очевидно связано с понижением уровня озера. Резкое сокращение концентрации пыльцы может быть косвенным свидетельством этого (рис. 3.2.12). Преобладает пыльца древесных пород, среди которых доминирует *Pinus* (40%). Среди спор отмечается значительное количество *Sphagnum* (30%). В атлантическом периоде Ладога существует как самостоятельный водоем с порогом стока в районе Вещево [Субетто, 2009]. Южная часть современной Ладоги представляла собой сушу. Очевидно, с помощью анализа изученной колонки донных отложений удалось зафиксировать начало этого этапа развития озера. Далее концентрация резко увеличивается. Доминирует пыльца сосны, увеличивается содержание пыльцы ели. В небольших количествах появляется пыльца пихты. Появляется пыльца широколиственных пород (*Ulmus*, *Quercus*, *Carpinus*). Среди трав доминирует пыльца *Cyperaceae*. Среди спор все так же доминирует *Sphagnum*. В растительности водосбора господствуют смешанные леса из сосны, ольхи, березы, ели и широколиственных пород. Характер растительности соответствует оптимуму голоцена. Среднегодовые температуры были выше современных, осадки близки к современным. В атлантический период рост органического вещества в илах достигает максимума. Далее при доминировании пыльцы сосны достигает своего максимума пыльца ели (19,5%). Продолжает отмечаться пыльца пихты и широколиственных пород. Среди спор при доминировании *Sphagnum* увеличивается количество и видовое разнообразие *Lycopodium*. Дальнейшее увеличение концентраций створок диатомей (рис. 3.2.4) и обогащение видового состава диатомовых комплексов указывает на продолжающееся увеличение общей продуктивности экосистемы по мере потепления климата.

4700–2800 кал. лет назад. По данным колонки донных отложений, отобранной на ст. 82, дальнейшие изменения климата связаны с похолоданием, что повлияло на сокращение численности термофильных видов на водосборе озера (рис. 3.2.6) и расширение ельников с небольшой примесью широколиственных пород, что характерно для суббореального периода (палинозона 5). Распространение хвойных лесов на водосборе Ладожского оз. достигло максимального развития за весь изученный период. Среди древесных пород преобладают сосна и ель. В этот период максимальные площади распространения в течение голоцена получили еловые леса. Зеленые

водоросли *Botryococcus braunii* присутствуют постоянно. Единственные доступные до сих пор радиоуглеродные данные за этот период 2365–2717 кал. лет назад были получены из колонки донных отложений у о. Коневец [Savelieva et al., 2019] и из описанной здесь колонки (ст. 82). Основные установленные виды растительности для этого периода коррелируются с данными для колонки у о. Коневец. В соответствии с новыми данными толща донных отложений (*палинозона* 5) начала формироваться около 4700 кал. лет назад. В этот период климат становится холоднее. Накопление органического вещества снижается (диапазон значений ППП 6,1–8,0%). Это можно объяснить подъемом уровня Ладоги в период ладожской трансгрессии в период 5700–3300 кал. лет назад, ставшей результатом сложного взаимодействия неравномерного гляциоизостатического поднятия, гидрологических и климатических изменений [Saarnisto, 1970; Субетто, 2009; Сапелко и др., 2018a]. Это время максимального подъема уровня озера и увеличения площади его акватории за счет затопляемых низменных прибрежных территорий. Увеличение видового богатства диатомовых водорослей и концентрации диатомей (ДЗ-2) ранее отмечалось и в других разрезах донных отложений в суббореальное время, что могло стать результатом поступления биогенных элементов в результате затопления прибрежных низменностей в ходе ладожской трансгрессии. В рассматриваемом разрезе концентрация диатомовых водорослей (рис. 3.2.7) быстро увеличивается после 4700 кал. лет назад и соответствует первому «пику» содержания *Aulacoseira subarctica* (ДЗ-2a). Высокое содержание *A. subarctica* в суббореальных отложениях ранее связывали с похолоданием климата [Давыдова, 2002; Лудикова, 2018]. Однако результаты недавно выполненных изотопных исследований предполагают увеличение численности *A. subarctica* в связи с завершением ладожской трансгрессии, датируемым около 4400 кал. лет назад [Kostrova et al., 2019]. Наши результаты показывают, что флуктуации численности доминирующих видов – *A. islandica* и *A. subarctica*, а также концентрации створок диатомовых водорослей могут свидетельствовать об изменениях как трофического статуса озера, так и его уровня. Тот факт, что *A. subarctica* сохраняет численность содоминанта, а концентрации створок остаются максимальными до 1800 кал. лет назад, указывает на довольно стабильное состояние экосистемы. Средняя скорость седиментации в Ладожском оз. для этого периода оценивается в 0,12–0,16 мм/год. В это время на ст. 300 продолжают формироваться иловые отложения. В период накопления темно-коричневых пелитовых илов снижается распространение еловых лесов (рис. 3.2.3). Распространение еловых формаций характерно для суббореального периода. В составе растительности практически исчезают широколиственные породы. Получают широкое распространение сосновые леса. В составе диатомовых комплексов отмечается увеличение доли *A. subarctica*, отмечавшееся также в суббореальных отложениях ст. 82 (рис. 3.2.4). Увеличение видового богатства и резкий рост концентрации створок свидетельствует о дальнейшем росте продуктивности озерной экосистемы. Максимальные значения содержания диатомей отмечались в других разрезах Ладожского оз. в отложениях суббореального – первой половины субатлантического времени [Лудикова 2018, Kostrova et al., 2019], в том числе в отложениях ст. 82 [Sapelko

et al., 2019]. После отступления вод Ладожской трансгрессии на берегах возникает множество мелких зарастающих озер и болот с зарослями березняков и ольшаников. Субатлантический период – время заселения бассейна озера и его побережий. Однако влияние антропогенных факторов в изученных колонках (ст. 82 и 300) отражено слабо в связи с расположением станций исследования в центральной части озера.

2800–1000 кал. лет назад. На ст. 82 накопление слоистого гиттиевое алеврита (рис. 3.2.5) в верхней части – с включением рудных корок. Дальнейшее похолодание климата (*палинозона б*) привело к исчезновению широколиственных пород (рис. 3.2.6), сокращению ели в составе лесов и максимальному распространению сосновых боров. Около 1860–1740 кал. лет назад распространение древесных пород немного снижается из-за небольшого увеличения открытых ландшафтов с включением рудеральной растительности, что является возможным индикатором антропогенного воздействия. Среди злаков преобладает пыльца Poaceae. Водоросли *Botryococcus braunii* присутствуют постоянно. Палинозона датируется субатлантическим периодом. Монодоминантные диатомовые комплексы с преобладанием *A. islandica*, характерные для данного этапа, наряду с уменьшением концентрации диатомовых водорослей, указывают на снижение трофности и продуктивности экосистемы Ладожского оз. Радиоуглеродный возраст (табл. 3.2.1), полученный для ее верхней части (1307–1290 кал. лет назад), указывает на очень низкую скорость осадконакопления в центральной части Ладожского оз. в это время. Отмечается резкое увеличение содержания органических веществ до максимальных значений и наибольшая динамика содержания органического вещества для всего разреза (6–12%). Пик содержания органического вещества отмечается в богатом железом горизонте на глубине 0,06–0,07 м. Соотношение содержания марганца и железа в отложениях позволяет оценить изменение окислительно-восстановительных условий. Около 1700 кал. лет назад резкое увеличение отношения Mn/Fe происходит при переходе от гиттии с прослоями гидротроилита до гиттии с рудными корками. Эта стадия соответствует резкой смене окислительно-восстановительных условий с высокими значениями Eh. Осаждение железа и марганца в виде прослоек, обогащенных гидроксидами Fe и Mn, характерно для озера с низкой скоростью седиментации, постоянным присутствием кислорода в водной массе и, как следствие, присутствием кислорода в поверхностном слое осадка, так как основные количества Fe и Mn накапливаются на границе окислительно-восстановительного барьера в осадке [Белкина и др., 2015]. Средняя скорость осадконакопления на этом этапе составила 0,03–0,16 мм/год.

Отложения субатлантического периода выделены и на ст. 300 (рис. 3.2.3). В это время здесь продолжали формироваться слоистые темно-коричневые илы (зона окисления; прослой черного цвета насыщены окислами железа и марганца). Снижается распространение еловых лесов. Исчезает пыльца широколиственных пород. Преобладают сосновые леса. В составе диатомовых комплексов *A. islandica* сохраняет доминирующее значение, однако отмечается некоторое снижение ее численности за счет роста содержания представителей родов *Cyclotella* и *Stephanodiscus*. Отмечаемое снижение

и последующий рост концентраций створок диатомей в верхней части колонки донных отложений (рис. 3.2.4) характерны также для отложений субатлантического времени ст. 82.

Самый мощный горизонт субатлантических отложений выделен на ст. 55 (60°46,94 с. ш.; 31°32,17 в. д.). Колонка донных отложений (ст. 55) отобрана с глубины 72 м в центральной части озера (рис. 3.1.1). Мощность отложений 47 см. Донные отложения представлены (снизу вверх): 4–47 см – зеленовато-серые алеврит-пелитовые илы с черными прослоями аутигенного гидротроилита; 0–4 см бурый наилок (зона окисления). Аутигенный гидротроилит ($\text{FeS} \cdot n\text{H}_2\text{O}$) обычно формируется при восстановительных условиях диагенеза [Субетто, 2009]. Каждый сантиметр колонки изучен с помощью спорово-пыльцевого анализа (рис. 3.2.9); на содержание органического вещества в осадках (рис. 3.2.10); металлов Fe, Mn, Cu, Ni, Pb, Zn, Cr, Co, V (рис. 3.2.11); а также общего, неорганического и органического фосфора (рис. 3.2.12). Датирование выполнено по результатам палинологического анализа. Для выявления антропогенного характера накопления различных элементов в донных отложениях проведена проверка статистически значимых различий в накоплении металлов, фосфора и органического вещества.

Донные отложения, соответствующие *палинозоне 1* (рис. 3.2.9), сформированы в наиболее благоприятных климатических условиях. Климат в это время был относительно теплым и влажным, что способствовало произрастанию большой примеси широколиственных пород на водосборе Ладожского оз. Распространение еловых лесов не столь значительно, как в суббореальном периоде [Delusin, 1991; Клейменова и др., 2000]. Эту зону можно отнести к раннесубатлантическому времени (**SA-1: 2300–1700 лет назад**). Среднегодовые температуры были, вероятно, чуть выше современных, осадки близки к современным. Растительность водосборных площадей представляет собой хвойные леса из сосны, ели, ольхи с примесью широколиственных пород (дуб, вяз, липа, граб, ясень, лещина). Отмечено распространение водных и прибрежно-водных растений, что косвенно указывает на процессы зарастания береговой зоны. Этому времени соответствуют пики содержания фосфора, а содержание органического вещества в донных отложениях достигает 8,42% (рис. 3.2.2). Началу этого периода предшествует образование р. Невы. Трансгрессивная фаза Ладожского оз. сменяется регрессией, уровень озера снижается. На побережье развиваются заболоченные участки. Повышается продуктивность открытых районов Ладоги. Скорость осадконакопления в это время составляет около 0,27 мм/год. Следующая выделенная *палинозона 2* соответствует среднесубатлантическому времени (**SA-2: 1700–1000 лет назад**). В это время на водосборе озера вновь восстанавливаются еловые леса и достигают своего максимального распространения для всего субатлантического периода. Происходит некоторое похолодание климата. В это время по многочисленным палинологическим данным похолодание отмечается по всему Северо-Западному региону России, где среднегодовые температуры понизились и были примерно на 1,5–2 °С ниже современных [Клейменова, 2000]. Из состава растительного покрова исчезают водные и прибрежно-водные растения. Данные ППП и содержания фосфора подтверждают снижение продуктивности

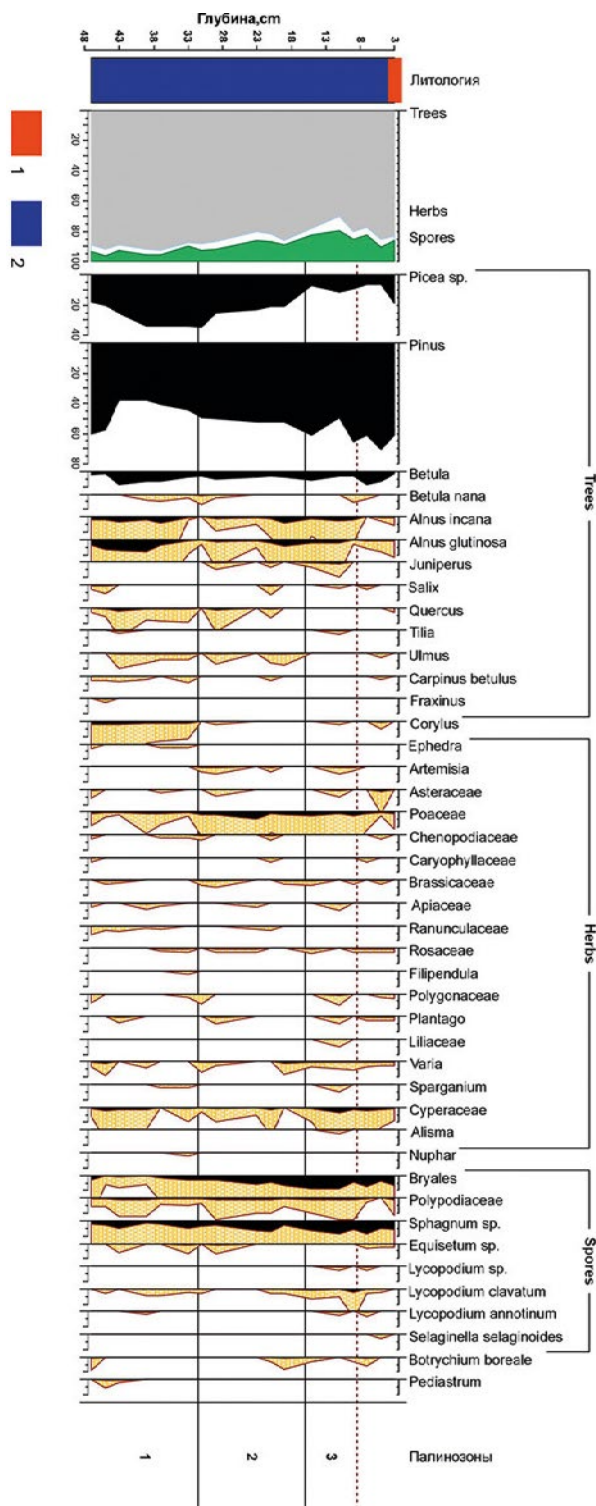


Рис. 3.2.9 – Спорово-пыльцевая диаграмма колонки донных отложений (ст. 55). Пунктирной линией обозначена граница индустриального периода. Условные обозначения: 1 – бурый наилок; 2 – зеленовато-серый алевит-пелитовый ил с черными прослоями гидрогелита

водоема. Скорость осадконакопления снижается до 0,21 мм/год. Последняя *палинозона 3* соответствует позднесубатлантическому времени (**SA-3: 1000 лет назад – до настоящего времени**). Зона четко выделяется по сокращению распространения еловых лесов и практически исчезновению из состава лесов широколиственных пород. Обнаруженные единичные зерна широколиственных пород (липа, вяз, дуб, граб), вероятно, связаны с лесопосадками. Для этого времени характерны культурные посадки на водосборе. Естественными являются сосновые леса. Скорость осадконакопления в озере вновь снижается и составляет примерно 0,16 мм/год. Резкое увеличение значений ППП, содержания фосфора, металлов, эпифитов совпадает с широким распространением березово-сосновых и сосновых лесов. Вновь после исчезновения в начале зоны появляются широколиственные породы, сокращается количество трав. Максимальное распространение трав на водосборе Ладожского оз. в начале зоны и изменение в составе древесных пород связано с началом активного антропогенного воздействия – началом техногенного периода в истории озера, что подтверждается полученными нами результатами геохимического анализа.

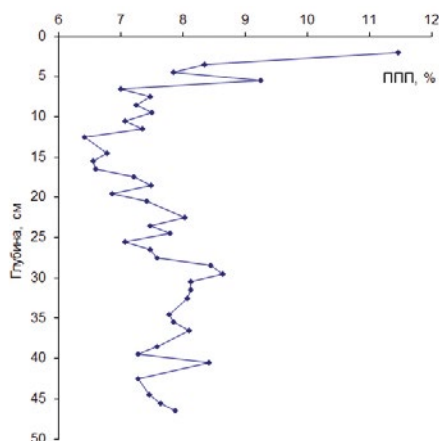


Рис. 3.2.10 – Динамика содержания органического вещества по ППП в колонке донных отложений (ст. 55)

В динамике содержания металлов в основном не наблюдается значимых трендов (табл. 3.2.2–3.2.4). Средние и медианные значения в колонке донных отложений составляют для железа – 8400 и 7700 мг/кг (диапазон – 5800–15000 мг/кг); для марганца – 2480 и 1700 мг/кг (диапазон – 1000–8800 мг/кг) (рис. 3.2.11); для меди – 32 и 31 мг/кг (диапазон – 26–48 мг/кг); для никеля – 42 и 43 мг/кг (диапазон – 32–53 мг/кг); для свинца – 22 и 19 мг/кг (диапазон – 13–76 мг/кг); для хрома – 82 и 84 мг/кг (диапазон – 62–100 мг/кг); для кобальта – 16 мг/кг (диапазон – 10–20 мг/кг); для ванадия – 90 и 89 мг/кг (диапазон – 70–120 мг/кг) соответственно (рис. 3.2.11).

Рассчитанные парные коэффициенты корреляции по всей колонке показывают, что содержание никеля, хрома, кобальта, ванадия изменяется синхронно с высокими коэффициентами корреляции (от 0,75 до 0,86).

Тесно связаны концентрации марганца и свинца (коэффициент корреляции 0,80). Для сопоставления результатов по колонке отдельно содержание металлов определялось в поверхностной пробе донных отложений (ст. 55): Fe – 12 мг/кг, Mn – 8,8 мг/кг, Ni – 37 мг/кг, Cr – 80 мг/кг, V – 70 мг/кг, Cu – 44 мг/кг, Pb – 76 мг/кг, Co – 18 мг/кг. Содержание органического вещества в колонке (рис. 3.2.10) резко возрастает в верхних 10 см с ростом содержания органического вещества от 7 до 11%. В нижних 40 см разреза содержание органического вещества не превышает 7,5% (диапазон 6,5–8,5%).

Таблица 3.2.2

Средние, медианные, максимальные и минимальные значения ППП и содержания некоторых химических элементов для палинозоны 1

	ППП (%)	Mn, мг/кг	Cr, мг/кг	V, мг/кг	Pb, мг/кг	Ni, мг/кг	Cu, мг/кг	Co, мг/кг	Fe, мг/кг
среднее	7,8	2092	76	88	15,2	41,2	31	15,2	7442
медиана	7,8	1700	74	88	15,5	42,5	30	15,5	7300
максимум	8,4	5800	90	100	18	53	35	20	12000
минимум	7,3	1000	67	76	13	32	28	10	5800

Таблица 3.2.3

Средние, медианные, максимальные и минимальные значения ППП и содержания некоторых химических элементов для палинозоны 2

	ППП (%)	Mn, мг/кг	Cr, мг/кг	V, мг/кг	Pb, мг/кг	Ni, мг/кг	Cu, мг/кг	Co, мг/кг	Fe, мг/кг
среднее	7,6	2129	81,3	91,8	19,4	42,0	29,9	15,9	8079
медиана	7,5	1450	84	90,5	18,5	42,5	30	16	7650
максимум	8,7	5500	94	120	23	48	35	18	12000
минимум	6,6	1000	62	73	16	33	26	12	5800

Таблица 3.2.4

Средние, медианные, максимальные и минимальные значения ППП и содержания некоторых химических элементов для палинозоны 3

	ППП (%)	Mn, мг/кг	Cr, мг/кг	V, мг/кг	Pb, мг/кг	Ni, мг/кг	Cu, мг/кг	Co, мг/кг	Fe, мг/кг
среднее	7,7	3223	88,2	91,3	30,0	43,6	34,3	16,0	9654
медиана	7,4	2400	89	93	22	43	33	16	10000
максимум	11,5	8800	100	110	76	48	48	19	15000
минимум	6,4	1100	80	70	19	37	28	14	6900

Общее содержание фосфора в колонке (рис. 3.2.12) составляет от 0,73 до 13,2 мг·Р/г в. с. н. (здесь и далее расчет сделан на воздушно-сухую навеску), т. е. превышает Кларк в осадочных породах (0,7 мг·Р/г), что согласуется с результатами более ранних исследований фосфора в донных отложениях Ладоги, относящихся в основном к самым верхним слоям осадка – не глубже 15 см [Белкина и др., 2006; Игнатьева, 1992; 1997; 2002; Семенович, 1966]. Наибольшие значения ТР (выше 3,38 мг/г) зафиксированы в слоях отложений, залегающих на глубинах 5–6, 21–23, 28–30, 38–39 и 40–42 см. Данные слои осадка представляют собой железомарганцевые рудные про-

слойки, являющиеся результатом аутигенного минералообразования. Это обогащенные железом и марганцем уплотненные слои отложений, наличие которых характерно для центральной части Ладожского оз. Расположение первого максимума на глубине 5–6 см обусловлено положением геохимического барьера на Red-Ox-границе в поверхностном слое осадка. Глубже расположенные прослойки представляют собой захороненные окисленные слои осадка, чередующиеся с зеленовато-серыми восстановленными илами. Как известно, трехвалентное железо, главным образом, в форме гидроокисла, удерживает фосфаты в осадке. Рудные прослойки замедляют вертикальную миграцию соединений фосфора в осадке и способствуют его накоплению как в самих рудных прослойках, так и в слоях, расположенных под ними [Белкина и др., 2006; Игнатьева, 1997; Manning, Lum, 1983]. На вертикальных профилях TP, Fe и Mn в осадке (рис. 3.2.13) визуальнo отмечается синхронность изменения содержания этих элементов. Взаимосвязь между ними подтверждается статистически – коэффициенты корреляции (r) между TP и Fe и между TP и Mn составляют, соответственно, 0,76 и 0,71, при этом r между Fe и Mn равен 0,86. Наименьшее содержание TP (менее 1 мг/г) отмечено в слоях осадка, залегающих на глубинах 12–13, 15–21, 26–27, 31–32, 34–36 и 39–40 см. Среднее содержание TP в 47-см колонке донных отложений составляет 2,25 мг·P/г (без учета рудных прослоек – 1,38 мг·P/г). Содержание неорганического фосфора изменяется от 0,53 до 12,24 мг·P/г (рис. 3.2.4), что составляет от 66 до 94% от TP (в среднем 78%).

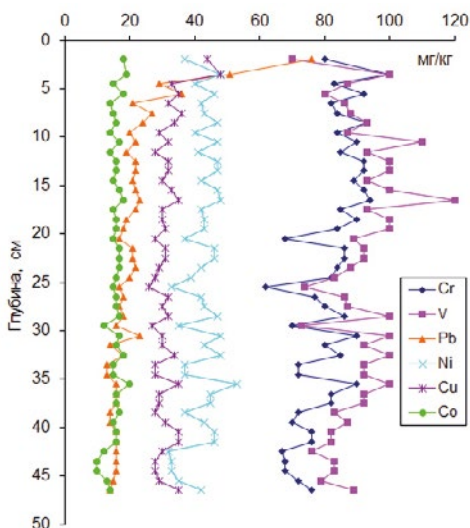


Рис. 3.2.11 – Содержание хрома, ванадия, свинца, никеля, меди и кобальта в колонке донных отложений (ст. 55)

Наибольшая доля IP относится к слоям с наибольшим общим содержанием фосфора, т. е. железомарганцевым прослойкам, что является вполне закономерным. Содержание органического фосфора варьирует в более узком интервале значений от 0,07 до 0,98 мг·P/г, достигая не более 34% от общего

содержания фосфора. Среднее содержание ОР в колонке осадка составляет $0,38 \text{ мг} \cdot \text{P} / \text{г}$. Единой закономерности изменения содержания органического фосфора во всей исследованной колонке осадка не выявлено, что обусловлено изменчивостью условий осадконакопления. Локальные максимумы содержания органического вещества (по значениям ППП) (рис. 3.2.2), расположены в основном на тех же горизонтах в колонке донных отложений, что и максимумы фосфора (рис. 3.2.10), однако связь между этими характеристиками не столь тесная, как у фосфора с Fe и Mn, – коэффициент корреляции между TP и ППП составляет лишь 0,50. Таким образом, в большей степени диагенетической трансформации в толще осадка подвержена неорганическая фракция фосфора. В результате по этапам накопления фосфора в колонке донных отложений (рис. 3.2.12) можно условно выделить 3 зоны: I – 36–47 см, II – 21–36 см и III – 0–21 см. Границы этих зон не совпадает с границами палинозон, выделенных на основе спорово-пыльцевого анализа (разница составляет около 5 см), т.е. природные изменения, происходившие на водосборе Ладоги и в самом озере, значительно раньше отражались на условиях осадконакопления фосфора в донных отложениях Ладоги, чем на растительных сообществах.

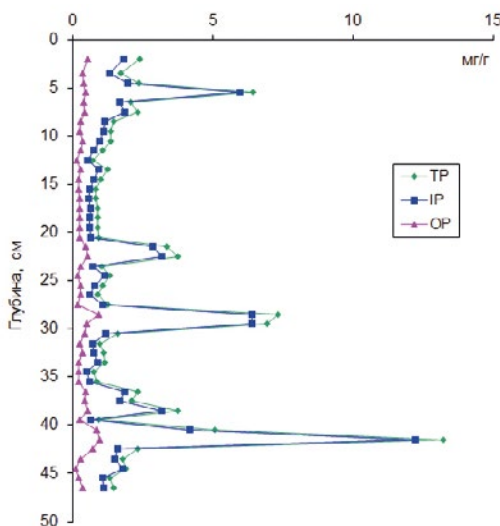


Рис. 3.2.12 – Вертикальное распределение содержания форм фосфора в донных отложениях Ладожского оз. (ст. 55) (TP – общий фосфор, IP – неорганический фосфор, ОР – органический фосфор)

В пределах I зоны (36–47 см) отмечены максимальные содержания всех форм фосфора, причем протекание природных процессов, влияющих на накопление фосфора в осадке, было очень нестабильным. Локальные максимумы отмечены на горизонтах 41,5 и 38,5 см. По данным Н. Н. Давыдовой и Т. В. Сапелко [Давыдова, 1985; Сапелко и др., 2011], климат в это время был относительно теплым и влажным, уровень озера понизился, на побережье развивались заболоченные участки, повысилась продуктивность открытых районов озера. Очевидно, все эти факторы способствовали высокому

уровню внешнего поступления фосфора в озеро и, как следствие, накоплению его в донных отложениях. Накопление фосфора в донных отложениях в пределах *II* зоны (21–36 см) происходило в условиях некоторого похолодания климата, повышения уровня озера и снижения его биопродуктивности [Сапелко и др., 2011], при этом условия осадконакопления оставались нестационарными, о чем свидетельствует множество экстремумов на вертикальных профилях содержания форм фосфора. Наиболее существенные локальные максимумы относятся к слоям 20–23 и 28–30 см. В целом уровень накопления фосфора в донных отложениях в пределах этой зоны снизился по сравнению с зоной *I*. В период накопления верхнего 21-сантиметрового слоя осадка (*зона III*) не происходило резких изменений в протекании природных процессов, влияющих на накопление фосфора, о чем свидетельствует отсутствие существенных экстремумов содержания его форм, за исключением локального максимума в слое 5–6 см, являющегося результатом аутигенного минералообразования на границе Red-Ox зон, о чем было сказано выше. При этом наличие локальных экстремумов на кривой вертикального распределения органического вещества (рис. 3.2.13) в целом говорит о нестабильности условий осадконакопления.

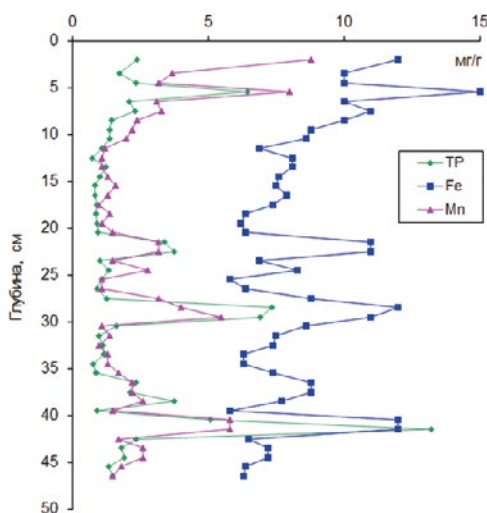


Рис. 3.2.13 – Вертикальное распределение содержания общего фосфора (TP), железа и марганца в донных отложениях Ладожского оз. (ст. 55)

Условно зону *III* можно разделить на 2 подзоны: 8–21 и 0–8 см. Глубже 8 см в зоне *III* концентрационный профиль фосфора фактически представляет собой экспоненциально убывающую кривую. В слое 0–8 см содержание фосфора заметно возрастает, в основном, за счет неорганической формы. При этом если исключить из рассмотрения слой 5–6 см (рудную прослойку), то содержание всех форм фосфора в пределах этой подзоны остается практически постоянным: TP – 2,89, IP – 2,45, OP – 0,44 мг·P/г. Среднее содержание OP в верхнем слое 0–8 см составляет 0,44 мг·P/г, тогда как в подслое 8–21 см – 0,26 мг/г, т. е. отмечено уменьшение содержания органического

фосфора по глубине, связанное с деструкцией и минерализацией фосфорсодержащего органического вещества. При этом доля органического фосфора с глубиной возрастает. Так, ОР составляет в верхнем слое до 8 см 18% ТР, а в подслое 8–21 см – 25% ТР. Очевидно, это связано с изменением качественных характеристик фосфорсодержащего органического вещества в результате антропогенного воздействия на водосбор и экосистему Ладожского оз. При средней скорости осадконакопления 0,16 мм/год в слое 0–16 см накопление верхнего 8-сантиметрового слоя донных отложений произошло в течение примерно 500 лет.

Таблица 3.2.5

Результаты проверки статистически значимых различий в накоплении химических элементов в центральной части озера на основе колонки отложений ст. 55.

№ п/п	Химический элемент/показатель	Размер выборки		Нормированное значение статистического критерия Манна – Уитни	Принятая статистическая гипотеза
		индустриального периода, шт.	доиндустриального периода, шт.		
1	V	8	31	0,52	H_0
2	ППП			1,29	
3	Ni			1,81	
4	ОР			2,19	
5	ТР			2,37	H_1
6	Cr			2,40	
7	IP			2,58	
8	Co			3,41	
9	Mn			4,14	
10	Fe			4,14	
11	Cu			4,98	
12	Pb			5,25	

По результатам комплексного анализа колонки донных отложений со ст. 55 проведена проверка статистически значимых различий в накоплении металлов, фосфора и органического вещества. Верхние 16 см керн относятся к последнему этапу субатлантического периода, что соответствует интервалу от 1000 лет назад до настоящего времени (рис. 3.2.9). Граница индустриального периода (последние 500 лет) принята линейной интерполяцией за 8 см глубины от верха колонки отложений. В результате для динамики металлов, фосфора и органического вещества в колонке получены результаты статистического теста Манна – Уитни для уровня значимости $\alpha = 0,05$ (табл. 3.2.5). Исходные статистические гипотезы сформулированы следующим образом: нулевая гипотеза (H_0) – осадконакопление в индустриальном и доиндустриальном периодах не имеют различий; альтернативная гипотеза (H_1) – при переходе к индустриальному периоду накопление элемента значимо изменилось. Элементы и показатели (табл. 3.2.5) отсортированы по возрастанию значений критерия Манна – Уитни, нормированных на указанные размеры выборок – U_z . Критическое значение U_z , которое

определяет выбор той или иной гипотезы, зависит, в том числе, от уровня статистической значимости и от размера выборок и в данном случае равняется 2,01. Меньшие значения U_z имеют только два химических элемента – ванадий и никель, а также показатель ППП. Следовательно, накопление ванадия и никеля, а также значения ППП не имеют значимых отличий в индустриальном периоде по сравнению с доиндустриальным. Остальные же металлы (хром, кобальт, марганец, железо, медь, свинец) и формы фосфора демонстрируют такое различие. Причем с наибольшей вероятностью в индустриальном периоде изменилось накопление тяжелых металлов: свинца, железа и меди. Это может указывать на антропогенный характер изменений осадконакопления.

В итоге полученные результаты по колонке донных отложений (ст. 55), несмотря на то, что колонка охватывает небольшой промежуток времени (последние 2300 лет), представляют значительный интерес для выявления начала антропогенного воздействия на экосистему Ладожского оз. Обычно скорость осадконакопления в центральной части Ладожского оз. слишком низкая для изучения последнего тысячелетия и фиксации начала антропогенного воздействия. В изученной колонке зафиксировано повышенное накопление металлов и фосфора в индустриальном периоде, связанное с антропогенными факторами. Причем наиболее выражен антропогенный характер накопления свинца и меди. Накопление ванадия и никеля, а также содержание органического вещества связано с природными факторами. Комплексное исследование колонки (ст. 55) также показало, что на динамику накопления изученных элементов значительное воздействие могут оказывать и природные факторы. Так, максимальные значения фосфора отмечены в раннесубатлантическом периоде 2300–1700 лет назад, скорее всего, связаны с климатическими причинами.

3.3 Периодизация органического осадконакопления в Ладожском озере

Голоценовая динамика содержания органического вещества в осадках является важным источником данных для палеогеографических реконструкций. Горизонты с большим содержанием органического вещества формируются в периоды с повышенной биологической продуктивностью. Резкое падение содержания органического вещества свидетельствует об усилении эрозионных процессов на водосборной площади. Результаты изучения 10 колонок, отобранных в различных частях Ладожского оз., демонстрируют определенные закономерности в голоценовом ходе органогенного осадконакопления (рис. 3.3.1).

По динамике содержания органического вещества выделено пять периодов органогенного осадконакопления, обладающих общими чертами. Период осадконакопления А соотносится с ранними стадиями развития Ладожского оз. Для него характерно стабильно низкое содержание органического вещества, значения ППП не превышают 3%. Отложения представлены позднеледниковыми и раннеголоценовыми ленточными и гомогенными глинами [Субетто, 2009]. Граница между периодами А и В

в колонке из юго-восточной части озера (ст. 52) эрозионная, что свидетельствует о размыве части отложений, возможно, во время спуска БЛО около 11 600 кал. лет назад. В центральной части озера (ст. 82) переход от стабильно низкого накопления органики к росту происходит постепенно, т. е. эрозионные процессы во время спуска БЛО в этой части акватории не проявились. Для периода осадконакопления В характерен постоянный рост содержания органического вещества вверх по разрезу. Он соотносится с началом голоценового потепления, которое привело к постепенному повышению продуктивности озерной экосистемы [Давыдова, 1985]. В это время Ладожское оз. отделяется от Балтийского моря (стадия Иольдиевого моря в Балтике), соединяется с ним (стадия Анцилового озера), снова отделяется [История озер..., 1990]. Все эти события (11 600–9800 кал. лет назад [Björck, 2008]) сопровождаются значительными изменениями площади акватории Ладоги. При этом характер органического осадконакопления при переходе от иольдиевой к анциловой стадии и последующем переходе к собственно ладожской стадии в изученных разрезах существенно не меняется.

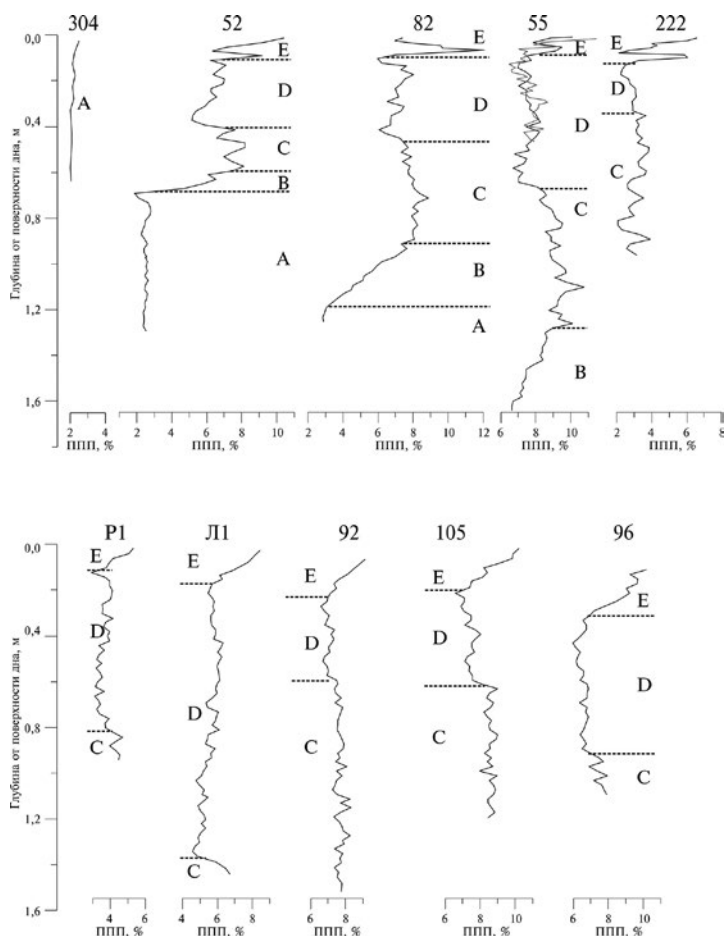


Рис. 3.3.1 – ППП и периоды органогенного осадконакопления в изученных колонках

Для периода осадконакопления С характерны максимальные значения содержания органического вещества, его рост прекращается и происходит относительная стабилизация на высоких значениях. Это время климатического голоценового оптимума. Ранее по данным спорово-пыльцевого анализа отложения с максимальным содержанием органического вещества были датированы атлантическим оптимумом голоцена [История..., 1990, Subetto et al., 1998]. Мощность атлантических отложений может колебаться от 0,4 до 1,5 м [История..., 1990]. В колонке со ст. 82 отложения этого периода (мощностью около 0,5 м) формировались приблизительно 9000–4800 кал. лет назад [Sapelko et al., 2019]. В атлантическом периоде для данной территории выделены многочисленные фазы потепления/похолодания. В целом данный временной промежуток совпадает с временными границами голоценового термического оптимума, выделенного для колонки со ст. 1309 во временном интервале 9500–4500 кал. лет назад [Gromig et al., 2019]. Граница между периодами С и D выделена по резкому падению значений ППП. Наиболее выражен этот спад на станциях, расположенных в центральной части озера (ст. 52, 55, 82). Здесь влияние на осадконакопление процессов, происходящих на водосборе и в области прибрежно-волновой активности, минимально и, таким образом, данная граница объясняется глобальной перестройкой гидродинамических и гидробиологических условий во всем озере. Для периода осадконакопления D характерны преимущественно низкие значения ППП с небольшими флуктуациями. В разрезе отложений со ст. 82 датировки границ этого периода составили около 4800 и 1800 кал. лет назад соответственно [Sapelko et al., 2019]. В начале суббореального времени здесь происходило похолодание, далее отмечается несколько периодов потепления/похолодания [Delusin, 1991]. Также в суббореальное время ладожская трансгрессия привела к затоплению обширных территорий в южной части современной котловины. Отмечается несколько эпизодов трансгрессии, последний из которых закончился образованием Невы (около 3400 кал. лет назад) и спуском уровня озера до современных отметок [Saarnisto, 1996; Александровский и др., 2009; Dolukhanov, 2009]. Для периода осадконакопления Е характерен быстрый рост содержания органики в донных отложениях до максимальных значений. Возраст начала этого периода не ранее 1700 лет назад. Пик содержания органического вещества отмечается или в поверхностных горизонтах отложений, или в горизонтах, иногда ожелезненных, расположенных на глубине 0,06–0,10 м от поверхности воды. Высокие значения содержания органического вещества в кровле отложений с последующим снижением вниз (мощность периода Е составляет 10–20 см) отчасти связаны с деструкцией органики в ходе диагенетических преобразований. С этими же процессами связано образование рудных корок и двойной пик значений ППП, отмеченные в ряде разрезов в верхней части. Эти процессы не исключают природно-климатических причин роста органического вещества на последнем этапе развития озера, т. к. рост продуктивности озерной экосистемы и повышение его трофического статуса отмечен в субатлантическом времени [Давыдова, 1985]. Таким образом, обнаружено отчетливое сходство в голоценовой динамике накопления органического вещества в отложениях, формировавшихся в различных частях акватории Ладожского оз.

Условия, благоприятные для накопления органики в отложениях, существовали в среднем голоцене и в последние 1500 лет.

3.4 Использование субфоссильных диатомовых комплексов в оценке экологического состояния Ладожского озера

Результатом развития хозяйственной деятельности в бассейне Ладожского оз. в конце 1960-х гг. – 1980-х гг. стал переход из олиготрофного в мезотрофное состояние, сопровождавшийся изменением ряда физико-химических и гидробиологических показателей. За последние 20 лет экологическое состояние Ладожского оз. улучшилось, чему способствовал экономический спад начала 1990-х гг. и последующее снижение антропогенной нагрузки. Однако проблема эвтрофирования до сих пор остается одной из наиболее актуальных для Ладожского оз. Диатомовые комплексы, формирующиеся в поверхностном слое донных осадков (субфоссильные диатомовые комплексы), представляют собой интегрированную пространственно-временную характеристику современной диатомовой флоры водного объекта, сглаживающую и осредняющую сезонные различия видового состава, а также его изменения, связанные с кратковременными либо «точечными» воздействиями на экосистему. Объединяя не только массовые, но и немногочисленные виды планктона и бентоса, вегетирующие короткое время или имеющие ограниченное распространение, субфоссильные диатомовые комплексы дают более полное представление о видовом составе диатомовой флоры водоема, по сравнению с пробами живых водорослевых сообществ [Давыдова, 1985]. Четкие экологические предпочтения большинства видов диатомовых водорослей делают их надежными индикаторами качества водной среды извержений, что позволяет использовать диатомовый анализ поверхностного слоя донных осадков в качестве экономического и эффективного метода оценки состояния водных объектов [Battarbee et al., 2001]. Исследования состава субфоссильных диатомовых комплексов, выполненные в начале 1960-х гг., конце 1970-х гг. и начале 1990-х гг. [Давыдова, 1968; Давыдова и др., 1997; Davydova et al., 1999], позволили проследить изменения экосистемы Ладожского оз., связанные с антропогенным эвтрофированием. Были выявлены изменения экологического состояния ладожских шхер в начале 2000-х гг. в результате снижения антропогенной нагрузки [Лудикова, 2017a]. Настоящее исследование продолжает ряд наблюдений за изменениями состава субфоссильных диатомовых комплексов. Его цель – оценка состояния озера на этапе деэвтрофирования и выявление его изменений по сравнению с доиндустриальным этапом и этапом максимальной антропогенной нагрузки [Ludikova, 2020]. В составе субфоссильных диатомовых комплексов 15 из 16 станций доминируют планктонные диатомеи. В целом их содержание ниже в северном шхерном районе (58–79%) по сравнению с остальными станциями (75–94%). Самыми широко распространенными и многочисленными видами являются *Aulacoseira islandica* (10,5–60%), доминирующая на 15 станциях, и *Aulacoseira subarctica* (4,5–28%), являющаяся содоминантом *A. islandica* на большинстве исследованных станций (рис. 3.4.1, г). На 15 станциях с численностью «обычных» видов и субдо-

минантов отмечены обитатели высокотрофных водоемов *Cyclostephanos dubius* и *Stephanodiscus minutulus*. Первый наиболее характерен для шхерного района, второй встречается на большинстве станций, за исключением Волховской губы. В число «обычных» видов на отдельных станциях северной части озера, в том числе в шхерном районе, входит гиперэвтрофный *Stephanodiscus hantzschii*. Другие представители рода *Stephanodiscus* – *Stephanodiscus medius* и *S. neoastreae* отмечены с численностью «обычных» видов, реже – субдоминантов на 10 и 12 станциях, соответственно, при этом для шхерного района характерно более низкое их содержание. Мезо-эвтрофная *Asterionella formosa* присутствует в составе диатомовых комплексов всех исследованных станций, однако ее наибольшее содержание (3–8,5%) характерно для северного района, включая шхеры. Здесь же отмечена наиболее высокая численность (2–10%) эвтрофной *Diatoma tenuis*. Среди единичных и «обычных» видов в составе субфоссильных диатомовых комплексов большинства станций отмечены также *Cyclotella radiosa* и *C. schumannii*, более многочисленные в открытой части Ладоги. Доля бентосных диатомей наиболее высока в шхерном районе (21–59%), а также на отдельных станциях в западной и северо-западной части озера, и Волховской губе. В пробах, отобранных в 2016 г., в составе субфоссильных диатомовых комплексов 16 из 18 исследованных станций также преобладают планктонные диатомеи. Как и на предыдущем этапе, самым широко распространенным и массовым видом является *Aulacoseira islandica*, достигающая численности доминанта (16–61%) на 16 станциях. *Aulacoseira subarctica* также отмечена на всех станциях (рис. 3.4.1, д). На 15 из них она является содоминантом *A. islandica*, в отдельных случаях превосходя ее по численности. К другим широко распространенным, но немногочисленным планктонным видам, как и ранее, относятся *Stephanodiscus medius* и *S. neoastreae*, отмеченные на всех изученных станциях. Эвтрофный *Cyclostephanos dubius* и гиперэвтрофный *S. minutulus* отмечены лишь с численностью «обычных» видов. Численность мезо-эвтрофной *Asterionella formosa*, эвтрофной *Diatoma tenuis* и гиперэвтрофного *Stephanodiscus hantzschii* еще более сокращается по сравнению с предыдущим этапом – в основном они встречаются лишь единично. На большинстве станций с численностью единичных и «обычных» видов отмечены *Cyclotella radiosa* и *C. schumannii*. Наиболее высокое содержание бентосных диатомей характерно для мелководных станций южного района (до 93%).

Сравнение полученных результатов с данными предыдущих исследований позволяет проследить и оценить изменения состояния экосистемы Ладожского оз. в течение последних 50 лет. К началу 1960-х гг. основу субфоссильных диатомовых комплексов составляли планктонные виды, характерные для крупных глубоководных олиготрофных бассейнов [Давыдова, 1968]. Наиболее многочисленной на всех изученных станциях была *Aulacoseira islandica* (рис 3.4.1, а), численность которой, как правило, в несколько раз превосходила численность других видов [Давыдова, 1968]. *A. islandica* – массовый вид весеннего и осеннего ладожского фитопланктона [Петрова, 1968], доминирующий в составе диатомовых комплексов в течение всей послеледниковой истории Ладожского оз. [Давыдова, 1985; Ludikova, 2020]. Среди других характерных видов диатомей отмечались

Asterionella formosa, массово развивавшаяся в поздневесеннем и доминировавшая в летнем ладожском фитопланктоне [Петрова 1968]. На отдельных станциях встречались *Aulacoseira italica*, *A. alpigena*, виды родов *Cyclotella* и *Stephanodiscus* [Давыдова и др., 1997]. Состав субфоссильных диатомовых комплексов свидетельствовал об олиготрофном статусе Ладожского оз. [Davydova et al., 1999], что подтверждалось также материалами гидрохимических и гидробиологических исследований. Так, среднегодовое содержание неорганического фосфора к нач. 1960-х гг. составляло 3 мкг/л, среднее содержание общего фосфора – 10 мкг/л. [Расплетина, Сусарева, 2002]. Дефицит фосфора и климатические условия лимитировали развитие фитопланктона, в составе которого в течение всего года преобладали диатомовые водоросли [Петрова, 1968]. В 1978–1979 гг. состав субфоссильных диатомовых комплексов заметно меняется (рис. 3.4.1, б). Роль содоминантов *Aulacoseira islandica* начинают играть *A. italica*, а также мезо-эвтрофная *Asterionella formosa* (массовый вид летнего фитопланктона) и эвтрофная *Diatomatenuis*, ранее обильная в летний период лишь в южном районе озера. Массовое развитие эвтрофного содоминанта указывает на повышение трофности Ладожского оз. и его переход в мезотрофное состояние [Давыдова и др., 1997] в результате увеличения фосфорной нагрузки, начавшееся в середине 1960-х гг. Поступление большого количества фосфорных соединений со стоками промышленных предприятий и сельхозугодий привело к увеличению среднегодового содержания минерального фосфора в 4–5 раз к 1976–1979 гг. Концентрация общего фосфора в 1976–1980 гг. в среднем составляла 26 мкг/л [Расплетина, Сусарева, 2002]. Увеличение содержания фосфора стимулировало развитие фитопланктона, что на раннем этапе эвтрофирования выразилось в увеличении численности массовых видов (*A. islandica*, *A. formosa*), а в дальнейшем привело к усилению роли видов эвтрофных озер. Возросли также биомасса фитопланктона и объем первичной продукции [Петрова, 1982].

К началу 1990-х гг. на большинстве станций в составе субфоссильных диатомовых комплексов среди доминантов по-прежнему отмечались *A. islandica*, *A. formosa* и *D. tenuis*, тогда как численность *A. italica* снизилась (рис. 3.4.1, в). При этом на некоторых станциях, в первую очередь, в заливах северной части Ладоги, произошло заметное сокращение доли *A. islandica*, за счет увеличения содержания видов-индикаторов антропогенного эвтрофирования. Среди них, помимо вышеназванных, достаточно многочисленны были обитатели высокотрофных водоемов – *Cyclostephanos dubius* и *Stephanodiscus hantzschii* [Davydova et al., 2000]. Это свидетельствовало о более высокой степени антропогенного загрязнения ладожских шхер в результате поступления промышленных и хозяйственно-бытовых стоков от расположенных по берегам предприятий и населенных пунктов. Ситуация здесь усугублялась значительной удаленностью отдельных загрязненных участков от основной акватории и слабым водообменом с открытой частью озера [Davydova et al., 1999]. Таким образом, данные изучения состава субфоссильных диатомовых комплексов свидетельствовали о мезотрофном состоянии Ладожского оз., при более сильном эвтрофировании северных заливов. Это подтверждалось результатами гидрохимических ис-

следований, согласно которым, несмотря на начавшееся в первой половине 1980-х гг. снижение фосфорной нагрузки, к нач. 1990-х гг. среднее содержание фосфора продолжало оставаться на уровне, соответствующем мезотрофии (~ 20 мкг/л) [Расплетина, Сусарева, 2002]. Изучение состава и биомассы фитопланктона также показало, что в первой половине 1990-х гг. Ладожское оз. оставалось мезотрофным водоемом, с наиболее эвтрофирующимися участками в шхерном районе и заливах крупных рек [Holorainen, Letanskaya, 1999]. По результатам настоящего исследования, к началу 2000-х гг. в составе субфоссильных диатомовых комплексов в открытой части озера и на большинстве станций шхерного района вновь устанавливается преобладание *Aulacoseira islandica*, характерное для доантропогенного этапа. На большинстве изученных станций ее содоминантом является *Aulacoseira subarctica* (рис. 3.4.1, г). Происходит значительное сокращение доли *Asterionella formosa* и *Diatoma tenuis*, достигавших численности доминантов на этапе антропогенного эвтрофирования, а также обитателей высокопродуктивных вод *Cyclostephanos dubius*, *Stephanodiscus hantzschii* и *S. minutulus*. Таким образом, можно говорить об улучшении экологического состояния Ладожского оз. в результате продолжающегося снижения антропогенной нагрузки. Однако более высокое содержание видов-индикаторов эвтрофирования, отмечаемое в шхерном районе, свидетельствует о том, что в условиях снижающейся антропогенной нагрузки процесс самоочищения этих слабо сообщающихся с основной акваторией заливов протекает медленнее, по сравнению с открытой частью озера. Тот же состав и соотношение доминирующих видов (*Aulacoseira islandica* и *A. subarctica*) в целом сохраняется и на современном этапе (рис. 3.4.1, д). Продолжающееся снижение численности *Asterionella formosa* и *Diatoma tenuis*, отмеченное в пробах 2016 г., указывает на значительное сокращение содержания этих видов в ладожском фитопланктоне. По сравнению с результатами нач. 2000-х гг. уменьшается также доля других видов-индикаторов антропогенного эвтрофирования (*C. dubius*, *S. hantzschii*, *S. minutulus*). Указанные изменения свидетельствуют о продолжающемся снижении трофности Ладожского оз., что зафиксировано также данными гидрохимических исследований. Так, концентрация общего фосфора в 2009–2018 гг. составляла 11–13 мкг/л, а содержание неорганического фосфора в 2013–2018 гг. не превышало 3 мкг/л [Петрова, 2019], приближаясь тем самым к значениям доантропогенного этапа. Однако при сопоставлении состава диатомовых комплексов этапа, предшествующего началу антропогенного эвтрофирования, и современных обнаруживаются заметные различия. Так, в настоящее время на большинстве станций доминируют *Aulacoseira islandica* и *A. subarctica* (рис. 3.4.1, д), за исключением южного мелководного района, где преобладают бентосные диатомеи. В свою очередь к началу 1960-х гг. *A. Islandica* на подавляющем большинстве станций была единственным доминантом (рис. 3.4.1, а). Причиной такого различия является тот факт, что разные морфотипы *Aulacoseira subarctica* в предшествующих исследованиях определялись как три разных таксона: *Aulacoseira italica*, *A. italica* ssp *subarctica* и *Aulacoseira distans* var. *alpigena* [Генкал, 1996]. Все три таксона в конце 1950-х – начале 1960-х гг. постоянно отмечались в составе ладожского фитопланктона в разгаре био-

логической весны и во второй ее половине, при устойчивом доминировании *A. islandica* [Петрова, 1968]. Их сравнительно высокое содержание отмечалось также в составе субфоссильных диатомовых комплексов в конце 1950-х гг. [Давыдова, 1968]. Следовательно, *Aulacoseira subarctica* являлась важным компонентом водорослевых сообществ и в олиготрофный период, хотя различия оценки численности не позволяют сопоставить данные о содержании этого таксона в составе субфоссильных диатомовых комплексов на до-антропогенном и современном этапах. На этапе антропогенного эвтрофирования конкурентные отношения с *Asterionella formosa* и *Diatoma tenuis*, массово развивавшимися в период поздней биологической весны, привели к сокращению численности этого вида в составе планктонных сообществ, что нашло отражение в уменьшении доли *Aulacoseira italica* в составе субфоссильных диатомовых комплексов в начале 1990-х гг. (рис. 3.4.1, в). Важно отметить, что аналогичное современному возрастание численности *A. subarctica* до значений содоминанта *A. islandica* отмечалось в Ладожском оз. также во второй половине голоцена [Лудикова, 2018; Sapelko et al., 2019; Ludikova, 2020], т. е. задолго до начала сколь-либо ощутимого антропогенного воздействия на его экосистему. Следовательно, ее появление в составе доминирующих видов в настоящее время может быть обусловлено природными факторами. Так, менее суровые ледовые условия последних десятилетий и повышение температуры воздуха в весенние месяцы [Науменко, Каретников, 2017] могли повлиять на продолжительность периода вегетации этого представителя весеннего фитопланктона. Заметное снижение доли *Asterionella formosa* на современном этапе по сравнению с доантропогенным периодом (рис. 3.4.1, а, г, д), очевидно, отражает существенную перестройку в составе сезонных комплексов фитопланктона в ходе антропогенного эвтрофирования и деэвтрофирования Ладожского оз. Если в олиготрофный период *A. formosa* доминировала в летнем фитопланктоне Ладожского оз., то в ходе повышения фосфорной нагрузки массовое развитие этого вида сместилось на стадию поздней биологической весны вследствие напряженных конкурентных отношений с другими группами водорослей на стадии биологического лета [Петрова, 1990]. В ходе деэвтрофирования произошло общее снижение роли диатомей в составе летнего фитопланктона за счет доминирования синезеленых и криптофитовых водорослей [Летанская, Протопопова, 2012]. Таким образом, в настоящее время в условиях пониженного содержания фосфора в весенний период ее развитие сдерживается конкуренцией с диатомеями рода *Aulacoseira* (*A. islandica* и *A. subarctica*), а в летний – с представителями других групп водорослей. Это не было характерно для доантропогенного этапа, когда диатомовые водоросли доминировали в составе фитопланктона в течение всего сезона вегетации. Таким образом, особенности современного состава диатомовых комплексов указывают на то, что экосистема Ладожского оз. не вернулась в свое «доантропогенное» состояние. Это позволяет говорить о задержке отклика экосистемы на снижение антропогенного воздействия, а возможно, и о необратимости некоторых происшедших в ней изменений. Очевидно, что на процесс деэвтрофирования и восстановления состояния Ладожского оз. накладываются климатические изменения, определяющие время начала

и продолжительность сезона вегетации водорослевых сообществ. Результаты комплексных гидробиологических исследований также установлен ряд новых специфических черт и характеристик основных биологических сообществ, позволяющих говорить о том, что в настоящее время экосистема Ладожского оз. находится на совершенно новом этапе развития [Курашов и др., 2018].

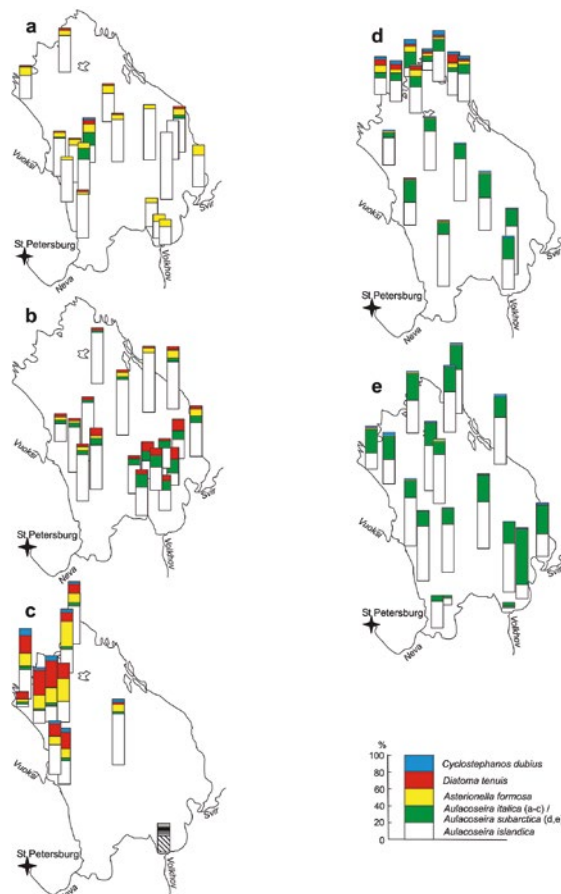


Рис. 3.4.1 – Процентное содержание основных видов диатомей в составе субфоссильных диатомовых комплексов в 1959–1960 гг. (а), 1978–1979 гг. (б), 1994 г. (в), 2001–2004 гг. (г), 2016 г. (д). (а – в по данным [Davydova et al., 1999])

Изучение состава субфоссильных диатомовых комплексов позволило проследить изменения состояния экосистемы Ладожского оз. под влиянием антропогенного фактора, начиная с конца 1950-х гг. Переход в мезотрофное состояние (1970–1980-е гг.) отмечен увеличением доли высокотрофных диатомей и уменьшением численности видов, характерных для олиготрофного этапа. На этапе деэвтрофирования (2000-е гг.) происходит восстановление доминирующей роли отдельных таксонов, характерных для доантропогенного этапа и существенное сокращение содержания диатомей, характерных

для высокотрофных условий. Уменьшение доли видов, ранее массово развивавшихся в летнем фитопланктоне, отражает перестройку состава живых водорослевых сообществ на более высоком таксономическом уровне. Особенности состава субфоссильных диатомовых комплексов современного этапа свидетельствуют о том, что, несмотря на снижение фосфорной нагрузки до значений олиготрофного периода, современное состояние экосистемы Ладожского оз. не идентично «доантропогенному», что говорит о задержке ее отклика на снижение трофности и, возможно, о необратимости некоторых происшедших в ней изменений. Определяющими факторами развития экосистемы на современном этапе являются процесс деэвтрофирования и климатические изменения. Прослеженные изменения состояния Ладожского оз. подтверждаются данными гидрохимических и гидробиологических исследований. Таким образом, диатомовый анализ поверхностного слоя донных осадков может использоваться в качестве независимого, экономичного и эффективного метода оценки состояния водоемов.

3.5 Начало антропогенного воздействия и древняя история сельскохозяйственной деятельности на водосборе Ладожского озера

Антропогенными факторами, влияющими на изменения озерных ландшафтов, являются не только загрязнения, связанные с началом индустриального периода. Первые следы влияния деятельности человека на водосборе Ладожского оз. фиксируются еще в начале голоцена. Первобытный человек появился на берегах древней Ладоги вслед за исчезновением ледника в пребореальном периоде и, судя по археологическим данным [Лисицин, Герасимов, 2008], территорию западного и северо-западного Приладожья (территория Карельского перешейка) осваивал первой в Приладожье. На первых этапах освоения территории его влияние на экосистему озера было незначительным и локальным. Обитателями Приладожья были охотники, рыбаки и собиратели. Первый этап заселения побережья Ладожского оз. связан с трансгрессивной фазой Балтики – развитием Анцилового озера, частью которого была Ладога. Впервые сопоставил расселение человека в раннем голоцене с изменениями уровня Ладоги А. А. Иностранцев [Иностранцев, 1882]. Также он обратил внимание на зависимость расположения археологических памятников от изменения береговых линий. Для южной Финляндии [Jussila, Kriiska, 2004] по анализу высотных отметок малых озер и археологических стоянок на их побережье, с учетом их палеогеографической ситуации, выявлена приуроченность всех мезолитических памятников к береговой линии Анцилового озера, причем многие из них располагались на островах. Подобные реконструкции выполнены и для Карельского перешейка [Dolukhanov et al., 2007]. При этом влияние мезолитических стоянок, расположенных в береговой зоне Анцилового оз., практически не фиксируется в палиноспектрах современной котловины Ладожского оз. Для самых ранних стоянок получены сходные радиоуглеродные датировки для археологических памятников: Антреа Корпилахти (серия датировок по коре сосны и волокну рыболовной сети) – 10780–10220 кал. лет назад [Carpelan,

2008], для стоянок на оз. Боровское – 10 780–10 200 кал. лет назад [Miettinen et al., 2008], и стоянки Киркколахти на оз. Янисярви – 10 750–10 300 кал. лет назад [Шахнович, 2007; Gerasimov, Kriiska, 2018]. Вероятно, в этот период влияние человека было незначительным, и нагрузка на озерную экосистему была еще низкой.

Процесс распространения первобытного земледелия начался позднее. На первых этапах это было подсечное земледелие, связанное с использованием пожарищ как более плодородных почв и искусственным освобождением территории от леса. Вопрос начала развития земледелия на водосборе Ладожского оз. до сих пор остается дискуссионным. Еще в 1990-х годах считалось, что земледелие на водосборе Ладожского озера началось около 3 100 лет назад, в период раннего железного века [Taavitsainen et al., 1994; Сакса, 2010]. Тем не менее в последнее время первые следы земледелия в палиноспектрах все больше находят еще в неолите. С помощью изменений в группе древесных пород (соотношение берез и хвойных пород, появление широколиственных пород в таежной зоне и т. д.), по увеличению пыльцы трав в общем составе и, соответственно, увеличение площадей открытых ландшафтов, появлению рудеральных видов (*Rumex*, *Plantago* и др.) или культурных злаков (*Cerealialia*) можно проследить динамику антропогенного воздействия в течение всего периода существования озера. Как показывает изучение современной растительности, в таежной зоне изменения растительного покрова под влиянием антропогенных факторов на региональном уровне в основном связаны со сменой основных лесообразующих пород [Исаченко, 2018].

В последние годы на территории России, Финляндии и Эстонии археологи совместно с палинологами активно занимаются проблемой начала и развития земледелия в Балтийском регионе [Kriiska, 2009; Alenius et al., 2013]. Исследования показывают, что раннее земледелие в регионе началось около 5300–4000 до нашей эры. Первой выращиваемой культурой был *Hordeum esculentum* [Alenius et al., 2013]. В неолите также выращивали *Fagorum*. Для территории Эстонии эти результаты подтверждены в [Poska, Saarse, 2006]. В южной Финляндии в колонках озерных отложений отмечено преобладание ржи как основного возделываемого вида [Alenius et al., 2013]. Находки появились и в местах, ранее считавшихся до сих пор дикими. Однако поиск многими исследователями свидетельства крупномасштабного земледелия приводит к отрицанию все больше появляющихся фактов выращивания культурных злаков. Возможно, ранняя культивация растений на водосборе Ладожского оз. была незначительной по площади и не повлияла на смену привычного образа жизни [Нордквист, 2014]. На территории России эта тема древнего земледелия изучена плохо, что становится проблемой для общего понимания проблемы раннего земледелия Балтийского региона. В настоящее время ведутся совместные исследования [Сапелко и др., 2020; Alenius et al., 2020]. Так, в палиноспектрах оз. Большое Заветное на Карельском перешейке отмечено раннее появление *Triticum* (2480 лет до нашей эры) и *Cannabis* (2310 лет до нашей эры), а также пыльцы рудерального вида *Plantago lanceolata*. [Alenius et al., 2020]. Появление этих видов фиксирует и снижение распространения хвойных пород деревьев, что также может быть связано с началом земледелия.

В колонках донных отложений современной котловины Ладожского оз. *Cerealia* отмечается редко, в основном в разрезах, отобранных ближе к берегу. Так, в Сортавальском заливе (ст. 1238) *Cerealia* появляется в середине субатлантического периода (SA-2) [Давыдова и др., 1993; Delusin, 1991]. При этом увеличение березы в составе лесов и увеличение трав в палиноспектрах началось с начала субатлантического периода (SA-1). В то же время появляется ксерофитная растительность, свидетельствующая о нарушенных почвах, что также косвенно указывает на деятельность человека на северо-западном побережье. Самым ранним обнаружением пыльцы *Cerealia* в колонках донных отложений современной котловины Ладожского оз. являются палинологические данные по колонке у о. Коневец (ст. 1309) [Савельева и др., 2017]. Возраст появления культурных злаков здесь относится к суббореальному периоду, датируемому 4500 кал. лет назад. При этом значительное увеличение пыльцы культурных злаков датировано 2365–2717 кал. лет назад. Около 2200 кал. лет назад определена пыльца *Secale* [Savelieva et al., 2019]. Авторы исследования считают раннее нахождение пыльцы культурных злаков в колонке дальним заносом с южной части водосбора. Однако местный характер этой пыльцы в какой-то степени подтверждают находки пыльцы культурных злаков в малых озерах северо-западного побережья Ладожского оз. на территории России и Финляндии. Так, для колонок донных отложений некоторых малых озер Карельского перешейка, которые в прошлом были частью Ладоги на разных этапах своего развития, первое появление *Cerealia* также датируется суббореальным возрастом. Самое раннее появление пыльцы культурных злаков в колонке донных отложений оз. Узлового [Sapelko et al., 2008] в середине суббореального периода хорошо коррелируется с археологическими данными, предполагающими дальнейшее развитие земледелия здесь в эпоху раннего металла [Lavento et al., 2002]. Находки раннего железного века и средневековья, расположенные на высоте 15 м над уровнем моря, предполагают понижение уровня воды в оз. Узловом после образования р. Невы и прекращения Ладожской трансгрессии. Также междисциплинарные исследования показывают начало подсечно-огневого земледелия на о. Кильпола в раннем железном веке [Taavitsainen et al., 1994]. Для археологического памятника на высоте 18 м над уровнем моря получена радиоуглеродная датировка около 3000 лет назад [Саарнисто и др., 1994]. Возвышенность, где расположен памятник, до 4000–5000 лет назад была островом в Ладоге и в результате изменения уровня Ладожского оз. затем стала частью материка. Как показали исследования, люди населяли эту территорию постоянно с пребореального периода. Возможно, изменения уровня Ладожского оз. способствовало локальным условиям развития земледелия в Приладожье. Также более поздние археологические памятники железного века со свидетельствами земледелия могли лучше сохраниться.

В центральной части озера (ст. 55) присутствие человека в субатлантическом периоде выражено не так сильно. Единственным фиксирующим фактором присутствия человека с начала субатлантического периода является постоянное присутствие пыльцы *Plantago major*. Небольшие изменения, которые можно объяснить антропогенным фактором, начались в середине

субатлантического периода (SA-2). Увеличивается пыльца трав, среди которых появляются *Artemisia*, *Chenopodiaceae*, увеличивается распространение дикорастущих злаков. При этом пыльца культурных злаков в разрезе не обнаружена. На последнем этапе субатлантического периода (около последних 1000 лет) также увеличивается роль растений семейства гречишных, многие виды из которых также произрастают на нарушенных почвах и связаны с деятельностью человека.

В еще одной точке центральной части Ладожского оз. (ст. 82) пыльца *Cerealia* также не обнаружена. При этом небольшое увеличение пыльцы березы около 8990–8775 кал. лет назад можно связать с появлением людей на побережье Ладоги. В это же время отмечаются *Ericaceae*, *Chenopodiaceae*, *Artemisia* и др., что также может свидетельствовать об антропогенном характере растительности. Археологические стоянки северо-западного Приладожья датированы тем же периодом. Схожие датировки были получены для археологических стоянок: Озерное-3 – 8450–8380 кал. лет назад [Сапелко и др., 2008], Вещево – 8500–7500 кал. лет назад [Takala, 2004], Куркиеки – 8990–8560 кал. лет назад [Gerasimov, Kriiska, 2017]. Для всех памятников выполнялись палинологические исследования. В разрезе Озерное-3 [Сапелко и др., 2008] пыльца культурных злаков не обнаружена. Однако на наличие антропогенного воздействия в период существования памятника указывает обилие пыльцы сорных трав. С большой долей уверенности можно говорить о том, что наличие пыльцы *Rumex*, *Plantago*, *Ericaceae*, *Poaceae*, *Artemisia*, *Chenopodiaceae*, *Asteraceae* и *Brassicaceae* может быть связано с активной деятельностью человека. В районе многочисленных памятников Вещево проводились комплексные палеоэкологические исследования на озерах Ламское и Макаровское [Субетто и др., 2007]. Распашка земель и появление культурных злаков отмечены в озерных отложениях в конце суббореального периода в небольших количествах, а с субатлантического периода постоянно, почти непрерывно. Присутствие *Cerealia* в палиноспектрах также сопровождает значительный процент рудеральных видов. Фиксация локальной и региональной растительности с восстановлением ландшафтов [Alenius et al., 2000a] показывает тенденции в землепользовании и динамике пожаров, которые начинают различаться на региональном и локальном уровнях около 4000 г. до нашей эры. Это связано с локальным землепользованием, которое затмевается на региональном уровне за счет климатических факторов.

3.6 Особенности заболачивания побережья Ладожского озера в голоцене

С изучением динамики береговой зоны Ладожского оз. в голоцене тесно связаны процессы заболачивания. Торфяная толща любого болота сложена слоями разного вида торфов, отражающих не только растительность материнских ассоциаций, но и изменения окружающей среды. Отдельные этапы динамики болотной экосистемы связаны с природно-климатическими событиями. Развитие болот побережья крупных бассейнов находится под влиянием колебаний их уровня, которые накладываются на циклы увлажненно-

сти климата. Анализ разрезов торфяников береговой зоны Ладожского оз. позволяет привязать существование растительных сообществ на болотах к отдельным событиям голоцена, в частности, к трансгрессиям и регрессиям Ладожского оз. Процессы заболачивания изучаются на островных озерах северной части Ладоги. Так, в трансгрессивные и регрессивные периоды Ладожского оз. выявлены разные скорости вертикального прироста отложений на оз. Вуоренлампи (о. Путсаари). Исследование колонки донных отложений, отобранной со сплавины озера в 10 м от уреза воды, с применением ботанического анализа торфа позволило проследить смену палеосообществ, предшествующих современному растительному покрову на участке заболачивания с начала процесса торфообразования (рис. 3.6.1). Как свидетельствуют результаты палинологического анализа [Сапелко и др., 2014; Сапелко, Корнеевская, 2017], нижняя толща отложений, представленная ленточными глинами, формировалась в холодном сухом климате позднего дриаса. Эти отложения связаны с начальным этапом развития водоема в условиях приледникового бассейна – БЛО. Со сменой климатических условий в сторону потепления и увеличения влажности происходит смена характера осадконакопления. Начинает формироваться гиттия, содержащая растительные остатки в небольшом количестве. В нижних минеральных слоях были обнаружены фрагменты сфагновых мхов с примесью коры сосны, березы и остатками травянистых растений (*Menyanthes trifoliata*, *Equisetum fluviatile* и др.), что позволяет говорить о развитии сфагновой эвтрофной топи на месте участка заболачивания. По данным диатомового анализа, в этот период происходит регрессия приледникового бассейна и отделение от него оз. Вуоренлампи [Сапелко и др., 2014]. По мере заполнения котловины донными отложениями происходит обмеление водоема и уменьшение его площади. Создаются условия для начала процесса болотообразования и накопления торфа. Слой гиттии, в которой отмечены в небольших количествах макроостатки, перекрывается низинными торфами, начало накопления которых соответствует бореальному периоду.

Формирование торфяной залежи началось с заболачивания леса на месте сфагновой топи. В бореальном периоде на участке болота произрастали эвтрофные елово-березово-сосновые осоково-сфагновые сообщества, которым соответствуют древесно-сфагновый и древесный низинные торфа высокой степени разложения (до 40%). Подобные фитоценозы древесно-моховой группы обычно развиваются в условиях периодического подтопления грунтовыми водами [Тюремнов, 1976], которое угнетающе действует на древесный ярус. Сомкнутый моховой покров вытесняет травянистые растения и осоки. Можно отметить, что древесно-моховые и древесно-травяные фитоценозы часто развиваются на границе между участками лесной и топяной растительности. В составе растительного волокна в торфе на глубине 5,78–5,00 м доминируют *Sphagnum riparium*, *s. Centrale*, *s. obtusum*. От 20% остатков образуют корки *Pinus* и кора *Betula*. Водно-болотные (*Equisetum fluviatile*) и болотные растения (*Eriophorum angustifolium*, *Menyanthes trifoliata*) в травянистом ярусе на начальных этапах присутствуют в небольших количествах. В более поздние этапы бореального периода роль болотных видов возрастает и достигает 10–15%, на глубине 5,0–4,8 м

превышает 30%. В этом же интервале отмечено появление осок *Carex limosa*, *s. Lasiocarpa*, образующих до 30% растительного волокна. Распространение древесно-моховых сообществ на месте сфагновых эвтрофных топей свидетельствует о снижении уровня грунтовых вод, а также об установлении условий достаточно высокой проточности, что соответствует климатическим условиям начала бореального периода голоцена – сухим и прохладным. Снижение базиса эрозии могло произойти под влиянием регрессии крупных палеоводоемов бореального времени [Кудерский и др., 2013]. Установление условий, благоприятных для произрастания древесных видов, могло быть связано и с гляциоизостатическим поднятием территории, сопровождавшимся изменением дренажных условий. В атлантический период изменение климатических условий привело к тому, что елово-березово-сосновые осоково-сфагновые сообщества на участке заболачивания сменились хвощево-осоково-гипновыми, под которыми отложились вахтово-гипновые и гипновые низинные торфа. Основную массу растительных остатков в торфяной залежи на глубине 4,75–3,18 м образуют гипновые мхи. Гипновые мхи требовательны к условиям минерального питания, поэтому произрастают главным образом на местообитаниях с повышенным содержанием минеральных соединений в грунтовых водах. В условиях сильного обводнения на участке заболачивания развивался моховой покров, а травянистый ярус сильно разрежен и угнетен.

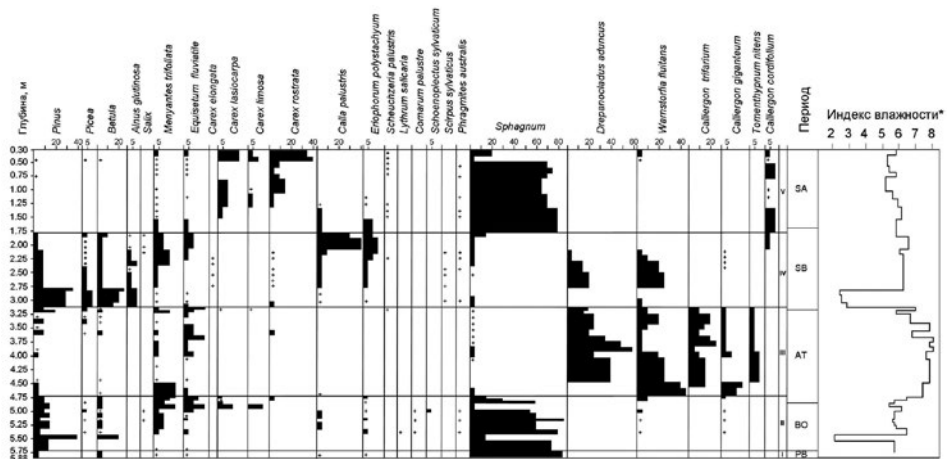


Рис. 3.6.1 – Диаграмма ботанического состава торфа и индекса влажности палеосообществ озера Вуоренлампи. I–V – палеосообщества: I – сфагновая эвтрофная топь, II – елово-березово-сосновое осоково-сфагновое эвтрофное сообщество, III – хвощево-осоково-гипновая эвтрофная топь, IV – березово-елово-сосновое гипново-травяное эвтрофное сообщество, V – осоково-сфагновое мезотрофно-эвтрофное сообщество. * – рассчитано по методу [Елина, 1992]

Грунтовые воды стояли на уровне с моховым покровом, что подтверждают высокие показатели индекса влажности, рассчитанные по методике [Елина, 1992]. Оценка гидрологического режима болот с применением индекса влажности базируется на присвоении растениям-торфообразова-

телям баллов в зависимости от их отношения к условиям водного режима. Наименьшим баллом оцениваются деревья, кустарники, кустарнички, наибольшим – гипергидрофильные растения (отдельные виды гипновых и сфагновых мхов и трав). Серия количественных показателей индекса влажности позволяет получить представление о динамике уровня грунтовых вод на болоте. При этом [Елина, 1992; 2000] наиболее информативными являются разрезы торфяников, где на циклы климата накладывается трансгрессивно-регрессивная деятельность крупных палеоводоемов. С глубины 3,65 м возрастает роль древесных, фрагменты *Pinus*, *Picea*, *Betula* превышают в торфе 10%. На травянистые (вахта, хвощ, осока вздутая) также приходится более 10%. Залегающие выше (с глубины 3,18 м) древесные, древесно-гипновые и древесно-травяные низинные торфа формируются в суббореальном периоде голоцена. Их формирование происходило под березово-елово-сосновыми гипново-травяными эвтрофными сообществами. Слой низинного древесного торфа в интервале 3,18–2,79 м со степенью разложения 30–35% сложен преимущественно корками и корой сосны, ели, березы и ольхи черной. Ботанический состав торфа, а также низкие значения индекса влажности (рис. 3.6.1) можно считать признаками снижения уровня грунтовых вод и установления проточных условий, вероятно, в результате перемены климата в сторону сухости и похолодания. В торфяной залежи на глубине 2,79–2,29 м отмечено снижение роли древесных до 25%. Более 40% остатков приходится на *Warnstorfia fluitans* и *Drepanocladus aduncus*. Травянистые достигают в этом интервале 15%. В этот период существенное участие в травяном покрове принадлежало гипновым мхам, что свидетельствует о повышенном увлажнении за счет притока грунтовых вод. Древесный ярус на участке заболачивания был разрежен и угнетен. Вероятно, перемена климата в сторону увеличения влажности вызвала вновь обводнение болота, угнетение древесного яруса и заселение торфяника более гидрофильной растительностью. Максимум Ладожской трансгрессии на о. Путсаари достигал 21,5 м [Сапелко и др., 2018a]. Озеро Vuorenlampi к тому времени находилось на достаточно высоких отметках и не испытывало прямого влияния трансгрессии. В составе волокна торфа, залегающего выше (2,29–1,72 м), преобладают *Calla palustris*, *Menyanthes trifoliata*, *Equisetum fluviatile* и *Eriophorum angustifolium*. Гипновые мхи снижаются до 5%. Появляются сфагновые мхи, образующие до 15% растительных остатков. Формирование этого слоя проходило также в суббореальном периоде. Торфяная залежь с глубины 1,75 м отмечается отсутствием остатков древесных и преобладанием в торфе фрагментов сфагновых мхов. В условиях обильного питания слабоминерализованными грунтовыми водами на участке болота развивались осоково-сфагновые мезотрофно-эвтрофные сообщества. Господствовал почти сплошной покров из сфагновых мхов. Травяной покров был сильно разрежен, древесный ярус отсутствовал. Смена растительных группировок с лесотопяных на топяные позволяет предположить изменение условий увлажнения. Вероятно, в период формирования данных торфов происходит смена климатических условий, что подтверждается выводами по палинологическому анализу, согласно которым накопление торфов происходило в субатлантике [Сапелко, Корнеевкова, 2017]. Исчезновение

древесных видов может быть связано и со значительной толщиной торфа, обусловившей отрыв горизонта грунтовых вод от минерального субстрата, следствием чего могло стать обеднение торфа минеральными элементами. На смену древесной растительности приходят менее требовательные к минеральному питанию травянистые виды. Торфяная толща, залегающая на глубине от 1,30 до 0,3 м, выделяется большим содержанием осок. Единично встречены остатки древесных, участие сфагновых мхов достигает 80% от растительного волокна. В условиях подтопления обедненными грунтовыми водами сфагновые мхи образовывали хорошо развитый сплошной ковер. Осоки составляли разреженный травяной ярус. В дальнейшем болото развивается по верховому типу, что подтверждает наличие в верхних слоях торфа на глубине 5–10 см растительных остатков *Sphagnum magellanicum* (80%), *S. angustifolium* (10%), *S. fuscum* (5%), *Eriophorum vaginatum* (5%), единичные корешки кустарничков и корка *Pinus*. Таким образом, с начала бореального времени на участке заболачивания оз. Вуоренлампи длительное время существовало эвтрофное болото, под которым накопились низинные торфа мощностью 5,45 м. Толща низинного торфа перекрывается переходным (мощность 0,2 м), а затем верховым (0,1 м) торфом. В течение голоцена болото развивалось в основном под влиянием климата и лишь в начальные стадии находилось под воздействием динамики уровня Ладоги, а в более поздние этапы – под косвенным влиянием. В отдельные периоды воздействие трансгрессивно-регрессивной деятельности, определяющей базис эрозии, накладывалось на циклы влажности климата.

3.7 Реконструкция Ладожской трансгрессии

Голоценовая история Ладожского оз. характеризуется рядом известных трансгрессивных и регрессивных стадий, но их точные временные рамки оцениваются по-разному. Наиболее молодые значимые колебания уровня Ладоги связаны с так называемой Ладожской трансгрессией, максимум которой пришёлся на момент времени около 3 тысяч лет назад, и с последовавшей за тем регрессией. Общепринятой является гипотеза о том, что сток из Ладоги в Балтику, осуществлявшийся в северной части Карельского перешейка, прекратился из-за изостатического поднятия порога стока, после чего около 3 100 лет назад возникла р. Нева, и сток стал происходить южнее [Марков, 1949; Квасов и др., 1975; Субетто и др., 2008; Александровский и др., 2009]. Оценки того, насколько скоротечным или длительным мог быть спад уровня Ладожского оз. после образования Невы, различны. Существуют аргументы в пользу того, что «прорыв» Невы и последующая регрессия Ладожского оз. носили катастрофический и скоротечный характер [Малаховский и др., 1993]. Однако имеются также палеолимнологические данные, касающиеся последовательного обособления от Ладоги малых озёр, расположенных на разных абсолютных высотах, в период, соответствующий началу регрессии. Эти данные позволяют построить временной ход регрессии. Задача осложняется тем фактом, что различные части Приладожья на протяжении своей истории испытывали неравное изостатическое поднятие. Из-за этого современные высоты урезов озёр (источники палеогео-

графических данных) требуют корректировки. Наиболее исследованными в отношении Ладожской трансгрессии и последующего спада уровня озера являются: район пос. Кузнечное в северо-западной части Приладожья (озёра Суури, Узловое и Витсалампи), о. Валаам и о. Путсаари. Кроме того, имеются данные с о. Риеккалансари на севере Ладоги и с о. Мантсинсаари на северо-востоке близ пос. Салми, а также с Балтийско-Ладожского водораздела на Карельском перешейке (оз. Макаровское и Ламское по разные стороны водораздела). Для медианных значений радиоуглеродных датировок были рассчитаны поправки, равные суммарному поднятию объекта со времени его обособления из-за явления изостазии [Сапелко и др., 2018a]. Для этого были использованы результаты математического моделирования [Амантов, Амантова, 2017], на основе которых получены высоты уреза озёр на момент их предполагаемого обособления от Ладоги (рис. 3.7.1).

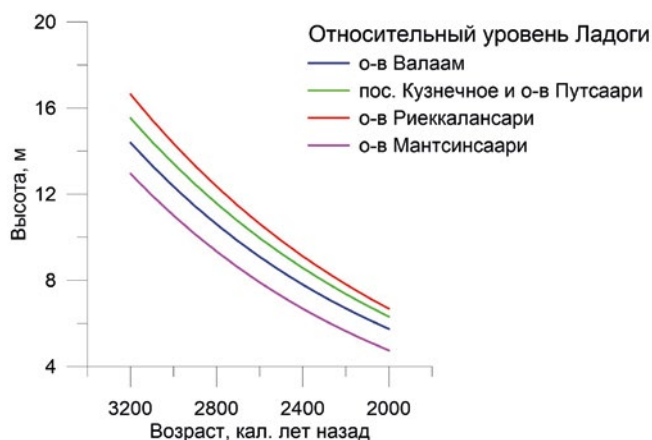


Рис. 3.7.1 – Спад уровня Ладожского оз. после максимума Ладожской трансгрессии

По графику спада уровня были выбраны три временных среза: 2400 ± 200 кал. лет назад; 2800 ± 200 кал. лет назад; 3100 ± 200 кал. лет назад (величины погрешности получены из 95% доверительного интервала полученного тренда регрессии). Для этих временных отрезков составлена серия карт изменений береговой линии Ладоги для района северо-западного Приладожья (рис. 3.7.2), для о. Валаам (рис. 3.7.3), о. Мантсинсаари и о. Лункулансаари (рис. 3.7.4). Также на картах отражён максимальный уровень, достигнутый в ходе Ладожской трансгрессии [Субетто и др., 2008].

Палеолимнологические данные, а также результаты моделирования изостатического поднятия свидетельствуют в пользу того, что спад уровня Ладожского оз. после прорыва р. Невы не был «катастрофическим», а мог растянуться на первые сотни лет. Тем не менее рамки погрешностей имеющихся датировок могут допускать и иные, более скоротечные в историческом времени сценарии.

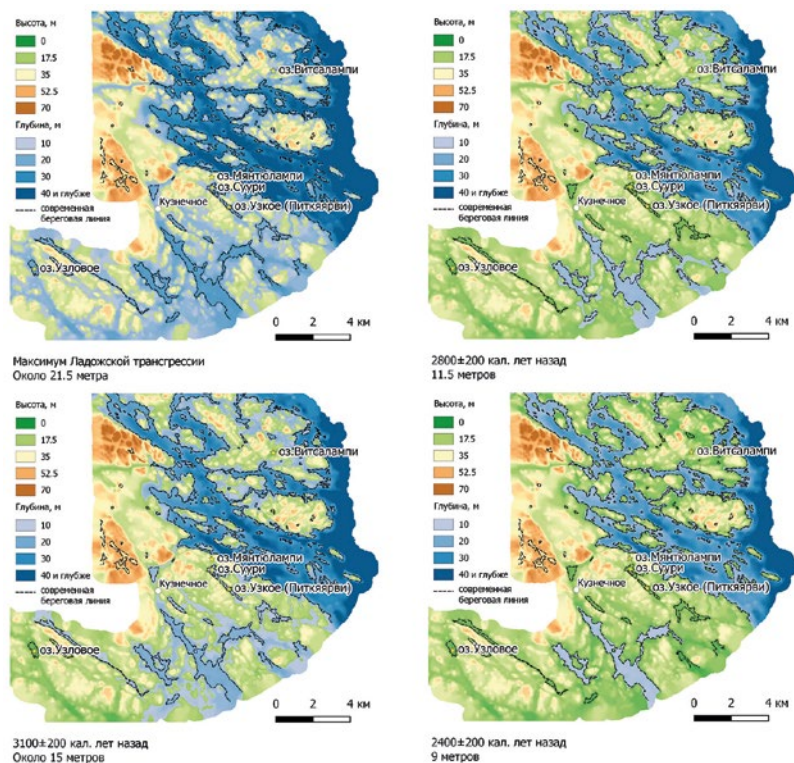


Рис. 3.7.2 – Изменения береговой линии Ладожского оз. в районе пос. Кузнецкое

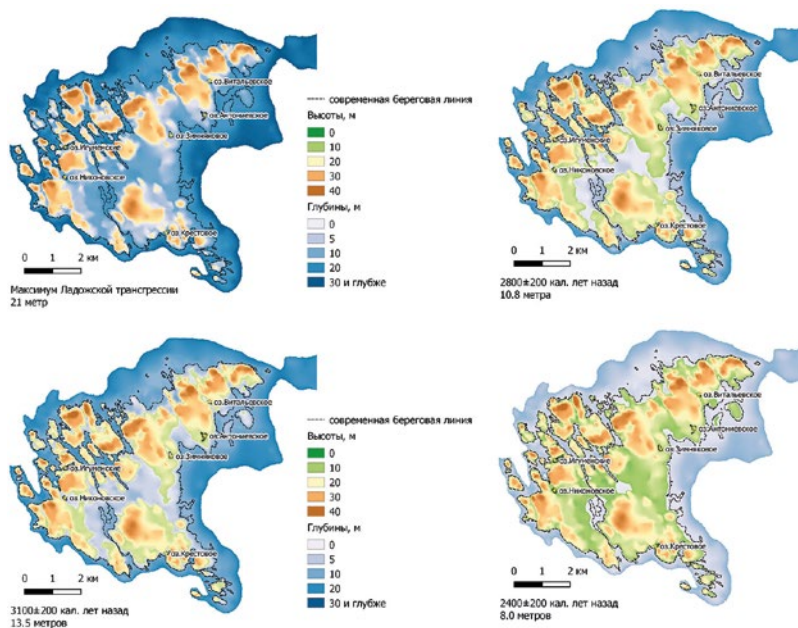


Рис. 3.7.3 – Изменения береговой линии Ладожского оз. в районе острова Валаам

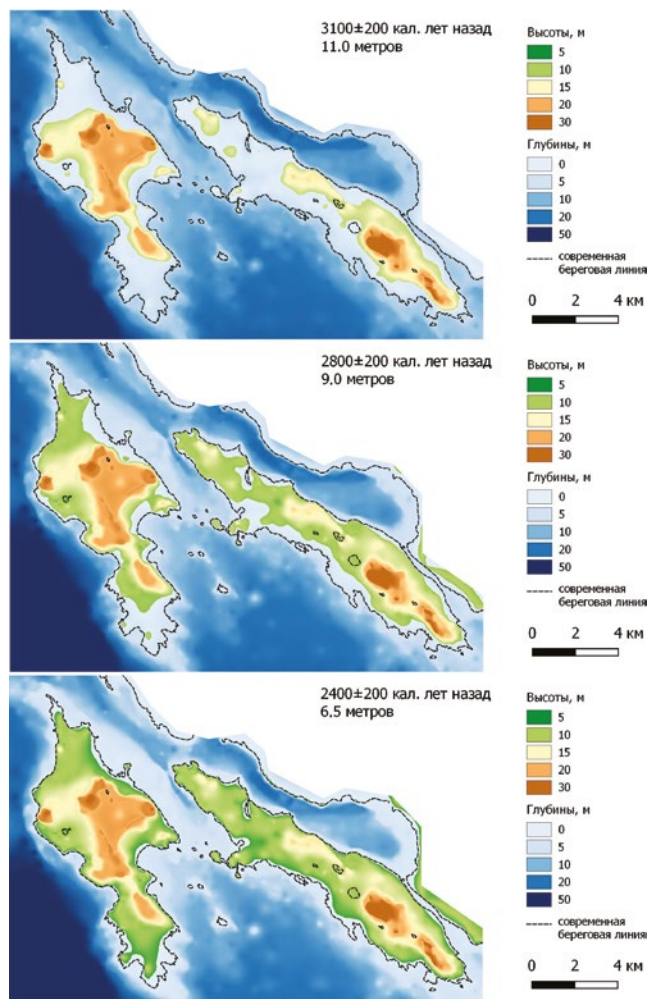


Рис. 3.7.4 – Изменения береговой линии Ладожского оз. в районе о. Мантсинсаари и о. Лукулансаари

Таким образом, проведенные палеолимнологические исследования позволили проследить историю озера с позднеледникового периода и на протяжении всего голоцена. Установлено, что одним из основных факторов воздействия на озеро являлся климат. Повышение продуктивности в олиготрофном озере началось с бореального периода. Климат постепенно становился теплее по сравнению с позднеледниковым периодом. В это время уровень Ладоги снижался, и началось заболачивание берегов. В течение этого периода отмечены также самые высокие концентрации Mg, Ca, Ni, Co и V, на накопление которых в донных отложениях озера влияли перечисленные природные факторы. Максимальное увеличение продуктивности Ладожского оз. отмечалось в атлантическом периоде, связанное с термическим оптимумом голоцена. Высокая продуктивность озера сохранялась также и на протяжении суббореального и первой половины субатлантического

периодов. В это время, помимо климатических, на экосистему озера оказывали влияние и антропогенные факторы. Около 1700 лет назад отмечено похолодание и снижение продуктивности озерной экосистемы. С наступлением индустриального периода отмечается усиление влияния антропогенных факторов. Так, накопление фосфора, а также хрома, кобальта, марганца, железа, меди и свинца, помимо климатических колебаний, связано и с антропогенными факторами. При этом накопление в донных отложениях свинца демонстрирует наибольшую вероятность антропогенного воздействия. Показано, что в разные периоды голоцена скорость седиментации была различной и менялась от 0,03 до 0,16 мм в год. Самая низкая скорость осаждения характерна для центральной части озера в современный период. За последние 1300 лет сформировалось всего около 3 см осадка. При этом на скорость седиментации и накопление органического вещества в Ладожском оз. влияют в основном природные факторы. Показано, что история деятельности человека началась с первых поселений на побережье Ладоги около 10500 лет назад. Полученные данные позволяют датировать начало земледелия на водосборе Ладожского оз. около 5000–4000 лет до нашей эры, т.е. более ранним периодом, чем это считалось ранее. В связи с распространением земледелия начался процесс масштабной вырубки лесов, изменения ландшафтов и деградации почв.

Глава 4. Факторы воздействия водосбора

Любой водный объект (река, озеро, водохранилище) и его водосбор являются единой природной системой [Драбкова, Сорокин, 1976]. Состояние и развитие водоема в значительной степени зависит от поступлений воды, взвешенных и влекомых наносов, а также растворенных примесей с водосбора, формирующих внешнюю нагрузку и последующий массоперенос на акватории. Количественная оценка внешней нагрузки на Ладогу и основных ее составляющих выполнена в предшествующих исследованиях Института озероведения РАН [Кондратьев, 2007] и представлена в [Ладога, 2013]. На рис. 4.1 проиллюстрирована структура фосфорной нагрузки на Ладожское оз., которая за последние годы не сильно изменилась.



Рис. 4.1 – Долевой вклад различных источников в формирование фосфорной нагрузки на Ладожское оз. [Кондратьев, 2007]

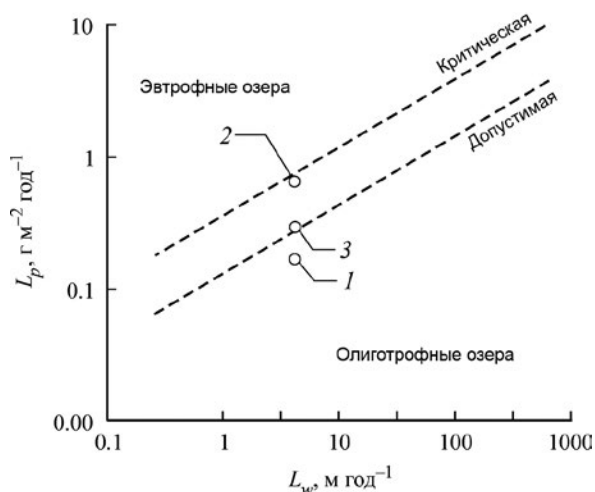


Рис. 4.2 – Трофический статус озер в зависимости от фосфорной (L_p) и водной (L_w) нагрузок, а также фосфорная нагрузка на Ладожское оз. в 1959–1962 гг. (1), 1976–1982 гг. (2), 1996–2001 гг. (3)

На рис. 4.2 приведена диаграмма Фолленвейдера [Vollenweider, 1975], представляющая собой разграничение между олиготрофными, мезотрофными и эвтрофными озерами в зависимости от притока воды (L_w) и фосфорной нагрузки (L_p). Диаграмма может служить основой для приближенного расчета значений допустимой фосфорной и водной нагрузок, при которых озеро сохраняется олиготрофным, а также значения критической нагрузки, после превышения которой происходит переход в эвтрофное состояние. Здесь же показаны значения фосфорной нагрузки на Ладожское оз. в 1959–1962, 1976–1982 и 1996–2001 гг. [Расплетина, 1984].

В настоящем разделе описаны результаты исследований формирования стока с водосбора и отдельных компонентов внешней нагрузки на Ладогу в зависимости от климатических факторов и хозяйственной деятельности. Также представлены результаты количественной оценки стока наносов в озеро, сделанные впервые. Следует иметь в виду, что натурные наблюдения за процессами массопереноса в системе водосбор-водоток-водоем трудоемки, дорогостоящи, а часто и невозможны. В такой ситуации привлечение методов математического моделирования является эффективным инструментом не только теоретического исследования процессов, но и практического решения задач, связанных с охраной и рациональным использованием ресурсов водных объектов.

4.1 Сток с водосбора в условиях меняющегося климата

В настоящем разделе представлены результаты модельной оценки параметров распределения слоя стока с водосбора Ладожского оз. и р. Невы для условий конца 21-го века с учетом возможных изменений климатических параметров (осадков и температуры воздуха). В качестве инструмента решения настоящей задачи использованы методы детерминированно-стохастического (ДС) моделирования, в котором задействованы модель формирования стока на водосборе ILHM (Institute of Limnology Hydrological Model) и стохастическая модель погоды SWM (Stochastic Weather Model) [Кондратьев, Шмакова, 2015; 2019].

Модель ILHM разработана в Институте озераведения РАН [Свидетельство о государственной регистрации №2015614210, 2015] и предназначена для расчетов гидрографов талого и дождевого стока с водосбора, а также уровня воды в водоеме. Модель имеет концептуальную основу и описывает процессы снегонакопления и снеготаяния, испарения и увлажнения почв зоны аэрации, формирования стока, а также регулирование стока водоемами в пределах однородного водосбора, характеристики которого принимаются постоянными для всей его площади. Модель может работать как с месячным, так и с годовым шагом по времени. В процессе моделирования водосбор представляется в виде однородной имитирующей емкости, накапливающей поступающую воду и затем постепенно ее отдающей. Значения основных параметров модели, определяющих форму гидрографа стока, могут задаваться в зависимости от озерности [Кондратьев, 2007; Кондратьев, Шмакова, 2019; Кондратьев и др., 2010]. Схема модели представлена на рис. 4.1.1.

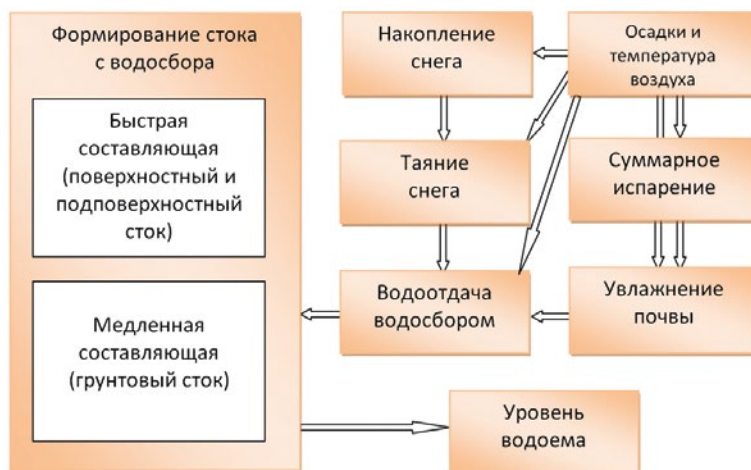


Рис. 4.1.1 – Схема гидрологической модели ILHM

Стохастическая модель погоды SWM [Свидетельство о государственной регистрации №2015614228, 2015; Виноградов, 1988; Шмакова, 2000] служит основой для ДС моделирования характеристик стока, обеспечивая поток метеорологической информации на вход различных математических моделей в программном комплексе. Модель погоды состоит из двух основных блоков, выполняющих:

- 1) оценку параметров распределения суточных, месячных и годовых рядов метеорологических элементов по данным натурных наблюдений на выбранных метеостанциях,
- 2) генерирование рядов метеорологических элементов требуемой продолжительности.

Ориентация на данные метеорологических наблюдений в качестве основы ДС моделирования объясняется тем, что, как правило, ряды измеренных метеорологических параметров существенно более продолжительны, чем стоковые ряды и ряды измеренных значений выноса примесей с водосбора и их транспорта в водоеме [Шмакова, Кондратьев, 2014; Кондратьев, Шмакова, 2019]. Структура SWM приведена на рис. 4.1.2.

Моделирование стока в условиях возможного изменения климата проводилось по следующим основным этапам.

1. Оценка параметров стохастической модели погоды SWM для наблюдаемых рядов метеорологических элементов в изучаемом регионе (среднесуточная температура воздуха, суточные суммы осадков, факт выпадения осадков) по данным наблюдений.
2. Генерирование рядов метеорологических элементов требуемой длины с параметрами, соответствующими современным климатическим условиям.
3. Пересчет суточных значений метеорологических элементов в средне-месячные значения.
4. Моделирование месячных слоев стока с водосбора по детерминированной модели формирования стока ILHM.

5. Построение кривой распределения значений слоя стока с изучаемого водосбора в современных климатических условиях. Оценка параметров распределения слоя стока (среднего значения, среднего квадратичного отклонения и значений различной обеспеченности превышения).
6. Оценка средних значений климатических параметров на момент окончания климатического прогноза.
7. Повторение шагов со второго по пятый с новыми характеристиками рядов климатических параметров, соответствующих заданным сценариям изменения климата.



Рис. 4.1.2 – Схема стохастической модели погоды SWM

Итогом ДС моделирования в данной задаче является набор кривых распределения и их параметров (среднего значения, среднего квадратичного отклонения и значений различной обеспеченности превышения) для суточных слоев осадков и среднемесячных слоев стока с изучаемого водосбора в современных условиях, а также при заданных климатических изменениях.

Оценка параметров SWM в современном климате проведена по данным наблюдений трех метеостанций, расположенных на территории водосбора Ладожского оз. и р. Невы – Сортавала, Петрозаводск и Тихвин, для периода с 1970 по 2010 г. Полученные значения параметров стали основой для генерирования метеорологических рядов среднесуточной температуры воздуха и суточных слоев осадков продолжительностью 100 лет, которые затем по-

ступали на вход гидрологической модели ILHM, являющейся детерминированной составляющей ДС моделирующей системы.

На рис. 4.1.3 приведены рассчитанные и наблюдаемые слои стока с водосбора Ладожского оз. и р. Невы в створе Новосаратовка. Среднее относительное отклонение между наблюдаемыми и рассчитанными среднесезонными расходами воды составило 6% по отношению к наблюдаемым значениям. Значение критерия Нэша – Сатклиффа – 77%, что подтверждает адекватность модели описываемым процессам формирования стока на водосборе.

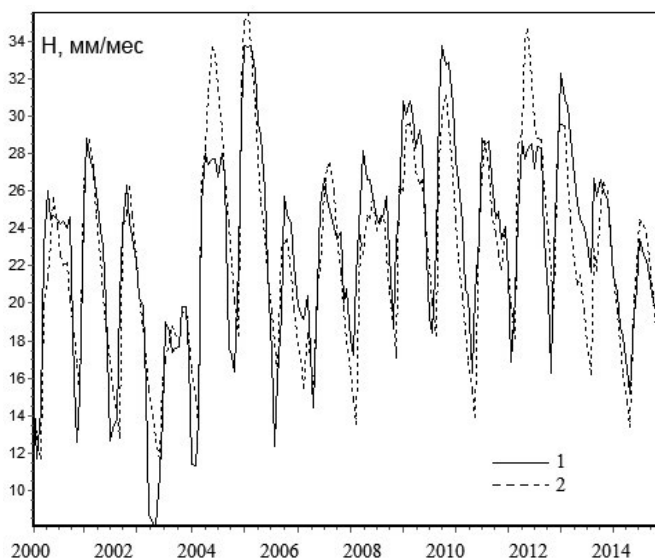


Рис. 4.1.3 – Наблюдаемые (1) и рассчитанные (2) среднесезонные слои стока с водосбора Ладожского оз. и р. Невы – створ Новосаратовка

Для оценки возможных изменений стока в будущем принят детерминированный сценарий климатических изменений, разработанный совместными усилиями сотрудников Института физики атмосферы, Главной геофизической обсерватории и Института озероведения именно для водосбора Ладожского оз. [Голицын и др., 2002]. В табл. 4.1.1 приведены значения изменений среднесезонной температуры воздуха и месячных сумм осадков, на которые, согласно упомянутому выше сценарию, изменятся эти метеорологические величины в конце 2100 года по отношению к современным условиям на водосборе.

Таблица 4.1.1

Изменения среднесезонной температуры воздуха и месячных сумм осадков к концу 2100 г. по отношению к современным их значениям

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Осадки, мм/мес.	28,91	20,94	13,61	4,56	7,45	-7,47	-1,59	-9,62	1,51	-2,06	31,51	21,89
Температура воздуха, °С	5,06	6,73	5,84	5,27	2,47	2,36	2,89	3,51	3,56	5,36	5,51	6,27

В параметры SWM внесены изменения, соответствующие значениям осадков и температуры воздуха в 2100 г., и сгенерированы ряды прогнозных значений среднесуточной температуры воздуха и суточных слоев осадков продолжительностью 100 лет для условий 2100 г. После чего выполнено моделирование формирования стока для данных климатических условий. Результатом расчетов явились прогнозные функции распределения среднемесячных значений стока (расходов воды или слоев стока). На рис. 4.1.4 представлены рассчитанные кривые распределения годовых слоев стока в современных условиях и в конце XXI века.

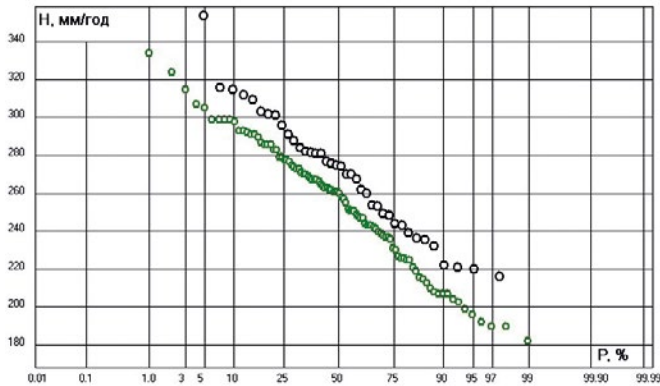


Рис. 4.1.4 – Кривые распределения наблюдаемых (черный цвет) и рассчитанных (зеленый цвет) прогнозных годовых слоев стока для р. Невы – д. Новосаратовка

Значения наблюдаемых и рассчитанных среднегодовых значений осадков, испарения и слоя стока обеспеченности 50% для водосбора Ладожского оз. и р. Невы в створе Новосаратовка для условий 2100 года приведены в табл. 4.1.2.

Таблица 4.1.2

Наблюдаемые и рассчитанные по ДС модели элементы водного баланса обеспеченности 50% бассейна Ладожского оз. и р. Невы в створе Новосаратовка

Элементы водного баланса	Наблюдаемые	Рассчитанные для современных условий	Рассчитанные для условий 2100 года
Осадки, мм/год	654	654	758
Испарение, мм/год	–	386	504
Сток, мм/год	271	269	254

Как видно из рис. 4.1.4. и из табл. 4.1.2, рассчитанные средние значения годового стока составили 271 мм/год для современного периода и 254 мм/год для 2100 г. То есть согласно использованному климатическому сценарию, разработанному для водосбора Ладожского оз. [Голицын и др., 2002], несмотря на существенное увеличение слоя осадков, следует ожидать снижения стока с изучаемого водосбора ориентировочно на 6,3% по отношению к современному периоду. Причиной указанного тренда может являться увеличение испарения за счет потепления, которое компенсирует возрастание осадков.

Таким образом, на основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что предложенный метод прогностической оценки изменений стока с крупного водосбора под воздействием климатических изменений позволяет рассчитать не только общую тенденцию изменения стоковых характеристик, но и оценивать параметры распределения стока в будущем. Перспективы развития ДС моделирования в области изучения процессов стока с водосбора состоят, прежде всего, в совершенствовании методов детерминированной оценки процессов стокообразования на различных частях водосбора и в русловой сети. Прогресс в этом вопросе зависит от существенной перестройки и совершенствования системы мониторинга водных объектов, а также проведения специальных натурных исследований с целью уточнения параметров модели. Перспективы практического использования ДС моделирования заключаются в возможности планирования хозяйственной деятельности на водосборе в соответствии с водностью, а также с учетом изменений условий формирования стока, отсутствия или недостатка данных гидрометрических наблюдений.

4.2 Сток наносов и мутность воды основных притоков Ладожского озера

Концентрация взвешенных веществ является одним из принятых к мониторингу показателей качества воды практически во всех программах контроля по гидрологическим и гидрохимическим показателям многих стран [Гагарина, 2012]. «Взвешенные вещества являются одними из наиболее распространенных контролируемых и регламентируемых показателей качества воды» [Лепихин, 2015]. Наблюдения за стоком наносов на притоках Ладожского оз. в рамках государственного мониторинга практически не проводились. Исключение составляют эпизодические непродолжительные измерения на гидрометрических створах на реках Олонка – г. Олонец (1953 и 1956 гг.) и Свирь – с. Мятусово (1945 и 1948 гг.), которые за основу оценки стока наносов с водосбора Ладоги быть приняты не могут. В этой связи при решении задачи количественной оценки поступления наносов в Ладожское оз. с речным стоком для каждого притока проведен подбор реки-аналога.

Схема расположения основных притоков Ладоги, для которых оценивались сток наносов и мутность воды, приведена на рис. 4.2.1. Их общая площадь водосборов составляет 248232 км², или 88% всей площади водосбора Ладожского оз. [Ресурсы..., 1972]. Из этого следует, что продукты почвенной эрозии водосбора и русловых переформирований поступают в водоем преимущественно со стоком притоков. Основные характеристики рассматриваемых рек содержатся в табл. 4.2.1.

Основными критериями соответствия при таком подборе послужили уклон, крупность донных отложений, площадь водосбора и водность. В табл. 4.2.2 приведен список гидрометрических створов основных притоков и соответствующие им аналоги с указанными выше характеристиками. Поскольку на р. Олонке редкие наблюдения за стоком наносов проводились в основном в периоды межени и средней водности, для этого водотока также назначен аналог.

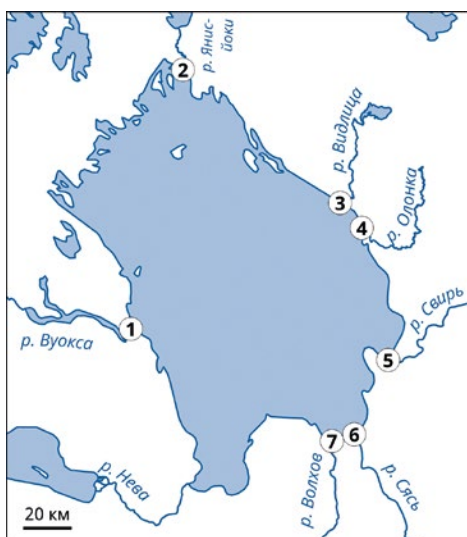


Рис. 4.2.1 – Расположение основных притоков

Таблица 4.2.1

Основные притоки Ладожского оз. и их характеристики

№	Приток	Длина водотока, км	Площадь водосбора, км ²	Среднеголетний расход воды, м ³ /с	Средний уклон водотока, б/р
1	Вуокса	143	68 501	645	0,00043
2	Янисйоки	95	3 861	45,5	0,00065
3	Видлица	67	1 320	11,8	0,001087
4	Олонка	87	2 620	35,0	0,00076
5	Свирь	224	84 400	790	0,000134
6	Сясь	260	7 330	63,7	0,00093
7	Волхов	224	80 200	590	0,000625

Таблица 4.2.2

Основные притоки Ладожского оз. и их аналоги

Реки и гидрометрические створы		Площадь водосбора, км ²		Уклон, б/р		Донный грунт в створе	
Притоки Ладожского оз.	Реки-аналоги	Приток Ладоги	Река-аналог	Приток Ладоги	Река-аналог	Приток Ладоги	Река-аналог
Вуокса – Х ГЭС	р. Мста – с. Березовский Рядок	61 500	5 180	0,000430	0,00066	песок, галька, валуны	галька
Янисйоки – п. Хямекоски	р. Мста – с. Березовский Рядок	3 650	5 180	0,00065	0,00066	камни, галька	галька
Видлица – с. Б. Горы	р. Паша – с. Часовенское	977	5 710	0,001087	0,0009	песок	песок
Олонка – г. Олонец	р. Мга – д. Горы	2 120	709	0,00076	0,00061	песок, валуны	песок, галька

Реки и гидрометрические створы		Площадь водосбора, км ²		Уклон, б/р		Донный грунт в створе	
Притоки Ладожского оз.	Реки-аналоги	Приток Ладоги	Река-аналог	Приток Ладоги	Река-аналог	Приток Ладоги	Река-аналог
Свирь – XII ГЭС	р. Нева г. Петрокрепость	67100	–	0,000134	0,0005	песок, ил	песок, камни
Сясь – д. Яхново	р. Оять – д. Шангиничи	6230	4930	0,00093	0,00097	песок, валуны	песок
Волхов – VI ГЭС	р. Нева – г. Петрокрепость	79800	–	0,0000625	0,0005	песок, гравий, валуны	песок, камни

Расчеты твердого стока и мутности воды притоков проводились по разработанной в ИНОЗ РАН стохастической модели годового твердого стока [Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014612518]. Схема модели представлена на рис. 4.2.2 [Шмакова, 2018].

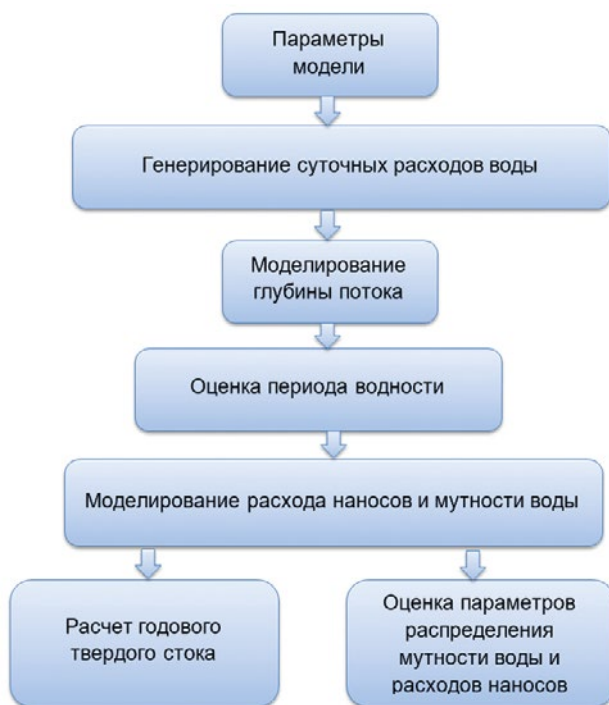


Рис. 4.2.2 – Схема стохастической модели годового твердого стока

Модель основана на композиционном методе теории вероятности и аналитической формуле расхода наносов. Композиционный метод теории вероятности позволяет оценить параметры распределения функции через параметры распределения аргументов. Аргументами модели являются расход воды и средняя глубина потока, функцией – расход наносов. При этом кривые распределения суточных расходов воды обеспечены, как правило, достаточно продолжительными и надежными рядами наблюдений. Модель

позволяет оценить статистические параметры мутности воды, а также годовые значения стока наносов при отсутствии данных наблюдений за расходами наносов. Кроме того, модель может быть использована для рек, по которым отсутствуют данные наблюдений за расходами воды и наносов. В этом случае параметры распределения расходов воды оцениваются по картам нормы стока или рекам-аналогам.

Оценка стока наносов основных притоков Ладожского оз. состоит из следующих этапов расчета:

1. Выбор рек-аналогов для основных притоков Ладоги, перечисленных в табл. 4.2.2, по схожим гидравлическим характеристикам гидротехнических створов (водность, уклон русла и крупность донных отложений) водотоков северо-запада.
2. Калибровка параметров расчетной формулы общего расхода наносов для рек-аналогов для различных периодов водности.
3. Аппроксимация функциональной зависимости поля точек связи «расход – уровень» для притоков.
4. Оценка параметров распределения суточных значений расхода воды притоков.
5. Оценка параметров распределения годового стока наносов и мутности воды основных притоков.

Среднее относительное отклонение между рассчитанными и наблюдаемыми значениями расхода наносов по всем водотокам составило 62% (минимальное значение отклонения – 34%, максимальное – 93%). Среднее относительное отклонение наблюдаемых и рассчитанных значений расхода наносов для р. Олонки – створ г. Олонец с принятыми параметрами реки-аналога для периода большой водности составило 59%, что дало основание полагать выбор реки-аналога для этого водотока удачным.

Для каждого водотока сгенерирован ряд значений суточных расходов воды продолжительностью 100 лет, который был пересчитан в расход наносов и мутность воды. В качестве количественных ориентиров при расчетах мутности воды приняты данные наблюдений на исследуемых водотоках, проводимых сотрудниками ИНОЗ РАН в период 2011–2019 годы (табл. 4.2.3) [Разработка..., 2018].

Таблица 4.2.3

Средние значения измеренной мутности воды в притоках Ладожского оз.

Река	Количество измерений	Средняя мутность воды по наблюдениям 2011–2019 гг., мг/л
Вуокса	25	2,9
Янисйоки	26	2,3
Видлица	26	3,3
Олонка	26	9,5
Свирь	26	4,3
Сясь	26	6,6
Волхов	27	10,8

Параметры стохастической модели годового стока наносов (среднегодовой среднесуточный расход воды $Q_{\text{ср}}$ и коэффициенты вариации и асимметрии C_v), а также рассчитанные параметры распределения мутности воды $S_{\text{ср}}$ (средние значения и средние квадратичные отклонения σ) и значение годового стока наносов $R_{\text{ср}}$ для гидрометрических створов основных притоков Ладожского оз. приведены в табл. 4.2.4. Также в таблице содержатся данные о годовом стоке наносов $R_{\text{устье}}$ для устьевых участков притоков и модуль годового стока воды M , т/(км²· месяц). Согласно [Мозжерин, Мозжерин, 2011], при отсутствии данных гидрометрических наблюдений на устьевых участках водотоков данные о твердом стоке можно получить приведением значения модуля твердого стока из вышерасположенного створа к площади водосбора устья. При этом отношение площадей водосборов гидрометрического створа и устья не должно превышать 20%. Для шести притоков это требование выдерживается. Исключение составляет р. Видлица – створ с. Большие Горы, где площадь всего речного бассейна на 26% больше площади этого гидрометрического створа. Но ввиду того, что данных о твердом стоке р. Видлицы в нижнем течении и ее основного притока р. Новземы нет, принято допущение о восстановлении данных о стоке наносов аналогично схеме, приведенной выше. Смоделированные значения средней мутности воды по всем водотокам превышают средние наблюдаемые значения, что объясняется проведением отбора проб в течение года преимущественно в меженный период и период средней водности.

Таблица 4.2.4

Параметры распределения среднесуточного расхода воды $Q_{\text{ср}}$, годового стока наносов $R_{\text{ср}}$, и мутности воды $S_{\text{ср}}$, для гидрометрических створов и годового стока наносов $R_{\text{устье}}$ для устьевых участков притоков

Основные притоки Ладоги	$Q_{\text{ср}}$, м ³ /с	C_v	C_s	C_s/C_v	$R_{\text{ср}}$, 10 ³ т/год	$S_{\text{ср}}$, г/м ³	$S_{\text{медиана}}$, г/м ³	s	$R_{\text{устье}}$, 10 ³ т/год	M , т/(км ² год)
Вуокса – ХГЭС	545	0,25	1,79	7,16	72,8	3,73 (2,9)	1,67	2,9	81,1	1,18
Янисйоки – п. Хямекоски	46,6	0,58	1,65	2,83	17,3	8,4 (2,3)	6,24	23,7	18,3	5,01
Видлица – Б. Горы	13,7	0,74	2,46	3,33	8,11	11,2 (3,3)	9,5	12,9	10,95	11,21
Олонка – г. Олонец	33,5	1,25	2,66	2,13	27,7	11,5 (9,5)	5,26	13,3	34,3	16,2
Свирь – XII ГЭС	538	0,35	–0,63	–1,8	77,6	4,3 (4,3)	4,1	1,07	97,6	1,16
Сясь – д. Яхново	48,8	1,57	4,53	2,89	54,3	12,0 (6,6)	4,61	16,0	63,9	10,3
Волхов – VI ГЭС	434	0,76	1,15	1,51	73,7	4,2 (10,8)	4,9	0,65	74,1	0,92

Согласно результатам вычислений, приведенным в табл. 4.2.4, с основными притоками, т. е. с 88% водосборной площади, в Ладогу поступает около 380 тыс. т речных наносов в год. Если привести рассчитанное значение к общей площади водосбора, то получится, что за год в озеро поступает 432 тыс. т. При этом сток наносов может быть несколько завышенным, ввиду

того, что в его расчет включены продукты не только склоновой, но и русло-вой эрозии основных притоков Ладожского оз. Средний по водосбору годовой модуль стока наносов равен $1,53 \text{ т}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$, что хорошо соответствует оценке этой величины для рассматриваемой территории, приведенной в монографии [Сток наносов..., 1977].

Основной вклад в поступление наносов в акваторию Ладожского оз. осуществляют водотоки с наибольшей водностью – Свирь, Вуокса и Волхов, на долю которых приходится 253 тыс. т/год, или 59% от общего количества наносов. Однако на эти же водотоки приходится и наименьший годовой модуль стока наносов, что объясняется удержанием наносов зонами подпора перед плотинами ГЭС на этих реках и, как следствие, уменьшением общего расхода наносов.

Анализ результатов расчета годового модуля стока наносов показал хорошее соответствие полученных значений условиям формирования выноса твердого вещества на водосборе и характеристикам слагающих его почво-грунтов. Восточная часть водосбора Ладожского оз. (бассейны рек Свири, Олонки и Видлицы) расположена на южном склоне Балтийского кристаллического щита, рельеф которого характеризуется чередованием скалистых гряд и межгрядовых понижений, заполненных глинами, суглинками и супесями [Алябина, Сорокин, 2010]. Благоприятные для размыва почвы этой территории определяют и сравнительно высокие значения годового модуля стока наносов. Южная часть водосбора (бассейны рек Волхов и Сясь) расположена на Русской равнине. Сельскохозяйственное освоение земель и легкоразмываемые почвообразующие грунты обуславливают достаточно высокие для северо-западного региона значения годового модуля стока наносов, достигающего $10 \text{ т}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$.

Некоторые расхождения между рассчитанными и наблюдаемыми значениями мутности притоков Ладоги объясняются неэквидистантностью данных наблюдений, т.е. большой дискретностью измерений в пределах года. Следствием этого является невозможность учесть внутригодовое распределение измеряемой величины, а также сделанные допущениями в подборе рек-аналогов. Причиной является, как уже отмечалось, ограниченное число рек, на которых проводились продолжительные наблюдения за расходом наносов.

Проведенные расчеты позволяют сделать вывод о том, что годовой сток наносов, поступающий в акваторию Ладоги, составляет около 432 тыс. т/год. Основными источниками наносов являются три крупных притока Ладожского оз. – реки Свирь, Волхов и Вуокса, на долю которых приходится 253 тыс. т/год, или 59% от общего количества наносов, поступивших в озеро. При этом средний по водосбору Ладожского оз. годовой модуль твердого стока составляет $1,53 \text{ т}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$.

4.3 Сельскохозяйственная деятельность на водосборе и сформированная биогенная нагрузка

Интенсификация сельскохозяйственного производства позволяет ускоренными темпами решать задачи продовольственной безопасности и увеличения экспорта сельхозпродукции. Но данный подход неизбежно ведет

к увеличению рисков загрязнения окружающей среды. В современном мировом сельском хозяйстве наращивание объемов производства связано с концентрацией поголовья животных и птицы на мегафермах, увеличением количества сильнодействующих средств подкормки и защиты растений на 1 га пашни, увеличением площадей пашни в регионах с благоприятными условиями для ведения растениеводства. При оценке воздействия на окружающую среду источники делятся на точечные и диффузные. К диффузному воздействию относится совокупность рассеянных источников, влияющих на большие по площади территории, водные и воздушные бассейны. Во многих странах диффузное воздействие на окружающую среду отнесено к трансграничным источникам загрязнения основных компонентов окружающей среды.

Сельскохозяйственное производство признано ХЕЛКОМ одним из основных источников диффузного поступления биогенных элементов в водные объекты. По материалам отчета ХЕЛКОМ 2018 года [HELCOM..., 2018], вклад диффузных источников (главным образом в сельское хозяйство) наибольший и составляет 46% по азоту и 36% по фосфору от их общего поступления с реками в Балтийское море.

Водосбор Ладожского оз. не является исключением, так как на данной территории имеется достаточно развитое сельскохозяйственное производство с множеством крупных животноводческих комплексов. В настоящем разделе рассматриваются сельскохозяйственные предприятия, сгруппированные в следующих границах российской части водосбора (рис. 4.3.1):

- российская часть водосбора Ладоги, включающая бассейны всех впадающих притоков, в том числе р. Свирь от ее истока из Онежского оз. и р. Волхов от ее истока из оз. Ильмень, но без водосборов озер Ильмень и Онежского;

- водосбор Онежского оз.;
- водосбор оз. Ильмень.

В целом территория водосбора Ладожского оз. находится в благоприятной природно-климатической зоне для ведения сельскохозяйственного производства. Средняя температура воздуха колеблется от 5 до 7 °С. Зима умеренно-холодная. Среднее число дней со снежным покровом от 150–160 в восточных и северо-восточных районах до 100–130 в юго-западных. Высота снежного покрова достигает 40–60 см. В теплые зимы в отдельных областях снежный покров в течение зимы держится около 10 см. Почва промерзает в среднем на 40–50 см, а в отдельные зимы – более чем на 100 см. Количество безморозных дней колеблется от 75 на западе до 145 на востоке (табл. 4.3.1). Сумма годовых осадков 500–700 мм, в т.ч. в теплый период (апрель – октябрь) – около 400 мм. В отдельные годы количество осадков значительно колеблется – от 100 до 900 мм. В теплый период – около 70 дней – осадков выпадает больше 1 мм в день. Часты затяжные прохладные весны, дождливые летние месяцы и дождливая осень. В целом для климата территории характерен высокий гидротермический коэффициент, т.е. существенное превышение количества осадков над величиной испарения, особенно во время весеннего сева и уборочных работ.



Рис. 4.3.1 – Схема водосборных территорий, для которых выполнялась оценка сельскохозяйственной биогенной нагрузки

Таблица 4.3.1

Природно-климатические условия на водосборе Ладожского оз.

Показатели	Значения
Среднегодовое количество осадков, мм	500–700
Продолжительность периода полевых работ, дн.	145–174
Продолжительность безморозного периода, дн.	75–145
Дата начала полевых работ	20.04–05.05
Дата окончания полевых работ	26.09–10.10
Вероятность получения зерна кондиционной влажности при уборке	0,10
Средний расчетный класс длины гона, м	200–300
Удельный вес (%) пашни с длиной гона менее 400 м, в том числе менее 200 м	65,4 19,3
Удельный вес (%) пашни с углом склона более 5° в том числе с углом склона более 7°	11,4 4,0

Показатели	Значения
Площадь пашни, засоренная камнями, %	45,0
в том числе имеющая сильную засоренность, %	7,0
Удельный вес полей, имеющих сложную конфигурацию, %	29,6
Распределение площади пашни по механическому составу, %	
– легкие (супесчаные и песчаные)	36,9
– средние (средне- и легкосуглинистые)	59,6
– тяжелые (глинистые и тяжелосуглинистые)	3,5
Среднее значение удельного сопротивления, МПа	0,046
Средняя группа норм выработки:	
– на пахотные работы	6
– на непашотные работы	4

Высокий гидротермический коэффициент определяет «промывной» водный режим территорий, который в сочетании с выщелоченностью пород и воздействием кислых продуктов разложения органического вещества в почве ведет к формированию подзолистого типа грунта, абсолютно преобладающих на водосборе (около 70%). Таким образом, влагообеспеченность региона является фактором высокой и устойчивой урожайности лишь в сочетании с правильной системой агротехнических мероприятий.

Несравненно резче, чем по условиям увлажнения, климат на водосборе дифференцируется по теплообеспеченности природных районов. Длительность активно-вегетационного периода в пределах водосбора колеблется от 130–140 до 60–70 дней, а сумма температур за этот период – от 2 100 до 600–800 °С. На северных окраинах по-летнему теплый период со среднесуточными температурами выше +15 °С продолжается до 20 дней, а на юго-западе – 60–70 дней. Такие сильные различия теплообеспеченности на территории водосбора определяют, прежде всего, условия вызревания культур (в связи с чем требуется рациональный подбор не только сортового, но и видового их состава), на условиях интродукции культур, требовательных к тепловому режиму, а также на структуре посевных площадей, специализации и размещении производства. Агроклиматические условия и соответствующее им состояние почв и посевов сельскохозяйственных культур определяют оптимальные сроки проведения полевых работ. Различие в сроках сева и уборки достигает 25–30 дней.

На водосборе преобладают подзолистые и дерново-подзолистые почвы различного механического состава, бедные питательными веществами. Наиболее распространены почвы поверхностного увлажнения, формирующиеся в условиях равнинного рельефа и слабого дренажа. Реже встречаются почвы грунтового увлажнения, развивающиеся в условиях пониженного рельефа при высоком уровне грунтовых вод. В среднем около трети пахотных почв относятся к категории избыточно-увлажненных.

Из-за изрезанности лесами, болотами и открытыми осушительными канавами размеры полевых участков, в особенности сенокосных, невелики (0,5–30 га), очертания участков в значительной части (29,6%) неправильные, средняя длина гона 200–300 м. Рельеф в основном равнинный, удельный вес пахотных участков с углом склона более 5° не превышает 11,4%,

засоренность пахотных площадей камнями – 45%. В отдельных хозяйствах такие почвы нередко занимают 60–70% общей площади сельскохозяйственных угодий.

В целом почвенно-климатические условия территории водосбора Ладожского оз. благоприятны для интенсивного ведения сельскохозяйственного производства и, прежде всего, для производства зерновых, картофеля, овощей, льна, молока и мяса различных видов. В то же время высокие и устойчивые урожаи могут быть получены только при систематическом внесении органических, минеральных удобрений, а также известковых материалов. В силу особенностей природно-климатических условий на большей части территории агропромышленный комплекс развит неравномерно. Сельское хозяйство специализируется преимущественно на животноводстве и особенно на молочно-мясном. Основными сельскохозяйственными культурами являются зерновые культуры, картофель и овощи. Земледелие развито в Псковской, Новгородской областях и южных районах Ленинградской. Основными производителями продукции сельского хозяйства на рассматриваемой территории являются сельскохозяйственные организации, доля которых в производстве зерна в 2014–2016 гг. составила более 90%, мяса скота и птицы (в живом весе) более 87%, молока – 78%, и яиц – более 96%.

По объему валовой продукции на животноводство приходится более 80%. Начиная с 2000-х годов наблюдается тенденция к укрупнению ферм крупного рогатого скота (КРС) с переходом на беспривязную систему содержания и внедрение доильных залов, позволяющую снизить себестоимость производства молока. Однако при этом зачастую не учитывается экологическая составляющая. Крупные комплексы создают большой риск негативного воздействия на окружающую среду, существенно возрастают объемы полужидкого и жидкого навоза, который образуется в результате минимального использования подстилки и объединения навоза со стоками доильных залов. Учитывая мелкоконтурность и разрозненность сельхозугодий, дальность перевозок навоза достигает 50 км.

Свиноводство также является одним из приоритетных направлений развития агропромышленного комплекса (АПК) на рассматриваемой территории. Наиболее развита эта подотрасль в Ленинградской и Псковской областях. Экономическая эффективность производства свинины достигается только на крупных комплексах, поэтому основной курс взят на создание крупных свинокомплексов. Однако экологическая составляющая таких комплексов имеет существенные недостатки. Первое: большие объемы жидкого навоза. На свинокомплексе с единовременным содержанием 100 тыс. свиней образуется более 300 тыс. т в год жидкого навоза. Второе: практически все действующие свинокомплексы не имеют достаточного количества земли для утилизации навоза, а ряд комплексов и вовсе не имеют ни одного гектара земли для утилизации навоза. Эти обстоятельства ведут за собой большие риски загрязнения окружающей среды вблизи таких комплексов, в особой степени водных объектов.

Аналогичная ситуация складывается в птицеводстве. Более 65% поголовья птицы северо-запада РФ сосредоточено в Ленинградской обл. обследо-

вание птицефабрик Ленинградской области показало, что вопрос утилизации помета стоит крайне остро, для его утилизации в качестве органических удобрений требуется около 55 тыс. га, а в наличии всех птицефабрик имеется только около 7–9 тыс. га земель. Птицефабрики вынуждены организовывать транспортировку собственных органических удобрений по другим сельхозпредприятиям. В целом ежегодно образуется около 6500 тыс. т навоза и помета в пределах всего водосбора из них на собственном водосборе Ладожского оз. – 3366 тыс. т, водосборе оз. Ильмень – 2500 тыс. т, и на водосборе Онежского оз. – 634 тыс. т.

Общая площадь под посев сельскохозяйственных культур составляет около 248 тыс. га, из них на собственном водосборе Ладожского оз. – 36 тыс. га, водосборе оз. Ильмень – 184,5 тыс. га, и на водосборе Онежского оз. – 27,5 тыс. га. Учитывая, что основной специализацией на рассматриваемой территории является животноводство, на большей части земель выращиваются многолетние и однолетние травы, зерновые и прочие растительные культуры для заготовки кормов животным.

Одним из важнейших факторов, влияющих на урожайность сельхозкультур, является плодородие почвы. Динамика изменения плодородия почв сельхозземель свидетельствует об ее ухудшении. Такая ситуация складывается в результате использования интенсивных технологий и недостаточного восполнения плодородия почвы, которое должно осуществляется за счет агротехнических мероприятий и использования достаточных объемов органических и минеральных удобрений. Одним из основных агрохимических показателей плодородия почвы является наличие таких элементов питания, как азот (N), фосфор (P), калий (K), и других микроэлементов. Для обеспечения воспроизводства почвенного плодородия необходимо обеспечить возврат питательных элементов, перешедших в урожай сельхозкультур, в почву за счет применения органических и минеральных удобрений с учетом исходных характеристик почвы и вида выращиваемых культур. Согласно рекомендациям ХЕЛКОМ, что соответствует и российским нормативам, среднее значение внесения N и P с органическими и минеральными удобрениями не должно превышать 170 кг/га и 25 кг/га в год соответственно. На собственном водосборе Ладожского оз. в пределах Ленинградской обл. эти показатели составляют N – 289,7 кг/га, P – 56,6 кг/га, на водосборе Онежского оз. N – 142,1 кг/га, P – 25,6 кг/га; на водосборе оз. Ильмень N – 73,9 кг/га, P – 14,4 кг/га.

Важной характеристикой для определения биогенной нагрузки от сельскохозяйственного производства на ближайшие водные объекты является тип и механический состав почв сельхозземель. В зависимости от них изменяется количество вымываемых из почвы биогенных веществ и фильтрующая/удерживающая способности почвы при внесении питательных элементов в составе органических и минеральных удобрений. Для оценки вымывания N и P принято подразделять почвы сельскохозяйственных земель по типу почв: дерново-подзолистые, карбонатные и торфянистые; по механическому составу: тяжелые (глинистые и суглинистые) и легкие (песчаные и супесчаные). Характеристики почв на рассматриваемых территориях представлены в табл. 4.3.2.

Таблица 4.3.2

Характеристики почв сельхозугодий на водосборных участках Ладожского оз.

№ п.п.	Водосборный участок	Субъекты	Район	Тип почв	Мех. состав почв
1	Ладожское оз.	Ленинградская обл.	Лодейнопольский	ДП,	Л, Т
			Волховский	ДП, ДК, ТР	Т, Л
			Кировский	ТР, ДП	Т
			Тихвинский	ДП	Т, Л
			Тосненский	ТР, ДП	Т
			Всеволожский	ТР, ДП	Т
			Приозерский	ДП	Л, Т
		Респ. Карелия	Лахденпохский	ДП	Л
			Сортавальский	ДП	Л
			Питкярантский	ДП	Л
			Олонецкий	ДП	Л
7	Онежское оз.	Республика Карелия	Кондопожский	ДП	Л, Т
			Медвежьегорский	ДП	Л, Т
			Олонецки	ДП, ТР	Л, Т
			Прионежский	ДП, ТР	Л, Т
			Пряжинский	ДП	Л, Т
			Пудожский	ДП	Л, Т
		Вологодская обл.	Вытегорский	ТР	Л, Т
		Ленинградская обл.	Подпорожский	ТР	Л, Т
	оз. Ильмень	Новгородская обл.	Чудовский р-н	ДП	Л
			Маловишерский	ДП, ТР	Л
			Любытинский р-н	ДП	Л
			Хвойнинский р-н	ДП	Л
			Пестовский р-н	ДП, ТР	Л
			Мошенский р-н	ДП, ТР	Л
			Боровичский р-н	ДП, ТР	Л
			Окуловский р-н	ДП, ТР	Л
			Валдайский р-н	ДП, ТР	Л
			Демянский р-н	ДП, ТР	Л
			Марёвский р-н	ДП	Л
			Холмский р-н	ДП	Л
			Поддорский р-н	ДП	Л
			Волотовский р-н	ДП	Л
			Солецкий р-н	ДП	Л
			Шимский р-н	ДП	Л
			Батецкий р-н	ДП	Л
			Новгородский р-н	ДП	Л

№ п.п.	Водосборный участок	Субъекты	Район	Тип почв	Мех. состав почв
	оз. Ильмень	Новгородская обл.	Крестецкий р-н	ДП	Л
			Парфинский р-н	ДП	Л
			Старорусский р-н	ДП	Л
		Псковская обл.	Плюсский	ДП, ТР	Л
			Стругокрасненский	ДП, ТР	Л
			Порховский	ДП, ТР	Л
			Дновский	ДП, ТР	Л
			Дедовичский	ДП, ТР	Л
			Бежаницкий	ДП, ТР	Л

* ДП – дерново-подзолистые; ДК – дерново-карбонатные; ТР – торфянистые; Л – легкие; Т – тяжелые.

Эффективным инструментом расчета нагрузки, сформированной на полях сельхозпредприятий, является метод, предложенный специалистами ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ [Брюханов, 2016; 2018]. Он позволяет давать оценку снижения биогенной нагрузки при использовании наилучших доступных технологий ведения сельскохозяйственного производства. Расчетная зависимость имеет следующий вид:

$$L_{agr} = 10^{-3} \sum_{i=1}^{n_i} A_i (M_{soil\ i} K_1 + (\alpha_1 M_{min\ i} + \alpha_2 M_{org\ i}) K_6) K_2 K_3 K_4 K_5, \quad (4.3.1)$$

где L_{agr} – нагрузка на водосбор, сформированная в результате сельскохозяйственной деятельности, т/год; $M_{soil\ i}$, $M_{min\ i}$ и $M_{org\ i}$ – содержание биогенного вещества в пахотном слое почвы, а также дозы внесения минеральных и органических удобрений на поля i – го сельхозпредприятия, кг/га; A_i – площадь угодий i – го сельхозпредприятия, га; n_i – количество сельхозпредприятий; α_1 – коэффициент, учитывающий усвоение минеральных удобрений сельхозкультурами; α_2 – коэффициент, учитывающий усвоение органических удобрений сельхозкультурами; K_1 – коэффициент, характеризующий вынос биогенных веществ из пахотного слоя почв; K_2 – коэффициент удаленности контура сельскохозяйственных угодий от гидрографической сети; K_3 – коэффициент, характеризующий тип почв (по происхождению); K_4 – коэффициент, характеризующий механический состав почв; K_5 – коэффициент, учитывающий структуру сельхозугодий, то есть соотношение площадей пашни, многолетних трав, лугов, пастбищ; K_6 – коэффициент, учитывающий использование наилучших доступных технологий применения органических и минеральных удобрений. Все коэффициенты безразмерные.

Достоинством метода является расчет выноса биогенных веществ не только исходя из доз внесения удобрений и выноса азота и фосфора с урожаем, но и в зависимости от типов почв сельскохозяйственного водосбора, их механического состава, удаленности поля от водного объекта.

Ниже приведена процедура сбора исходной информации, необходимой для выполнения расчетов по уравнению (4.3.1).

Вынос азота и фосфора с сельскохозяйственных территорий зависит от специализации сельхозпредприятия, типа и структуры почв, севооборота (распределение площадей, находящихся под паром и покровными культурами), от технологий и вида применяемых минеральных и органических удобрений. Рассматриваются два основных источника эмиссии азота и фосфора – почва и удобрения (минеральные и органические). Расчет эмиссии биогенных элементов из почв сельхозугодий ведется с учетом глубины пахотного и корнеобитаемого горизонта, который для рассматриваемой территории составляет 20–25 см. Количество поступающих азота и фосфора определяется по площадям сельхозугодий (га) сельхозорганизаций, крестьянско-фермерских и личных подсобных хозяйств населения. При этом на всех рассматриваемых субъектах доля сельхозугодий, принадлежащих сельхозорганизациям, составляет 92–95%. Потенциальная эмиссия азота и фосфора рассчитывается как сумма масс веществ, внесенных удобрениями, и почвенных запасов с учётом коэффициентов, учитывающих долю их возможной эмиссии. Данные коэффициенты определяются с учетом типа почв, среднего выноса питательных элементов с урожаем и иммобилизации азота и фосфора в почве. Для определения коэффициентов, учитывающих долю эмиссий азота и фосфора за основу по типу почв приняты характеристики дерново-подзолистых почв как наиболее распространенных на рассматриваемых водосборных территориях. Средний вынос питательных веществ с урожаем принят по азоту – 120 кг/га, по фосфору – 17,6 кг/га [Справочник..., 1976].

Существенное влияние на эмиссию азота и фосфора оказывает количество органических и минеральных удобрений, используемых на водосборных территориях. При определении масс азота и фосфора, поступающих с минеральными и органическими удобрениями, использованы официальные данные статистики по АПК и конкретным сельхозпредприятиям, нормативные и справочные материалы, утвержденные и частные методики расчетов [Брюханов и др., 2014; Снижение..., 2010]. Обобщенные исходные данные по рассматриваемым участкам представлены в табл. 4.3.3.

Таблица 4.3.3

**Исходные данные для расчета биогенной нагрузки
от сельскохозяйственного производства**

Водосборный участок	Поголовье, тыс. гол.					Общее количество навоза, тыс. т/год	Содержание азота и фосфора в навозе, т/год		Площадь сельхозугодий, тыс. га	Использование мин. удобрений, тонн действующего вещества	
	КРС	Птица	Свины	Овцы, козы	Лошади		N	P			
Ладожское оз.	36,7	8714	56,8	6,1	0,44	3367	18984	3648	36,05	37,9	10,23
Онежское оз.	20,6	493,1	10,2	2,8	0,06	639	3100	53,8	27,5	30,7	5,95
оз. Ильмень	44,5	5971,6	204,6	24,4	1,15	2500	11725,8	2281	184,3	22,2	5,68

При определении выхода навоза учтены методы его удаления, а также попадание в него технологической воды и подстилки. Коэффициенты для расчетов приведены в табл. 4.3.4 [Брюханов и др., 2014]. Усредненные значения содержания азота и фосфора в органических удобрениях, полученных по используемым в настоящее время технологиям, представлены в табл. 4.3.5.

Таблица 4.3.4

Суточный выход навоза на предприятии

Вид животных	Технология, тип хозяйства	Выход навоза, кг/сут.	Обозначение
КРС	привязное содержание	97X	X – количество дойных коров
	беспривязное содержание	109X	
Свиньи	хозяйства с законченным циклом	8,4 X	X – общее поголовье свиней на предприятии
	репродукторные хозяйства	7,3 X	
	откормочные хозяйства	10,25X	
Птица	птицефабрики яичного направления	0,13X+0,12x	X – число кур промышленного стада (взрослая птица), x – ремонтный молодняк (10–12 недель)
	бройлерные птицефабрики, содержание на полу	0,11X	X – число голов бройлеров
	бройлерные птицефабрики, содержание в клетках	0,09x	x – число голов бройлеров
Козы, овцы	Подстилочное содержания	2,7X	X – общее поголовье
Лошади	Подстилочное содержания	40X	X – общее поголовье

Таблица 4.3.5

Содержание азота и фосфора в органических удобрениях

Органическое удобрение на основе навоза	Азот, кг / т	Фосфор, кг / т
КРС	4,8	0,8
свиньи	2,4	0,7
птица	10	2,1
козы, овцы	4,8	0,8
лошади	8	0,9

На рассматриваемых водосборных участках в результате ведения сельскохозяйственной деятельности ежегодно образуется и используется 33812 т азота и 6465,9 т фосфора, содержащихся в навозе животных. Также на сельхозугодия вносятся с минеральными удобрениями порядка 6644 т азота и 1719 т фосфора. Из них азот поступает в водотоки только из той части, которая не была связана урожаем, почвенной микрофлорой и почвенным поглощающим комплексом. В зависимости от формы минеральных азотных удобрений усваивается 25–55% азота. В среднем до 70% азота минеральных удобрений не могут участвовать в вымывании в водные объекты.

Для минеральных удобрений коэффициент попадания азота в сток принимается равным 0,3.

В органических удобрениях основное количество азота находится в органической форме и поэтому он менее подвижен. Часть подвижного азота усваивается растениями и микрофлорой почвы, другая закрепляется в почве, как и азот минеральных удобрений. Поэтому коэффициент, влияющий на попадание в сток азота из органических удобрений, внесенных в почву, равен 0,1. Фосфор минеральных удобрений малоподвижен в почве, большая его часть закрепляется в почве и поглощается растениями и микрофлорой почвы. Коэффициент для минеральных фосфорных удобрений 0,03, а для органических 0,02, так как часть фосфора органических удобрений находится в органических соединениях и становится подвижной только после минерализации. Обоснованные коэффициенты использованы математической моделью при определении выноса азота и фосфора с сельскохозяйственных угодий.

Коэффициент соответствия технологии применения органических и минеральных удобрений наилучшим доступным технологиям (НДТ) K_6 в уравнении (4.3.1) имеет особое значение для прогнозирования изменения диффузной нагрузки на водные объекты от сельскохозяйственного производства в зависимости от степени освоения НДТ. Технологии утилизации навоза/помета учитывают влияние используемых машинных технологий и регламентов их соблюдения на вынос азота и фосфора, содержащихся в органических удобрениях. Ниже представлены НДТ, которые можно учесть при обосновании значений K_6 :

- внесение органических и минеральных удобрений интеллектуализированными машинами, оснащенными специальными рабочими органами, системой мониторинга процесса с автоматическим регулированием параметров и режимов работы;
- заделка органических удобрений почвообрабатывающими машинами, обеспечивающими качественное смешивание с почвой;
- создание защитных полос на обрабатываемых полях в непосредственной близости к водным объектам;
- применение технологических регламентов и обоснования норм внесения навоза с учетом содержания азота и фосфора в органических удобрениях и принимая во внимание характеристики почвы (например, содержание питательных веществ), сезонные потребности выращиваемых культур и погодные или полевые условия, которые могут привести к образованию стоков.

Полный перечень агроинженерных и организационных требований по соблюдению НДТ включен в российские справочники НДТ – ИТС НДТ-41 и ИТС НДТ-42 по интенсивному разведению свиней и сельскохозяйственной птицы, утвержденных приказами Росстандарта № 2819 от 13.12.17 и № 2667 от 29.11.17.

В табл. 4.3.6 представлены рассчитанные значения биогенной нагрузки на ближайшие водные объекты водосбора Ладожского оз., сформированной при ведении сельскохозяйственной деятельности в период 2014–2016 гг. и при условии внедрения НДТ.

Таблица 4.3.6

Рассчитанная сельскохозяйственная биогенная нагрузка в период 2014–2016 гг. (Факт) и при условии внедрения НДТ (Прогноз)

Водосбор	Факт, т/год	Прогноз, т/год	Факт, т/год	Прогноз, т/год	Снижение при внедрении НДТ, %	Снижение при внедрении НДТ, %
	N	N	P	P	N	P
Ладожское оз.	1708,40	1409,10	87,32	76,10	17,5	12,8
оз. Ильмень	4861,69	4490,18	286,83	275,11	7,6	4,1
Онежское оз.	874,26	775,32	60,42	57,25	11,3	5,2

В среднем в период 2014–2016 гг. диффузная нагрузка составила по N – 7444,35 т/год, по P – 434,6 т/год. Данные результаты были получены при сценарии, когда все образующиеся органические удобрения используются в сельскохозяйственном производстве. Однако анализ статистических данных, натурные исследования показывают, что использование органических удобрений с учетом агротехнических сроков составляет порядка 50–60% от ежегодно образующегося количества. Совокупная вместимость навозохранилищ и площадок для накапливания органических удобрений в зимний период не превышает 50% от требуемой вместимости. Это создает существенный риск увеличения диффузной нагрузки, так как хозяйства вынуждены вносить органику в зимний период или накапливать ее на негидроизолированных площадках. Исследования показали, что неучтенная нагрузка только на части водосбора Ладоги в Ленинградской области может составить N – 372 т/год, P – 33 т/год.

Данные табл. 4.3.6 показывают, что внедрение НДТ может положительно сказаться на снижении сельскохозяйственной биогенной нагрузки на водные объекты водосбора Ладоги. Особенно это видно на собственном водосборе Ладожского оз., где возможно сократить поступление азота и фосфора от сельскохозяйственного производства более чем на 17 и 12% соответственно.

При обсуждении перспектив улучшения экологического состояния водных объектов за счет снижения сельскохозяйственной нагрузки следует помнить, что внедрение НДТ направлено не только на улучшение состояния природной среды, но и на увеличение объемов сельскохозяйственной продукции и снижение трудо- и энергозатрат. Часто встречаются рекомендации по снижению доз внесения биогенных элементов с удобрениями как одного из средств снижения риска антропогенного эвтрофирования водоемов. Однако очевидно, что в ситуации, когда на поля вносятся меньше питательных веществ, чем выносятся с урожаем, уменьшение вносимых удобрений ведет к снижению производства сельскохозяйственной продукции. В реальности руководители предприятий в первую очередь заботятся о повышении объемов производства и ищут средства для увеличения доз внесения удобрений. В такой ситуации внедрение НДТ – единственный реальный механизм сочетания снижения негативного воздействия на окружающую среду с увеличением производства сельхозпродукции и минимизацией трудо- и энергозатрат. А математические методы (модели) – реальный инструмент

для количественной оценки воздействия различных компонентов сельскохозяйственного производства на окружающую среду и поиска оптимального их сочетания для достижения поставленных целей. При этом лицам, принимающим управленческие решения в области улучшения экологической ситуации в регионе, представляется возможность реально оценивать перспективы проведения тех или иных мероприятий.

4.4 Влияние лесохозяйственных мероприятий на сток и вынос биогенных элементов с лесных водосборов Карелии

Около 50% территории европейского севера России занято лесами. Леса представляют собой сложные природные объекты, различающиеся по многим характеристикам: породному составу, условиям произрастания древостоя, его продуктивности, возрасту и другим. Роль леса в гидрофизических и гидрологических процессах еще слабо исследована, так как он относится к природным объектам, в которых очень трудно проводить экспериментальные воднобалансовые исследования. Значительную сложность представляет организация измерения испарения с леса существующими методами натурных исследований. Вместе с тем испарение относится к тем элементам водного баланса водосборов, которые в наибольшей степени зависят от антропогенного воздействия, определяющего преобразование количественных и качественных характеристик водных ресурсов территорий. При отсутствии наблюдений часто приходится прибегать к методам математического моделирования. Динамика испарения с леса на различных этапах его развития является исходной информацией для моделирования гидрологического режима лесных водосборов, стока с них и выноса химических веществ, а также для оценки влияния антропогенной деятельности на сток малых рек и определения экологического ущерба, уже причиненного лесохозяйственной деятельностью [Крестовский, 1986; Федоров, 1981; Карпечко и др., 2018; Федоров, Марунич, 1985; Кондратьев и др., 2019].

Целью настоящего исследования является оценка воздействия лесохозяйственных мероприятий на сток и вынос биогенных веществ с лесных водосборов Карелии с использованием методов математического моделирования. В качестве объектов исследований выбраны водосбор реки Бол. Велмуксы площадью 139 км² (рис. 4.4.1, а) и водосбор реки Маньги площадью 209 км² (рис. 4.4.1, б). Водосбор р. Бол. Велмукса расположен на территории Пудожского района Республики Карелия и входящий в водосбор крупнейшего притока Онежского оз. – р. Водлы. Маньга впадает в достаточно крупный приток Онежского оз. р. Шую. Водосбор Маньги относится к Пряжинскому району.

Практически весь водосбор р. Бол. Велмуксы покрыт лесом (94%). Хвойные породы занимают 65% лесопокрытой части водосбора, 13% этой территории заняты сосновыми лесами, 52% – еловыми. На остальной покрытой лесом части водосбора произрастают мягколиственные породы, среди которых основное место занимают березняки – 34%, и около 1% – осиновые леса. Средний возраст сосняков и ельников 85–90 лет, а березняков – 50 лет. Озера занимают на водосборе менее 1% всей его площади, а заболоченность составляет чуть больше 3%.

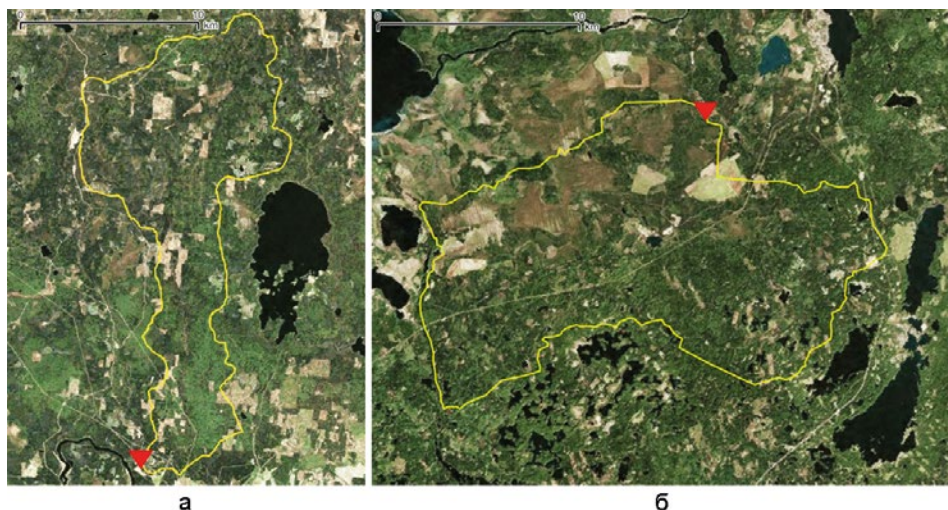


Рис. 4.4.1 – Схема водосбора р. Бол. Велмуksы (а) и р. Маньги (б), ▼ – гидрометрические створы

Лесистость водосбора р. Маньги 81%. Сосновые леса занимают 25%, а еловые – 30% лесопокрытой части водосбора. Водосбор р. Маньги расположен в центральной, наиболее освоенной части Карелии, где интенсивно велись лесозаготовительные работы, поэтому здесь произрастает много мягколиственных пород и основной из них является береза, которая занимает 44% лесопокрытой площади. Около 1% территории покрыто осиной. На водосборе р. Маньги сосняки имеют в среднем возраст 76 лет, а ельники – 62. Средний возраст березняков – 62 года. Озерность и заболоченность водосбора составляют, соответственно, 7 и 4%.

Основным направлением хозяйственной деятельности на лесных водосборах Карелии является заготовка древесины и уход за растущим лесом. Спелые и перестойные леса рубят, как правило, с целью заготовки древесного сырья. Выполняемые в таких лесах рубки делятся на выборочные и сплошные. После сплошных рубок на лесном участке (вырубке) начинаются динамические процессы, аналогичные происходящим после предыдущего удаления древостоя на той же самой лесосеке. На основе материалов лесохозяйственных регламентов Пудожского и Пряжинского центральных лесничеств [Лесохозяйственные регламенты..., 2011], на территории которых расположены водосборы рек Бол. Велмуksы и Маньги, рекомендуемая к принятию площадь расчетной лесосеки составляет 0,9% от общей площади лесных угодий. На водосборе р. Бол. Велмуksы – это около 125 га, на водосборе р. Маньги – 169 га. Соотношение площадей лиственных пород к хвойным составляет 3/7 на водосборе р. Бол. Велмуksы и 3/5 на водосборе р. Маньги.

В качестве основного инструмента для моделирования стока с водосбора использована гидрологическая модель формирования стока с водосбора ИЛНМ [Кондратьев, Шмакова, 2018; 2019]. В процессе моделирования водосбор представляется в виде однородной имитирующей емкости, накапли-

вающей поступающую воду и затем постепенно ее отдающей. Схема модели представлена на рис. 4.1.1. Модель прошла верификацию на ряде объектов, расположенных в Северо-Западном регионе России (водосборы рек Тигода, Лижма, Сяньга, Олонка, Сунна, Шуя, Оять, Сясь, Вуокса, Свирь, Великая, Нева) [Кондратьев, Шмакова, 2018; 2019; Кондратьев и др., 2010] и Финляндии (водосборы рек Мустайоки и Харайоки) [Кондратьев и др., 2003]. В настоящее время ИЛНМ успешно применяется как средство оценки воздействия климатических изменений на сток рек северо-запада РФ, а также в качестве основы для расчетов выноса биогенных веществ с водосборов.

Для решения задачи, связанной с количественной оценкой воздействия вырубок на сток, модель нуждается в существенной модификации блока, описывающего суммарное испарение с лесного водосбора. Повышенное внимание к блоку испарения обусловлено, прежде всего, тем, что при рубках леса изменения стока происходят именно за счет снижения суммарного испарения с поверхности водосбора. Совместно с Институтом леса Карельского научного центра РАН разработана модель для расчета испарения с лесных массивов EVAPFOR [Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019662377; Карпечко, Мясникова, 2012; 2014; Карпечко и др., 2020]. Модель обеспечивает месячными значениями слоев испарения модель формирования стока. Отличительной чертой настоящей модели является то, что в ней рассчитывается суммарное испарение не только в зависимости от осадков, температуры воздуха и дефицита влажности воздуха, как это делается в абсолютном большинстве известных моделей испарения, но и от возраста леса и его таксационных характеристик. Схема модели представлена на рис. 4.4.2.

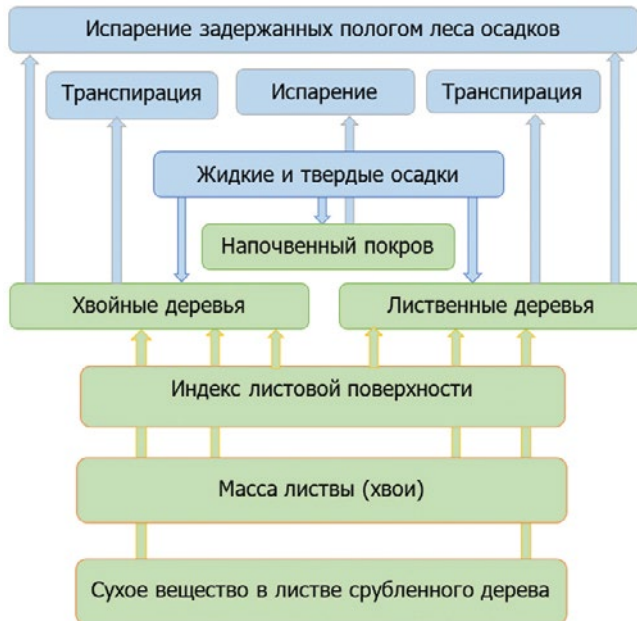


Рис. 4.4.2 – Схема модели формирования испарения с леса EVAPFOR

Слои испарения с лесных массивов оцениваются как сумма транспирации древостоем, испарения с напочвенного покрова и задержанных пологом леса осадков. В качестве интегрального показателя характеристик, влияющих на формирование испарения и физических аспектов транспирации, принимаются масса листвы и индекс листовой поверхности. Транспирация древостоем определяется как произведение массы листвы на удельную величину транспирации, рассчитанной для единицы площади на основе экспериментальных данных [Карпечко и др., 2020]. Испарение с напочвенного покрова рассчитывается как функция возможного в конкретных условиях испарения с безлесного участка и индекса листовой поверхности древостоя. Испарение задержанных пологом леса осадков определяется по эмпирическим формулам как функция массы листвы и метеорологических характеристик. Расчетные зависимости, составляющие основу модели, представляют собой аппроксимацию кривых, описывающих динамику суммарного испарения с различных типов леса с учетом его развития с шагом по времени в один месяц и полученных в результате обобщения многолетних экспериментальных данных, собранных в Институте леса КарНЦ РАН [Карпечко и др., 2020] (рис. 4.4.3).

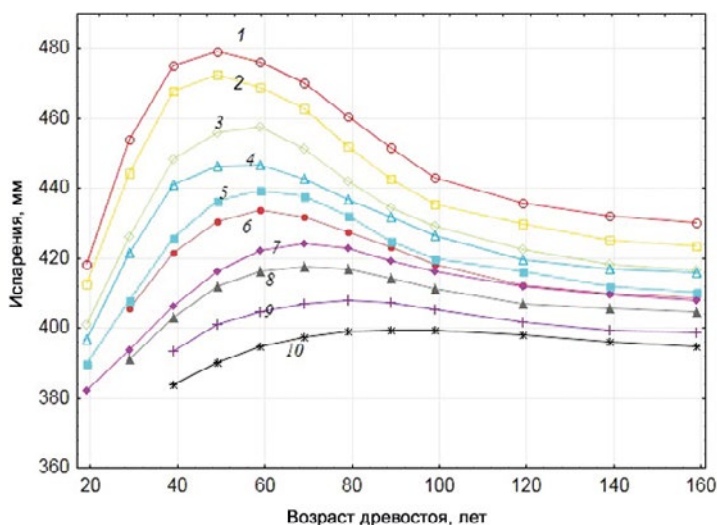


Рис. 4.4.3 – Возрастные изменения испарения разных типов сосновых лесов среднетаежной подзоны (Карелия): 1 – сосняк чернично-кисличный, 2 – сосняк черничный свежий, 3 – сосняк брусничный, 4 – сосняк черничный влажный, 5 – сосняк долгомошный, 6 – сосняк вересковый, 7 – сосняк лишайниковый, 8 – сосняк багульниковый, 9 – сосняк оосово-сфагновый, 10 – сосняк сфагновый

Поскольку экспериментальный материал, положенный в основу расчетных зависимостей, собирался именно в условиях лесов Карелии, не возникает проблем с дополнительной калибровкой и верификацией модели на водосборах Бол. Велмуксы и Маньги. На рис. 4.4.4 представлено сравнение измеренных и рассчитанных по моделям ILHM и EVAPFOR гидрографов слоев стока с водосборов Бол. Велмуксы и Маньги за период 2010–2015 гг. Приведенное значение критерия Нэша – Сатклиффа (NS), равное в обоих

случаях 60%, подтверждает удовлетворительное соответствие результатов натуральных измерений и моделирования.

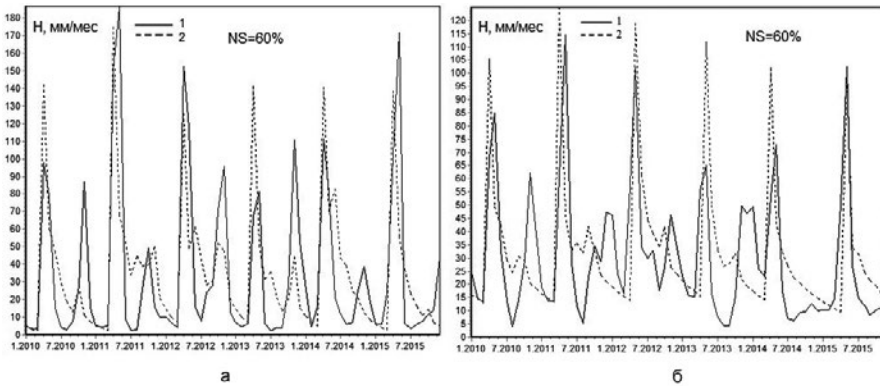


Рис. 4.4.4 – Измеренные (1) и рассчитанные (2) гидрографы стока с водосборов р. Бол. Велмуксы (а) и р. Маньги (б) за период 2010–2015 гг.

Можно предположить, что завышение рассчитанных расходов воды в период межени связано с неполным дренажом стока с водосбора в русла Бол. Велмуксы и Маньги. Часть грунтового стока может попадать напрямую в русла рассматриваемых рек, однако это предположение требует проведения дополнительного экспериментального исследования.

Для расчета биогенной нагрузки, сформированной на лесном водосборе, использовалась разработанная в ИНОЗ РАН модель выноса азота и фосфора за счет разложения растительного опада [Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 20200663648 от 30.10. 2020], ориентированная на решение задач, связанных с оценкой последствий вырубок леса. Схема модели представлена на рис. 4.4.5 [Кондратьев и др., 2020].

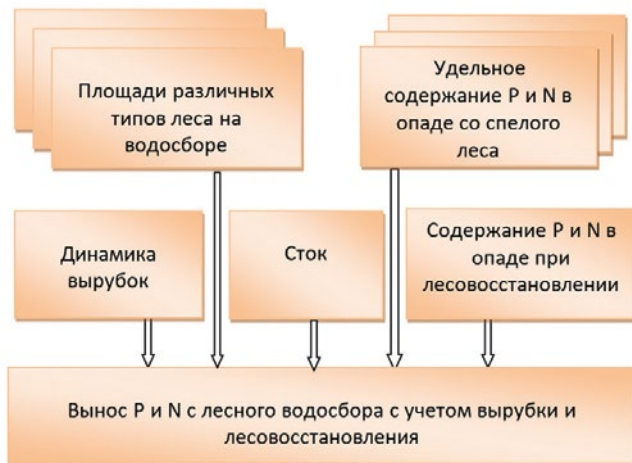


Рис. 4.4.5 – Схема модели для расчета выноса азота и фосфора с лесного водосбора с учетом последствий вырубки леса и последующего лесовосстановления

Модель представляет собой развитие идей работы [Хрисанов, Осипов, 1993], в соответствии с которыми объем выноса в пределах изучаемого водосбора зависит от числа растительных сообществ, занимаемых ими площадей и количества биогенного элемента, ежегодно поступающего на водосбор с растительным опадом каждого растительного сообщества. Использование опада в качестве основного аргумента выноса биогенных элементов обусловлено его доминирующей ролью в поступлении этих элементов на водосбор. Вынос азота и фосфора с водосбора с дождевым и талым стоком в значительной степени определяет уровень биогенной нагрузки на водоем-водоприемник, а следовательно, и его трофическое состояние. В среднем с опадом поступает 80–90% азота и фосфора от всей приходной части биогенного баланса спелых и перестойных ельников и сосняков на водосборе [Карпечко и др., 2018]. Существенная роль опада в возврате химических элементов в лесные почвы подчеркивается во многих работах [Parzych, Trojanowski, 2006; Ukonmaanaho et al., 2008; Niinemets, Tamm, 2005]. При его резком сокращении в результате вырубок происходит значительное снижение содержания азота в верхних горизонтах лесной подстилки и его перенос в минеральные слои почвы [Федорец, Бахмет, 2003]. Соответственно, снижается и вынос биогенных веществ с водосбора.

Значения содержания биогенных элементов в растительном опаде задавались по данным работы [Хрисанов, Осипов, 1993], представленным в табл. 4.4.1.

Таблица 4.4.1

**Удельное содержание биогенных элементов
в растительном опаде [Хрисанов, Осипов, 1993]**

Тип растительного сообщества	Удельное содержание, кг/га	
	N _{общ}	P _{общ}
Лес хвойный:		
• Ель	36,0	2,0
• Сосна	16,0	4,3
Лес лиственный:		
• Береза	60,0	8,8
• Липа	38,0	9,0
• Осина	46,0	4,0
• Ольха	40,0	3,0
• Сады, парки	25,0	2,5
Болото:		
• Верховое	52,0	10,0
• Низинное	95,0	12,0
Прочие сельскохозяйственно неосвоенные земли:		
• Луга естественные	46,0	5,0
• Территории с изреженным травяным покровом	15,0	1,5

На первом этапе исследования выполнялись расчеты испарения и стока при средних многолетних значениях метеорологических параметров (осадков и температуры воздуха) и характеристиках лесного покрова, соответствующих уровню 2018 г. После чего проводилась имитация сплошной вырубki на расчетной лесосеке площадью около 125 га, составляющей менее 1% от общей площади лесопокрытой части водосборов. При этом соотношение пород деревьев сохранялось. Результат оказался вполне ожидаем. Изменение испарения менее чем на одном проценте площади водосбора визуального эффекта по изменению гидрографа стока не дали. Уменьшение суммарного испарения с водосбора составило около 0,03% от начального значения для обоих водосборов, соответственно, сток увеличился на 0,05%. Уменьшение лиственного опада после вырубki на указанных площадях также привело к незначительному сокращению выноса азота и фосфора (не более чем 0,5% по отношению к уровню 2018 г.). Полученный результат объясняется тем, что в ходе эксплуатации лесного фонда в соответствии с существующими рекомендациями ведения лесохозяйственной деятельности на достаточно крупном (относительно площади ежегодных рубок) водосборе объем вырубаемого древостоя и площадь создаваемых при этом новых вырубок на водосборах компенсируются за счет процесса лесовосстановления. При этом для расчетной лесосеки объем вырубаемой древесины примерно равен объему прироста, и степень варьирования стока и выноса химических веществ в замыкающем створе мало зависит от лесопромышленной деятельности человека.

Для оценки чувствительности внутригодового распределения стока с лесного водосбора к гипотетическим вырубкам леса на гораздо больших площадях проведены расчеты, имитирующие последствия вырубki 50 и 100% леса на водосборах Бол. Велмуксы и Маньги. Такие высокие значения приняты не только для улучшения визуализации результатов моделирования, но и для оценки границ максимальных возможных изменений стока и выноса биогенных веществ в результате вырубок на исследуемом водосборе. Результаты расчетов, выполненных с использованием средних многолетних значений метеорологических параметров для обоих водосборов, представлены на рис. 4.4.6 и 4.4.7.

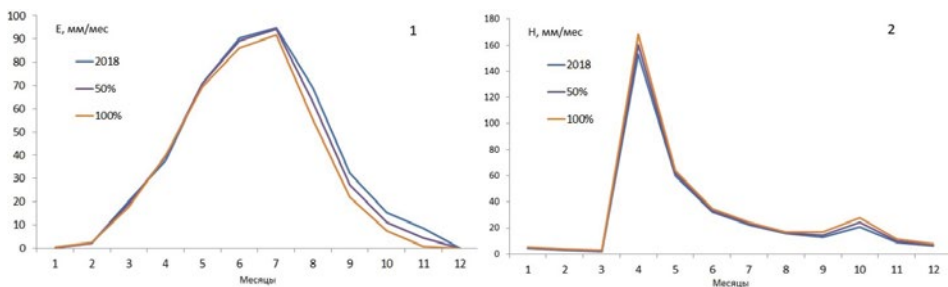


Рис. 4.4.6 – Внутригодовая динамика среднегодовых значений суммарного испарения (1) и стока (2) с водосбора Бол. Велмуксы по состоянию на 2018 г., а также после вырубki 50 и 100% общей площади леса

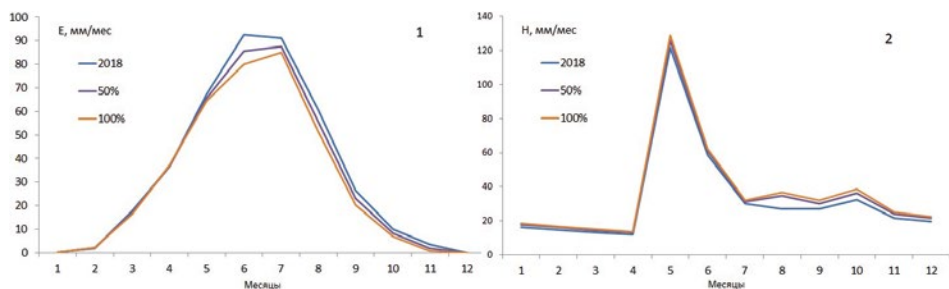


Рис. 4.4.7 – Внутригодовая динамика среднегодовых значений суммарного испарения (1) и стока (2) с водосбора Маньги по состоянию на 2018 г., а также после вырубки 50 и 100% общей площади леса

Расчеты показали, что снижение суммарного испарения после вырубки наиболее выражено в летне-осенний период. В среднем за год испарение снижается на водосборе Бол. Велмуксы на 20 мм/год при 50%-ной вырубке и на 48 мм/год при 100%-ной вырубке. На водосборе Маньги – 25 мм/год и на 43 мм/год соответственно. На эти же значения увеличивается и годовой сток. Наиболее значимое возрастание стока отмечается в периоды весеннего половодья (на 9% для Велмуксы и на 6% для Маньги по отношению к средним климатическим значениям) и осенних дождевых паводков (на 25% для Велмуксы и на 19% для Маньги).

Для оценки возможных изменений годового стока и выноса биогенных элементов в результате вырубки леса и последующего лесовосстановления выполнена серия имитационных расчетов, иллюстрирующая динамику изменения слоя стока и массы вынесенных общего азота и общего фосфора за период времени от момента вырубки до полного лесовосстановления как на водосборе Бол. Велмуксы, так и на водосборе Маньги. Так же, как и в случае расчетов стока, изменение листового опада на лесосеке, составляющей менее 1% площади водосбора, визуального эффекта при моделировании выноса с водосбора биогенных элементов не дали. Результаты расчетов последствий вырубки 50% леса представлены на рис. 4.4.8 и 4.4.9.

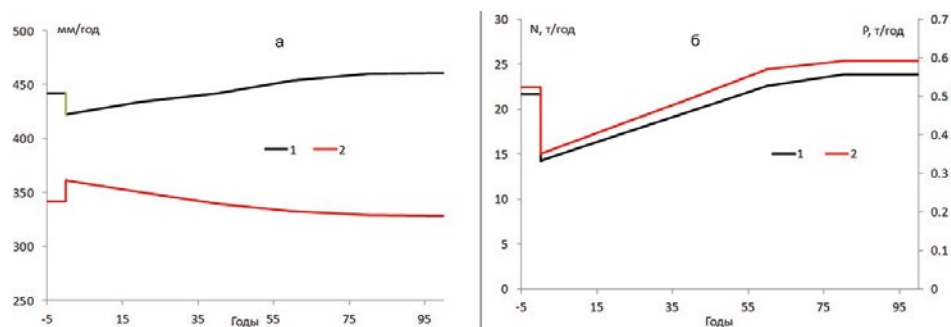


Рис. 4.4.8 – Динамика среднегодовых значений испарения – 1 и стока – 2 (а), а также выноса азота – 1 и фосфора – 2 (б) в процессе лесовосстановления после вырубки 50% площади леса на водосборе Бол. Велмуксы

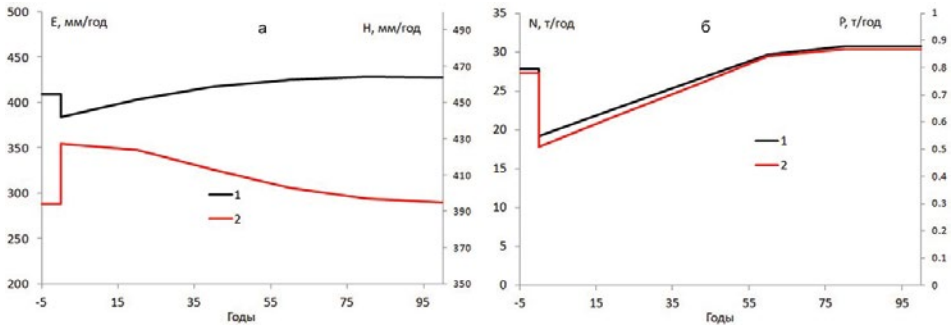


Рис. 4.4.9 – Динамика среднегодовых значений испарения – 1 и стока – 2 (а), а также выноса азота – 1 и фосфора – 2 (б) в процессе лесовосстановления после вырубki 50% площади леса на водосборе Маньги

На основе представленных материалов можно сделать вывод о том, что модель описывает динамику испарения и стока в период лесовосстановления адекватно существующим представлениям, основанным на результатах многолетних натурных наблюдений. При этом продолжительность лесовосстановления для рассматриваемого объекта составляет около 80 лет. В соответствии с результатами моделирования гипотетическая вырубka 50% леса на водосборе Бол. Вельмуksы может привести к резкому снижению листового опада и, соответственно, к снижению выноса биогенных элементов, образующихся в результате его разложения. Для условий проведенной имитации первоначальный вынос снизится на 7,3 т/год, или 34% от уровня 2018 г., для азота и на 0,17 т/год, или 33%, для фосфора. Для водосбора Маньги – на 8,6 т/год, или 31%, от уровня 2018 г. для азота и на 0,27 т/год, или 35%, для фосфора. Далее по мере лесовосстановления через 55 лет значения выноса азота и фосфора восстановятся до уровня 2018 г. Затем последует небольшое увеличение как стока, так и выноса биогенных элементов, связанное с продолжением лесовосстановления хвойных пород вплоть до 80-го года после вырубki. Максимальное возможное снижение показателей выноса можно ожидать в первые годы после 100% вырубki, которые составят 14,3 тN/год и 0,35 тP/год для Бол. Вельмуksы и 16,8 тN/год и 0,53 тP/год для Маньги. Аналогичный характер будет иметь динамика стока и выноса биогенных элементов при реальных вырубках как на изучаемых водосборах, так и на единичных экспериментальных площадках с однородным лесным покрытием.

Полученные оценки изменений стока и выноса биогенных элементов с лесного водосбора в результате вырубok являются весьма приближенными, так как не учитывают ряд важных процессов, влияющих как на сток, так и на вынос азота и фосфора. Не учитываются изменения таксационных характеристик леса в процессе лесовосстановления, а также резкое возрастание эрозии и связанного с ней выноса химических веществ в первый год после вырубki за счет нарушения структуры поверхностного слоя почв. После вырубki возрастает вероятность возникновения «запирающего слоя», который появляется при промерзании поверхностного слоя почвы и переводит талый сток в поверхностную составляющую. Отсутствие запи-

рающего слоя в лесу приводит к снижению максимальных расходов в период снеготаяния и увеличению меженного стока. Учет этих и других факторов, влияющих на сток и вынос биогенных элементов с водосбора, требует проведения серьезных натурных исследований, требующих соответствующих материальных затрат, а также высокой квалификации специалистов. Тем не менее представленные в настоящей статье результаты позволяют сделать предварительную оценку максимальных возможных изменений стока и выноса биогенных элементов с лесных водосборов как при реальных, так и при гипотетических масштабах вырубки леса. Принципиальных изменений результатов моделирования едва стоит ожидать даже при учете в расчетах, перечисленных выше, особенностей и закономерностей изучаемых процессов.

Сейчас трудно представить, что на таких достаточно крупных водосборных площадях будут проводиться сплошные рубки. Хотя, по данным работы [Федорец, Бахмет, 2003], в настоящее время лесами в бассейне Онежского оз. покрыто уже всего 54% площади водосбора. Представленные в настоящей работе оценки позволяют количественно судить о возможных экстремальных изменениях стока и выноса азота и фосфора в экстремальных условиях ведения лесного хозяйства. Если же будет стоять задача оценить последствия сплошных рубок на единичной лесосеке, то гипотетические расчеты 100% вырубки приобретут вполне реальное практическое воплощение.

Предложенная относительно простая модель формирования стока и выноса биогенных элементов с лесного водосбора позволяет описывать изучаемые процессы в динамике и с достаточной степенью адекватности существующим экспериментальным данным. Имитационное моделирование проведения сплошной вырубки на расчетных лесосеках выбранных экспериментальных водосборов р. Бол. Велмуксы и Маньги, составляющей менее 1% от общей площади, не дали визуального эффекта как по изменению гидрографа стока, так и сокращению выноса азота и фосфора с водосбора. Изменения расчетных величин не превосходят доли процента от первоначальных значений. Полученный результат объясняется тем, что объем вырубаемой древесины примерно равен объему прироста и степень варьирования стока и выноса химических веществ в замыкающем створе мало зависит от лесопромышленной деятельности человека, если она выполняется в соответствии с действующими правилами. Имитационное моделирование последствий гипотетических рубок 50 и 100% площади леса на экспериментальном водосборе позволило оценить интервал возможных экстремальных изменений стока и выноса биогенных элементов. Так, после 100% вырубки леса можно ожидать увеличение стока с водосбора на 48 мм/год и снижение выноса на 14,3 тN/год и 0,35 тP/год на водосборе Бол. Вельмуксы и увеличение стока на 48 мм/год и снижение выноса на 16,8 тN/год и 0,53 тP/год на водосборе Маньги. Последующее лесовосстановление и связанное с ним возрастание значений выноса азота и фосфора, обусловленное увеличением листового опада, будет иметь продолжительность около 80 лет. Следует отметить, что одним из наиболее перспективных направлений развития настоящего исследования является модельная оценка

возможных изменений стока и выноса биогенных элементов с лесных водосборов в результате климатических изменений.

Основными результатами исследований, представленных в настоящей главе, можно считать следующее:

- С использованием методов детерминированно-стохастического моделирования получена количественная оценка изменений стока с водосбора Ладожского оз. и р. Невы в случае реализации климатического сценария, разработанного специально для условий данного региона. Как показали результаты расчетов, несмотря на существенное увеличение слоя осадков, следует ожидать снижения стока с водосбора ориентировочно на 6,3% по отношению к современному периоду. Причиной указанного тренда может являться увеличение испарения за счет потепления, которое компенсирует возрастание осадков.

- Впервые дана количественная оценка стока наносов с водосбора Ладоги и их поступления в озеро. Проведенные расчеты позволяют сделать вывод о том, что годовой сток наносов, поступающий в акваторию Ладоги, составляет около 432 тыс. т/год. Основными источниками наносов являются три крупных притока Ладожского озера – реки Свирь, Волхов и Вуокса, на долю которых приходится 253 тыс. т/год, или 59% от общего количества наносов, поступивших в озеро. При этом средний по водосбору Ладожского оз. годовой модуль твердого стока оценен в 1,53 т/(км² год).

- Выполнена количественная оценка сельскохозяйственной нагрузки на Ладожский водосбор. Показано, что в период 2014–2016 гг. сельскохозяйственная нагрузка составила 7444,4 тN/год и 434,6 тP/год. При этом внедрение НДТ может положительно сказаться на снижении сельскохозяйственной биогенной нагрузки на водные объекты водосбора Ладоги. Так, на собственном (частном) водосборе Ладожского оз. возможно сократить поступление азота и фосфора от сельскохозяйственного производства более чем на 17 и 12% соответственно.

- Имитационное моделирование последствий гипотетических вырубок 100% площади леса на экспериментальных водосборах Карелии позволило оценить интервал возможных экстремальных изменений стока и выноса биогенных элементов. Так, после 100% вырубки леса можно ожидать увеличение стока с водосбора на 48 мм/год и снижение выноса на 14,3 (103) – 16,8 (80) тN/год (кгN/км² год) и 0,53 (2,5) – 0,35 (2,5) тP/год (кгP/км² год). Последующее лесовосстановление и связанное с ним возрастание значений выноса азота и фосфора, обусловленное увеличением листового опада, будет иметь продолжительность около 80 лет.

Глава 5. Особенности геолого-геоморфологического строения дна Ладожского озера, его берегов и подводных ландшафтов

Изучением геоморфологии дна и берегов Ладожского оз. в разное время занимались многие исследователи и организации. Результаты работ изложены в ряде публикаций [История озер..., 1990; Ладожское озеро..., 1978; 2002; 2015; Ладога, 2013; Амантов, Амантова, 2014; Лукашов, 1976; Геоэкология..., 1995; Анохин и др., 2016; 2019; Dolukhanov et al., 2010]. Тем не менее дно Ладожского оз. изучено все еще недостаточно. Развитие технологий привело к радикальному обновлению средств и методических приемов геоморфологического изучения территорий и акваторий, в том числе дна водоемов и их береговых зон. Применение сотрудниками ИНОЗ РАН таких прогрессивных методов, как воздушная съемка береговой зоны с беспилотного летательного аппарата (БПЛА), подводная фотовидеосъемка с помощью созданных в ИНОЗ РАН подводных аппаратов серии Limnoscout и др. в процессе геолого-геоморфологических исследований на акватории и берегах Ладожского озера привело к выявлению новых значимых фактов его строения. С появлением компьютерных технологий разработаны новые методические подходы, позволяющие по-новому взглянуть на геоморфологическое и тектоническое строение дна озера. Ниже приводятся некоторые результаты этих исследований.

5.1 Донные ландшафты Ладожского озера

Донные ландшафты Ладожского оз. изучаются в ИНОЗ РАН начиная с 2013 г. За этот период разработана методика изучения донных ландшафтов разного уровня вплоть до уровня отдельных фаций [Дудакова, Дудаков, 2015; Дудакова, 2018; Дудакова и др., 2018], которая опирается на классические методы морских подводных ландшафтных исследований [Гурьева и др., 1976; Гурьянова, 1959; Игнатов и др., 1982; Исаченко, 1961; Мануйлов 1982; Митина, 2005; Петров, 1969; 1989; 2009; Поярков, Преображенский, 1980; Преображенский и др., 2000]. Установлены принципы типологизации донных ландшафтов, пригодные для работы на крупных озерах. В этих работах используются современные высокотехнологичные методы, позволяющие включать весь арсенал подходов, используемых в современном подводном ландшафтоведении. Целью ландшафтных исследований на Ладожском оз. является изучение структуры и распределения донных ландшафтов глубоководной и прибрежной зоны различных частей озера с учетом антропогенного воздействия.

Важной частью ландшафтных исследований является получение визуальной информации о поверхности дна. Основная часть ее получается при использовании телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (ТНПА). Подводные исследования с помощью ТНПА в настоящее время активно включаются в арсенал методов гидробиологии и подводного ландшафтоведения [Илюшин и др., 2014; Петров, 1989; Annual conference

ГЕОНАВ, 2019]. Наиболее частое применение они находят в морских работах [Бахарев и др., 2015; Дуленин, Кудревский; 2019; Комплексные исследования..., 2012; Ляхов, Яковлев, 2006; Мокиевский и др., 2005]. Тогда как для крупных озер, за исключением системных работ на озере Байкал, где возможным оказалось даже использование обитаемых подводных аппаратов [Сагалевиц, 2015], это направление не столь разработано.

Прозрачность воды в озерах, как правило, гораздо ниже, чем в морях и океанах. Это обстоятельство затрудняет видеосъемку дна. Для дна Ладожского оз. на многих участках характерно наличие сложного рельефа дна с выходами коренных пород и обломков, способных повредить оборудование, а также значительным числом затопленных рыболовецких сетей. Для решения проблемы в ИНОЗ РАН создана линейка собственных подводных аппаратов: Limnoscout 230 (рис. 5.1.1), Limnoscout 50, Limnoscout-1М, конструкция которых учитывает специфику Ладожского оз. [Дудакова и др., 2018; Дудакова и др., 2020].



Рис. 5.1.1 – Внешний вид ТНПА Limnoscout 230

Из основных особенностей подводного аппарата следует отметить:

1. Возможность работы как в активном режиме ТНПА, так и в режимах буксируемого НПА и донного НПА (ГОСТ Р 56960–2016).
2. Допустимость работы даже с резиновой лодки; установка дополнительного такелажного оборудования не требуется.
3. Аппарат надежно защищен от повреждений при ударах о камни на скорости до 5 км/час.
4. Создана система освобождения из рыболовных сетей, неоднократно доказавшая свою эффективность.
5. Есть возможность подстраивать подсветку аппарата исходя из условий съемки.
6. Возможна зарядка аккумуляторов в полевых условиях.

Для получения высококачественных фото- и видеоматериалов подводный ландшафт снимают одновременно три видеокамеры: камера общего обзора с фокусировкой на дистанцию, определяемую прозрачностью воды и разрешением 4К, макрокамера с фокусным расстоянием порядка 7–10 см для съемки мелких объектов и целеуказательная камера, настройки которой оптимальны для оператора управляющего ТНПА.

Поскольку решается целый спектр задач по подводным исследованиям, было принято решение создать вспомогательные подводные аппараты, а именно: Limnoscout-50 – облегченный подводный аппарат с обзором более 220 градусов, основное назначение которого поиск объектов на дне, визуальный анализ грунтов, наблюдение за биотой; Limnoscout-1M – облегченный подводный аппарат, предназначенный для видеосъемки макрообъектов (зоопланктона, мелких ракообразных) как на дне, так и в толще воды. В настоящее время проводятся работы по дооснащению ТНПА научным оборудованием, в частности, магнитометром, лазерной линейкой, высокоточным барометрическим датчиком, а также по совершенствованию программного обеспечения.

За период с 2013 по 2020 г. исследовано 24 полигона в северном шхерном районе и 1 полигон – в южной части Ладожского оз. в бухте Петрокрепость. С 2017 по 2020 г. пройден 41 ландшафтный профиль: 7 – на западе, 4 – на востоке, 8 – на юге, 22 – на севере, суммарный ход составил 55 км. В 2019–2020 гг. также проводились исследования на 58 ландшафтных станциях в открытой части акватории в диапазонах глубин от 8 до 150 м. С учетом наибольшей сложности и мозаичности донных ландшафтов максимум усилий по их изучению был сосредоточен в северном районе Ладожского оз., где расположено большое число проблемных в экологическом отношении участков озера, таких как прибрежная зона г. Питкяранта, пос. Ляскеля, Щучий залив, залив Импилахти. Обследовались также Волховская губа и устье р. Волхов.

Проведенные исследования подтверждают большое разнообразие донных ландшафтов Ладожского оз. Основные типы фаций, формирующие донные ландшафты озера, соотносятся с базовыми разновидностями донных грунтов и осадков: скальными, валунно-обломочными, песчаными, илистыми (рис. 5.1.2). Причем между ними могут наблюдаться переходные зоны с различными сочетаниями основных литологических разностей. Особенности коренной и четвертичной геологии также накладывают свой отпечаток. Характер скальных поверхностей коренных пород и их обломки могут отличаться в зависимости от устойчивости породы к разрушению и формировать неодинаковые фации. Различные аномалии залегания пород, неотектонические образования также формируют некоторые специфические элементы ландшафта.

Палеоистория развития определенных участков акватории хранит в себе следы различных событий жизни озера (изменений уровня, наступления ледников) и находит свое отражение в специфике ряда донных фаций Ладожского оз. Различия облика фаций формируется также под воздействием света. Выделяются хорошо освещенные литоральные ландшафты, где наличие светового потока, пригодного для процесса фотосинтеза, создает ус-

ловия для произрастания различных видов фитоперифитона и макрофитов (рис. 5.1.2, А, Г), а также минимально освещенные или полностью затемненные ландшафты глубоководных частей котловины (рис. 5.1.2, Б, В, Д, Е).

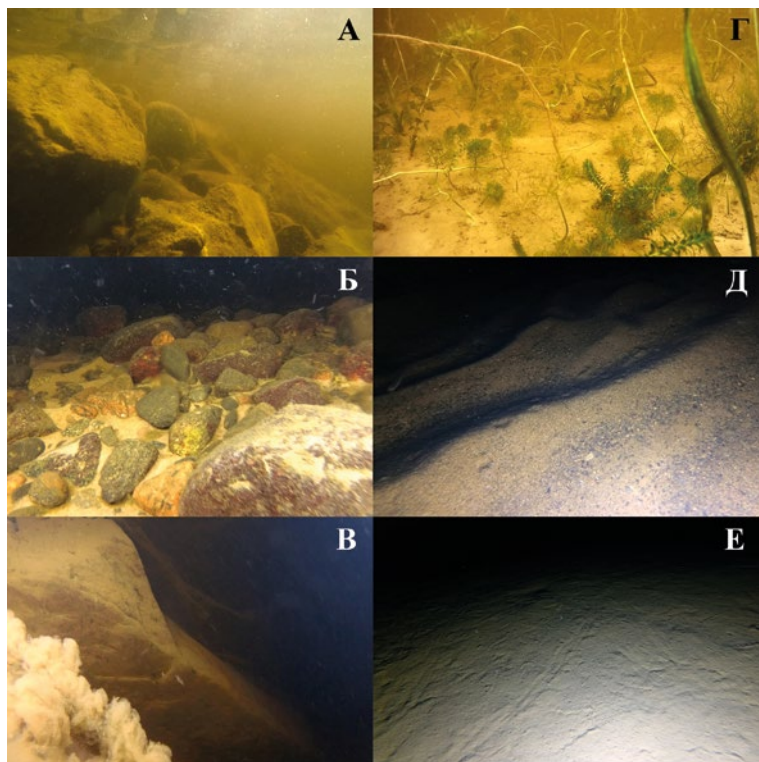


Рис. 5.1.2 – Основные типы литологических разностей и ландшафтов Ладожского оз.

В литоральной зоне Ладожского оз. существенное влияние оказывает характер береговой линии. Извилистая береговая линия, образующая сложный рисунок с многочисленными мысами, заливами, мелкими островами, смешанными типами аккумулятивно-абразионных берегов, формирует высокую пространственную гетерогенность и сложность прибрежных участков и способствует высокому разнообразию и мозаичности фаций (рис. 5.4.3, сверху), тогда как более выровненные берега образуют более однородные ландшафты (рис. 5.4.3, снизу).

Разнообразные формы подводного рельефа также определяют фациальные различия: фации вершин, склонов, впадин, равнин, ступеней и склонов подводных террас, подводных валов и т.д. – для мезорельефа, и знаки ряби, элементы биоосложненной поверхности – для микрорельефа (рис. 5.1.4, А – З).

Важным является гидродинамический фактор. Для Ладожского оз. известны зоны различной гидродинамической активности [Воронцов, 1966; Науменко, 2013], от которой зависит перенос вещества и энергии; в пределах этих зон схожие литологические разности могут образовывать раз-

ный ландшафтный облик. Различия в интенсивности и источнике гидродинамического воздействия могут отражаться на характере поверхности. Так, для песков хорошо известно образование знаков ряби на поверхности вследствие интенсивного действия волн (рябь волнения, характеризующаяся хорошо выраженным периодическим раздвоением гребней правильной формы) или придонных течений (рябь течения, в рисунке ряби раздвоение отсутствует, отдельные гребни обрываются и сменяются другими) [Арзамасцев, Преображенский, 1990] (рис. 5.1.4, А – Г). Пески на больших глубинах вне интенсивного гидродинамического воздействия или на участках, смешанных со щебенкой либо защищенных «стенами» из крупного обломочного материала, имеют более выровненную поверхность (рис. 5.1.4, Ж, З). Гравитационные явления также влияют на создание новых фаций и более сложных ландшафтов: подводные каньоны, оползни, неотектонические обрушения скальных пород. Работы, посвященные ландшафтам лимнических подводных каньонов, известны для оз. Байкал [Карабанов, Фиалков, 1987].

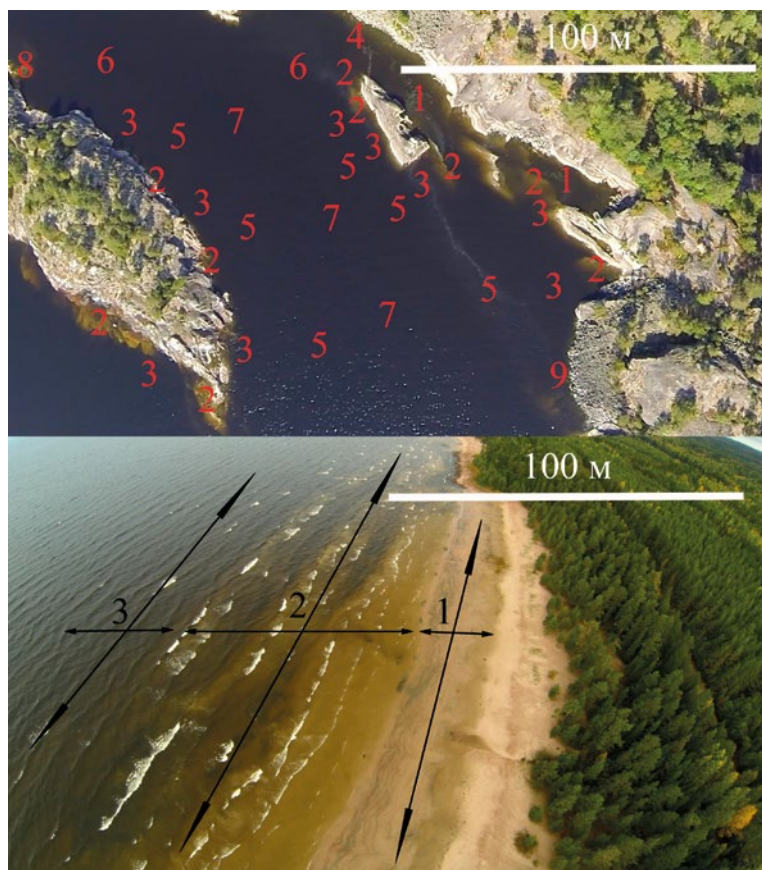


Рис. 5.1.3 – Изрезанность береговой линии и ландшафтные фации в прибрежном районе (арабскими цифрами приведены номера отдельных ландшафтных фаций). (Фотографии получены при собственных съемках с БПЛА)

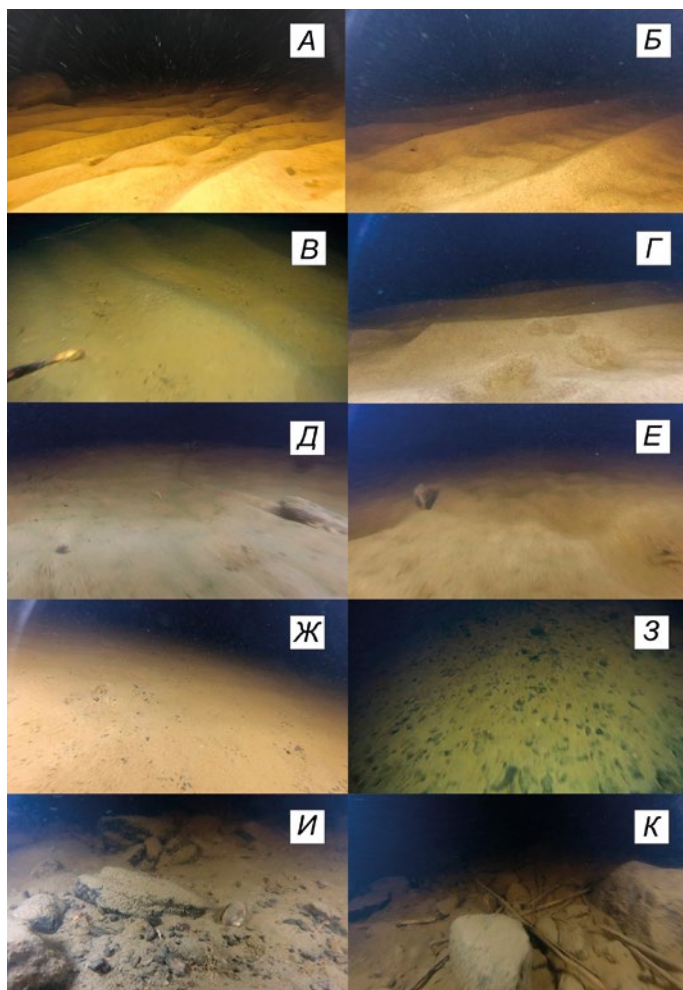


Рис. 5.1.4 – Виды песчаных и промежуточных фаций

Неотделимым компонентом подводных донных ландшафтов является биота: донная флора (высшие растения и водоросли), распространение которой ограничивается на дне пределом фотической зоны, а также фауна: животные, которые адаптировались к условиям существования на всем диапазоне глубин. Их распределение и структурно-видовой состав влияют на выделение фаций. Крупные ландшафтообразующие виды также формируют характер донной поверхности. К биоусложненным поверхностям относят ямки, норки и курганчики, цепочки следов, экскреты, отмершие остатки водорослей и макрофитов, наземных растений, створки мертвых моллюсков. На некоторых участках дна они могут формировать характерный рисунок или отлагаться в существенном объеме, формируя отдельные фации на одинаковых литологических разностях. Кроме крупных аборигенных ландшафтообразующих видов, важное значение для донных ландшафтов Ладожского оз. могут иметь инвазионные виды, относящиеся к категории «инженеров» среды. Последние

могут приводить к резкой смене биотической составляющей ландшафтов, характера донной поверхности, изменению биогеохимических циклов. В качестве примера можно упомянуть обнаружение чужеродного вида двусторчатых моллюсков *Dreissena polymorpha* в Волховской губе в 2019 г. В перспективе для ландшафтов Ладожского оз. это может привести к изменению их структуры и появлению новых типов дна, как это произошло в Великих американских озерах [Karatajev et al., 1997; Karatajev et al., 2018].

Наибольшей структурной сложностью ландшафтов обладает прибрежная зона озера, что связано с ее местоположением на стыке трех разных географических оболочек: атмосферы, литосферы и гидросферы. Водные ландшафты имеют свое продолжение в береговых надводных структурах и тесно связаны с ними потоком вещества и энергии.

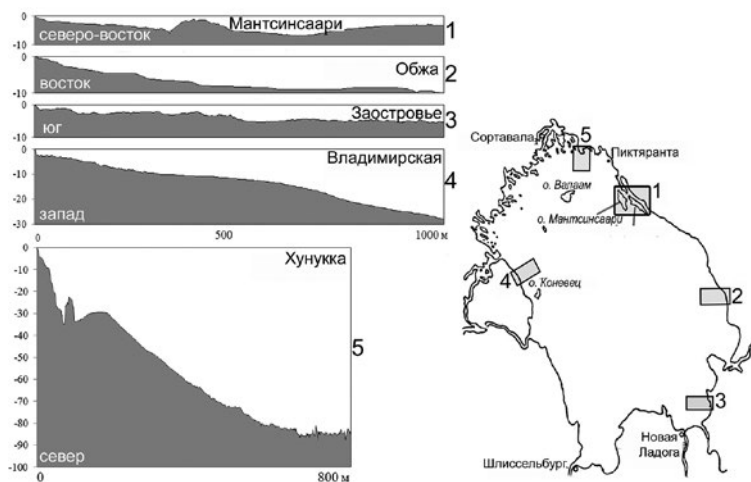


Рис. 5.1.5 – Характерные батиметрические профили литорали разных частей Ладожского оз.

Отличия геологического строения разных частей озерной котловины накладывают отпечаток на особенности берегового склона. И если в северном шхерном районе Ладожского оз. изменения условий формирования донных природных комплексов в прибрежной зоне по вертикальной оси происходят очень резко, то по мере движения к югу градиент этих изменений значительно снижается (рис. 5.1.5). При движении к югу на первое место выходят аспекты горизонтальной составляющей.

На рис. 5.1.6 приведены типовые ландшафтные профили, характерные для разных частей Ладожского оз.

Распределение отдельных ландшафтных единиц связано со структурой подводного рельефа прибрежной зоны. Наибольшей структурной сложностью обладают участки с высоко расчлененными поверхностями с чередованием впадин и возвышенностей, формирующих острова или луды (рис. 5.1.7: 1 – ландшафтный профиль в районе о-ва Мантинсаари, фации М1 – М6). Изрезанность береговой линии и высокое разнообразие глубин, чередование элементов рельефа влияют на специфику гидродинамических

процессов, распределение донных осадков и биоты. Дополнительный вклад могут вносить элементы недавней палеоистории местности. Так, среди компонентов донных ландшафтов в районе островов Мантинсаари и Лулкклансаари в отдельную фацию входят подводные отложения морены, оставшейся после последнего оледенения (рис. 5.4.7: фация 13). Наиболее высокой степенью горизонтальной расчлененности в Ладожском оз. обладают северные шхеры с многочисленными островами.

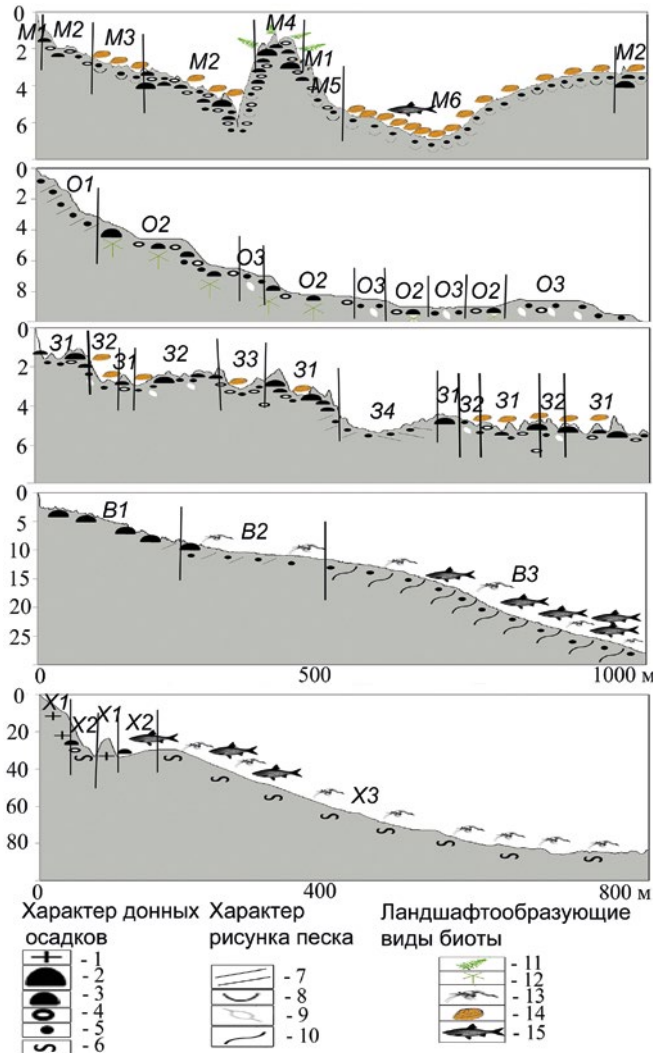


Рис. 5.1.6 – Распределение ландшафтных фаций по профилю. Сверху вниз: Мантинсаари (1); Обжа (2); Заостровье (3); Владимирская (4); Хунукка (5): 1 – коренная порода; 2 – крупные валуны и глыбы; 3 – валунчики; 4 – галька и щебенка; 5 – песок; 6 – алевриты; 7 – прямолинейные рифели; 8 – песок с ямками; 9 – рябь волнения; 10 – рябь течения; 11 – элодея; 12 – колонии губок; 13 – мизиды и амфиподы; 14 – крупные моллюски; 15 – рыба. Буквенно-числовыми индексами обозначены фации, выделяемые на исследованном участке; вертикальные линии – границы фаций



Рис. 5.1.7 – Распределение ландшафтных фаций на участке акватории между островами Лункулансаари и Мантсинсаари (северо-восточная часть Ладожского оз.): 1 – фация подводных выходов коренных пород и крупных глыб; 2 – фация прибрежных коренных пород, глыб и крупновалунных отложений с нитчатыми водорослями на глубинах до 0,5 м; 3 – фация тростниковых зарослей на песчано-галечно-валунном грунте на глубинах до 1,5 м; 4* – фация рдестов на песчано-галечно-валунном грунте на глубинах 1,5–2 м; 5* – фация прибрежных и мелководных крупновалунных отложений с бактериально-водорослевыми обрастаниями и присутствием элодеи канадской на глубинах до 1,5 м; 6 – фация чистых прибрежных и мелководных крупновалунных отложений с колониями пресноводных губок до 2,5 м глубины; 7 – фация галечно-песчаных отложений с редкими валунами на глубинах до 6 м; 8 – фация чистых песков со знаками ряби с редкими щебенкой и валунами на глубинах более 4 м; 9 – фация песков со знаками ряби с редкими щебенкой и валунами и с водорослями фитосамона на поверхности на глубинах более 8 м; 10 – фация песков со знаками ряби с редкими щебенкой и валунами и с растительным опадом на поверхности, поступающим из верхних горизонтов, на глубинах более 6 м; 11 – фация песков биоусложненной поверхности в виде ямок, заселенные крупными моллюсками на глубинах 3–7 м; 12 – фация прибрежных песчаных пляжей с серией подводных валов; 13 – фация моренных валунно-галечных отложений, простирающихся до глубин 12,5 м. *Фации 4 и 5 показаны для участков, исследованных при подводном видеопрофилировании

Для южных и восточных подводных ландшафтов характерной особенностью является присутствие гляциальных отложений, отраженных на дне в виде чередующихся полос нагроможденных валунов, принесенных ледником (рис. 5.1.6: 2 – Обжа, фация О2, 3 – Заостровье, фация З1) и озерных песчаных осадков.

Для северного, северо-западного районов озера для вертикальной составляющей характерно отсутствие фациальной мозаичности: по профилю обычно наблюдается наличие закономерно сменяющихся рядов фаций (рис. 5.1.6: 4 – Владимирская бухта, 5 – Хунукка). Мелководная зона в этих частях, как правило, идет узкой полосой. Особенно это проявляется для ладожских шхер. В ходе работ на полигонах было выявлено, что основным фактором, влияющим на смену ландшафтных фаций в районе скальных подводных склонов, наиболее распространенных в этом районе, является смена литологических разностей с глубиной (рис. 5.1.8). Такой ряд фаций

является характерным для большинства ландшафтов открытой скальной литорали севера Ладожского оз.

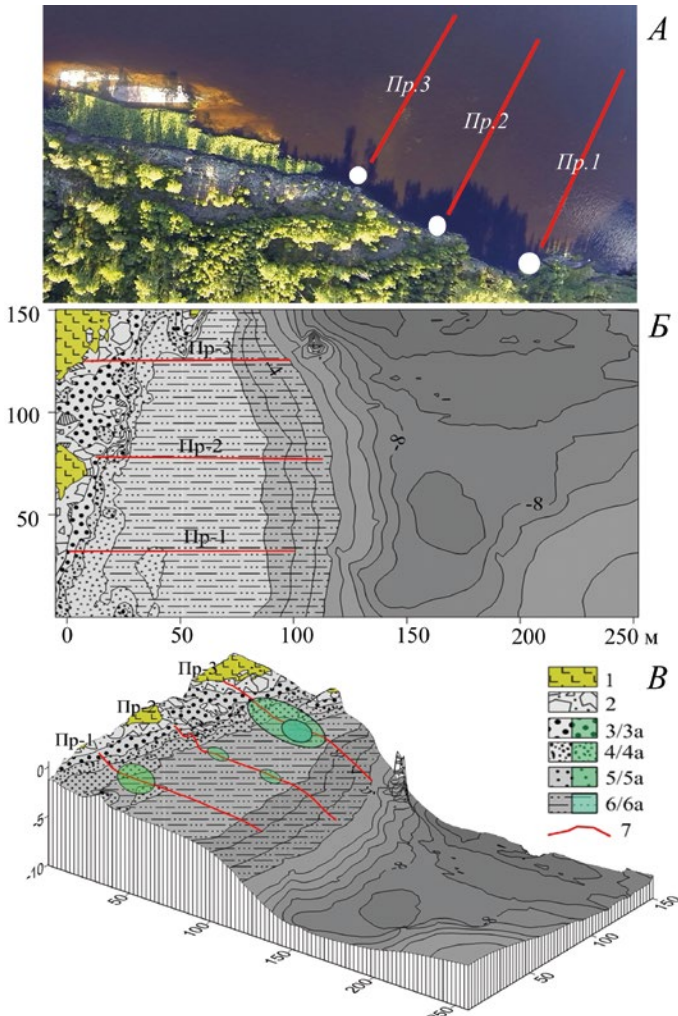


Рис. 5.1.8 – Расположение профилей (Пр1, Пр² и Пр³) протяженностью 100м на аэроснимке с БПЛА (А), батиметрическая схема полигона (Б) и блок-диаграмма расположения ландшафтных фаций (В) на полигоне о. Карпансаари (север Ладоги):

1 – фация скального монолита; 2 – фация крупных обломков (хаотическое нагромождение крупных фрагментов горных пород поперечником до полуметра и более на малых глубинах); 3 – фация переходного литологического состава (перемешаны крупные и мелкие обломки, щебенка, имеются достаточно обширные пространства, заполненные мелким илесто-песчаным грунтом, на которых видны следы жизнедеятельности биоты; глубины – от 0,5 до 1,5 м); 3а – фация переходного литологического состава с зарослями рдеста; 4 – фация заиленного песка (преобладают мягкие заиленные песчаные и илистые грунты с развитием синезеленых водорослей и заселенные крупными моллюсками сем. Unionidae; глубины 1,6–2 м); 4а – фация заиленного песка с зарослями макрофитов с доминированием рдеста и лютика земноводного; 5 – фация алевропесков (2–3 м); 5а – фация алевропесков с зарослями макрофитов; 6 – фация алевритов (3–10 м и более); 6а – фация алевритов с зарослями макрофитов

В результате проведенных исследований удалось показать, что наибольшей структурной сложностью донных ландшафтов обладает прибрежная зона озера, причем имеются отличия для разных частей озера, во многом обусловленные морфометрическими особенностями берегового склона, что в свою очередь связано с геологическим строением. Отмечено, что с ростом крутизны склона наблюдается более резкая смена ландшафтных фаций и меньшее их разнообразие. Высокая сложность ландшафтов выявлена для относительно пологих участков береговой зоны с неровным мезорельефом, сформированным за счет гляциальных моренных отложений.

5.2 Плотность частиц донных отложений Ладожского озера

Плотность частиц наносов является одной из важнейших характеристик, влияющих на гидродинамические процессы в водных объектах, в частности, на процессы взаимодействия водной массы с донными отложениями [Поздняков, 2021]. До последнего времени практически во всех исследованиях и инженерных разработках плотность твердых частиц, как правило, принималась постоянной и равной $2,65 \text{ г/см}^3$, что характерно для большинства классических работ [Великанов, 1955; Гончаров, 1954; Караушев, 1977]. Исследованиям вариаций плотности твердых частиц естественных водоемов уделялось недостаточное внимания даже в специализированных работах [Семенович, 1966]. Однако если рассматривать донные отложения, то их формирование обусловлено целым рядом различных причин – поступлением в водный объект речных и эоловых наносов, продуктов абразии берегов, накоплением продуктов химических реакций, осаждением остатков отмирающих организмов (аллохтонных, т.е. поступающих в водный объект извне) и автохтонных (образующихся в самом водном объекте). Кроме того, особенности современного антропогенного воздействия обуславливают появление новых видов твердых частиц в водных объектах, например, частиц микропластика. Все эти составляющие имеют очень широкий диапазон значений плотности. Например, для минеральных частиц характерны следующие значения [Физические величины, 1991]: графит – $2,1 \text{ г/см}^3$, кварц – $2,6 \text{ г/см}^3$, апатит – $3,1\text{--}3,2 \text{ г/см}^3$, гранит – $2,5\text{--}3,05 \text{ г/см}^3$, базальт – $2,7\text{--}3,2 \text{ г/см}^3$, корунд – $3,9\text{--}4,5 \text{ г/см}^3$, пирит – $5,0 \text{ г/см}^3$.

Плотность частиц наносов может достигать больших значений при размывании водой рудных жил, содержащих, например, серебро (плотность $10,0\text{--}11,0 \text{ г/см}^3$), золото (плотность $15,0\text{--}19,0 \text{ г/см}^3$) [Физические величины, 1991] или другие тяжелые металлы. В то же время твердые органические частицы и частицы микропластика имеют, как правило, меньшую плотность: поливинилхлорид – $1,35\text{--}1,43 \text{ г/см}^3$, полиэтилентерефталат – $1,4 \text{ г/см}^3$, полиуретан – $1,25 \text{ г/см}^3$, поликарбонат – $1,2\text{--}1,3 \text{ г/см}^3$, капрон $1,1\text{--}1,2 \text{ г/см}^3$. Некоторые виды пластиков (например, полиэтилен) вообще могут иметь плотность меньше 1 г/см^3 . Таким образом, для более глубокого анализа процессов формирования донных ландшафтов требуется оценка вариаций плотности донных отложений, которая может определяться физико-географическими и геологическими условиями. Можно предполагать, что эти вариации могут быть значимыми даже для различных районов одного и того же водного объекта

в случае его достаточно крупных размеров в зависимости от особенностей строения и хозяйственного использования водосборных бассейнов притоков.



Рис. 5.2.1 – Дночерпатель ДАК 250

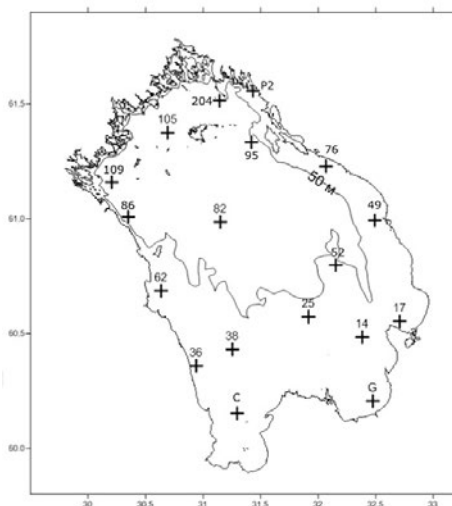


Рис. 5.2.2 – Станции отборов проб донных отложений Ладожского оз.

В этой связи, в рамках исследований, выполнявшихся ИНОЗ РАН в 2020 г., решалась задача количественной оценки плотности частиц донных отложений Ладожского оз. В процессе этих работ выполнены отборы проб с характерных участков дна. Как правило, использовался дночерпатель ДАК 250 [Поздняков, 2012] (рис. 5.2.1).

На рис. 5.2.2 приведены станции отборов проб в ходе проведенных экспедиционных исследований. При этом отборами проб были охвачены основные части дна Ладожского оз. в различных его районах для максимального учета их особенностей. Для всех отобранных проб была выполнена оценка плотности частиц в лаборатории гранулометрического анализа ИНОЗ РАН. Анализ проводился пикнометрическим методом в соответствии с ГОСТ 5180–2015 [ГОСТ 5180–2015, 2015]. В табл. 5.2.1 приведены результаты выполненных анализов. Номера станций, указанных в таблице, приведены на рис. 5.2.3. Кроме того, в данной таблице приведены результаты визуальной оценки осредненного гранулометрического состава частиц в отобранных пробах донных отложений.

По результатам выполненных анализов впервые была составлена карта-схема распределения плотности донных отложений Ладожского оз., приведенная на рис. 5.2.3.

Как видно из рис. 5.2.3, наибольшая плотность частиц донных отложений водоема имеет место в зонах преобладающего содержания минеральной составляющей в общем составе наносов, т. е. в районах распространения песчаных грунтов преимущественно в южной части. Для оценки процентного содержания органической составляющей донных отложений выполнено определение потерь при прокаливании (ППП) в муфельной печи. Резуль-

таты анализов вместе с соответствующими значениями плотности частиц приведены в табл. 5.2.2.

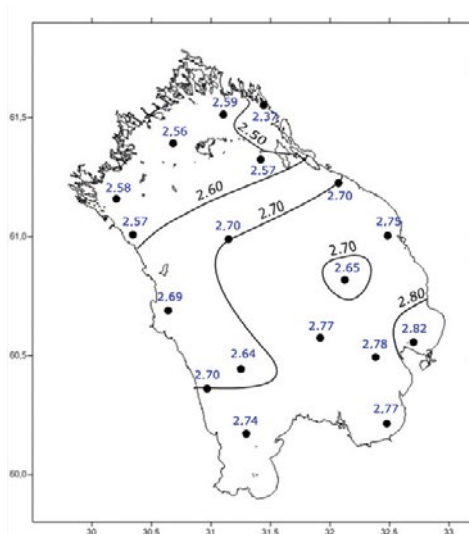


Рис. 5.2.3 – Карта-схема распределения плотности донных отложений Ладожского оз.

Таблица 5.2.1

**Значения плотности частиц донных отложений на станциях отбора в Ладожском оз.
(по результатам измерений 2020 г.)**

№ п\п	Номер станции	Гран. состав (визуально)	Плотность частиц, г/см³
1	P2	Ил	2,367
2	82	Глина	2,696
3	105	Глина	2,557
4	109	Глина	2,576
5	204	Глина	2,585
6	52	Глина	2,652
7	86	Глина	2,658
8	95	Глина	2,569
9	14	Супесь	2,782
10	C	Мелкий песок	2,743
11	76	Мелкий песок	2,703
12	36	Песок	2,705
13	25	Песок	2,773
14	38	Песок	2,644
15	G	Песок	2,771
16	62	Песок	2,687
17	17	Крупный песок	2,821
18	49	Крупный песок	2,753

В табл. 5.2.2 станции расположены в порядке увеличения измеренной плотности частиц. Из представленных результатов видно, что для северной глубоководной зоны характерны меньшие значения плотности и большие значения органической составляющей, содержащейся в пробах, по сравнению с донными отложениями, отобранными из южных районов акватории. Таким образом, в результате проведенной работы качественный вывод получил свое количественное выражение.

Кроме того, в рамках данного исследования выполнено визуальное сравнение фрагментов дна на характерных участках с различной плотностью частиц. Для этих целей использованы фотографии с соответствующих участков дна, полученные с использованием подводного аппарата Limnoscout, разработанного и изготовленного в ИНОЗ РАН. Подводный аппарат позволяет выполнять фотографирование на максимальных глубинах, характерных для Ладожского оз. [Дудакова, 2018]. Фотографии, сделанные в окрестностях станций 17 (плотность частиц донных отложений 2,8 г/см³) и 105 (плотность частиц донных отложений 2,56 г/см³), приведены на рис. 5.2.4 и 5.2.5 соответственно. Как видно из представленных фотографий дна, имеет место серьезное различие в микроформах, сформированных в различных районах озера частицами различной плотности и размеров. Безусловно, донный рельеф в обоих случаях образован в результате воздействия большого количества различных факторов. Тем не менее наглядно видно, что плотность частиц донных отложений оказывает влияние как на результирующие формы, так и на условия взаимодействия твердых частиц с водной массой в придонной зоне. Визуально подтверждается вывод о значительном влиянии изучаемой характеристики на гидродинамические процессы и необходимости учета ее вариаций.

Таблица 5.2.2

Соотношение величин процентного содержания органической составляющей и плотности частиц донных отложений Ладожского оз.

Номер станции	Гран. состав (визуально)	Плотность частиц донных отложений, г/см ³	Органическая составляющая, %
P2	Ил	2,37	19,7
105	Глина	2,56	10,5
109	Глина	2,58	10,2
204	Глина	2,58	10,4
52	Глина	2,65	8,6
86	Глина	2,66	11,6
62	Песок	2,69	1,2
36	Песок	2,70	0,6
76	Мелкий песок	2,70	0,6
C	Мелкий песок	2,74	0,5
49	Крупный песок	2,75	0,9
25	Песок	2,77	1,0
14	Супесь	2,78	3,7
17	Крупный песок	2,82	0,7

В данном случае имеет место наглядная демонстрация зависимости плотности частиц донных отложений от соотношения органической и минеральной составляющих частей в общем объеме проб. При этом содержание как органической, так и минеральной частей может меняться в широких пределах, что определяется большим количеством факторов. В результате создается весьма пестрая картина актуальных значений плотности частиц донных отложений, которую нужно учитывать при современном выявлении причинно-следственных связей возникновения того или иного экологического состояния водного объекта.

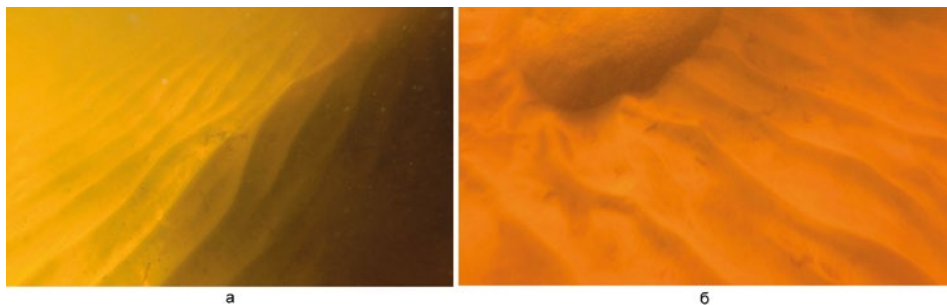


Рис. 5.2.4 – Фотографии дна Ладожского оз., сделанные подводным аппаратом «Лимноскаут» в окрестностях станции 17 (плотность частиц донных отложений $2,8 \text{ г/см}^3$). Фото М. О. Дудакова

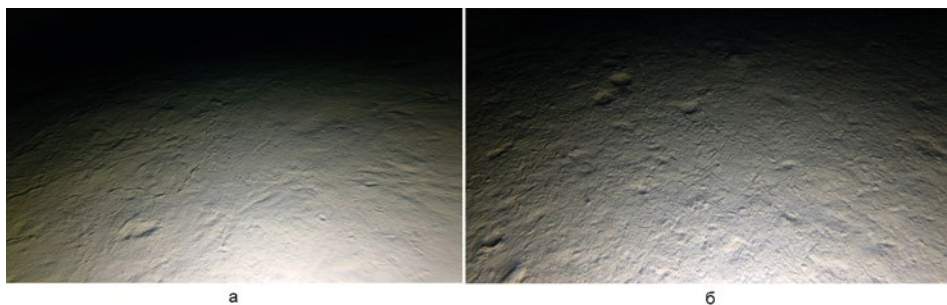


Рис. 5.2.5 – Фотографии дна Ладожского оз., сделанные подводным аппаратом «Лимноскаут» в окрестностях станции 105 (плотность частиц донных отложений $2,56 \text{ г/см}^3$). Фото М. О. Дудакова

Представленная на рис. 5.2.3 карта-схема распределения плотности донных отложений является уникальной не только для Ладожского оз., но и для крупных водных объектов России. В данном случае в количественном виде демонстрируется уменьшение плотности донных отложений при переходе от южных районов Ладоги к северным. В дальнейшем, по-видимому, потребуется детализация измерений плотности в зависимости от конкретных решаемых задач и особенностей района работ на озере. Сказанное относится к современным исследованиям по взаимодействию донных отложений с водными массами, оценке внутренней нагрузки, моделированию изменения экологического состояния озера и решению целого ряда других задач.

5.3 Геоморфологические особенности дна и берегов Ладожского озера

Геоморфологические особенности береговой зоны. Береговая зона Ладожского оз. разделяется на северную (от г. Приозерска на западе до г. Питкяранта на востоке), восточную (от г. Питкяранта до северной границы Свирской губы), южную (от Свирской губы на востоке до западного замыкания бухты Петрокрепость) и западную (от бухты Петрокрепость до г. Приозерска) части. Основание для такого районирования заключается в очевидных морфологических различиях, присущих берегам этих районов.

Геоморфологические характеристики каждой из этих частей основаны на данных наземных и, особенно, воздушных съемок и иллюстрируются на рис. 5.3.1–5.3.4. На рис. 5.3.5 приводится карта-схема типов берегов Ладожского оз. При ее составлении использовались как авторские данные, так и материалы предшествующих работ. В частности, учитывалась геоморфологическая схема Е. Е. Мусатова, где выделены абразионные, аккумулятивные и техногенные берега [Геоэкология..., 1995]. Также были использованы схемы распределения донных отложений Л. В. Сергеевой [Ладожское..., 2002], на которых, кроме прочего, обозначены береговые отложения, и подробные описания А. П. Алхименко, М. А. Спиридонова, В. Н. Рыбакина [Ладожское..., 2002]. В результате синтеза данных появилась возможность более точной и подробной визуализации типов берегов, что и было реализовано в новой карте-схеме, на которой выделены 7 их разновидностей (рис. 5.3.5).

Северный берег, сложенный в основном архейско-протерозойскими породами (мигматизированными и гнейсированными гранитоидами, кристаллическими сланцами, габброидами и пр.) – фиардово-шхерный (рис. 5.2.1, а), характеризуется наличием узких заливов, далеко вдающихся в сушу (фиардов), и множеством шхер – островов различного размера (со стороны озера). Формы прибрежных выходов кристаллических пород часто представлены «бараньими лбами» – куполовидными выступами, удлинёнными и изометричными в плане, разбитыми следующими системами трещин: 0°, 20°, 30°, 45°, 50°, 60°, 70°, 80°, 90°, 100°, 110°, 120°, 135°, 140°, 160°, 170°, т. е. фиксируется практически весь лимб (рис. 1, к). Некоторые из трещин этих направлений, а именно 0°, 45°, 50°, 90°, 120°, 135°, видны на врезках к рис. 5.3.1, г – е, где показаны ориентированные наземные снимки трещиноватости. Измерялись азимуты вертикальных и крутопадающих трещин.

Развитие трещин с большим числом простираций говорит о том, что их часть, вероятно, имеет локальный масштаб (их простираения обычно довольно беспорядочны), другая – тектонический региональный (эти трещины образуют ограниченное количество систем определенных направлений), третья принадлежит к системам планетарной трещиноватости (с простираениями 0°, 45°, 90°, 135°).

Воздушные снимки (особенно высотные) позволяют выделить наиболее значимые системы трещин, отбросив локальные (трещины отдельности, экзогенные и пр.) процессами. Для района северного «угла» Ладожского оз.

(станции наблюдения С1, С4, С7 – см. рис. 5.3.5) это: 0°, 20°, 30°, 45°, 90°, 135°, 160° (рис. 5.3.1, к). На ориентированных вертикальных снимках, сделанных с БПЛА (рис. 5.3.1, г – 1е), прослеживаются системы крупных трещин, которые можно связать с тектоническими разломами. Системы 0°, 45°, 90° и 135° соответствуют направлениям систем планетарной трещиноватости [Анохин, 2006], прочие – 20°, 30°, 160° – вероятно, можно отнести к региональным тектоническим.

Возможности, которые предоставляет воздушная съемка для выделения систем тектонических трещин, иллюстрируются также на рис. 5.3.1, ж – и, где отчетливо видны простирания 0°, 30°, 45°, 70°, 90°, 135°, 160°, вычленяющие блоки в теле кристаллического массива. Уточнение формы этих блоков, положения разломов в районе исследований и увязка их сети с разломами прилегающих территорий и акваторий [Анохин и др., 2016] в дальнейшем выводят на выявление морфоструктурных узлов в зонах пересечения разломов и связанных с ними экстремальных природных явлений [Ранцман, Гласко, 2004].

Сравнительно слабое воздействие, выражающееся в преобладающей абразии, на северную часть Ладоги оказывают озерные процессы. Материковые и островные берега, сложенные валунно-глыбовыми отложениями (с некоторой примесью песчаных осадков), авторы относят к абразионно-аккумулятивному типу берегов – поскольку слагающие их осадочные породы являются, скорее всего, продуктами размыва более древних ледниковых форм и переотложения слагавшего эти формы обломочного материала. Использование космических снимков (Google Earth) позволяет распространить вышеописанный тип берегов на всю северную часть береговой зоны озера (рис. 5.3.5).

Западный берег в основном аккумулятивный и абразионно-аккумулятивный. Здесь преобладают пляжи шириной до 10–20 м с уклонами до 5° (рис. 5.3.2, в, 5.3.2, д – ж), сложенные рыхлыми отложениями с разными соотношениями псефитовых и псаммитовых размерностей обломков.

Выше склоны имеют уклоны до 30–40° и бывают террасированы. Часто берега, морфологически мало отличаясь от пляжей, сложены обломками псефитовых размерностей (рис. 5.3.2, г). Глыбово-валунные отложения здесь, по-видимому, накопились вследствие разрушения (размыва) и переотложения материала разновозрастных морен. Такие берега, будучи сформированы аккумуляцией крупнообломочных отложений, подвержены частичному размыву и являются, таким образом, разновидностью абразионно-аккумулятивных [Сафьянов, 1996]. Довольно часто здесь накапливается материал алевропелитовой размерности, на котором происходит интенсивное зарастание (рис. 5.3.2, а – в). В районе станции наблюдения 32 с воздуха фиксируется широкая зона подводного мелководья до глубины 3–4 м (рис. 5.3.2, г). Судя по снимку, в этой зоне дно имеет субгоризонтальную поверхность, сложено песками и довольно сильно заросло.

Мелководье до глубин 3–5 м хорошо видно также на рис. 5.3.2, б – е, где прослеживаются подводные продолжения русел, а кое-где по морфологии дна можно судить о прибрежных литодинамических процессах. В левой части рис. 5.3.2, е, на дне можно видеть темную вертикальную полосу с пря-

мыми краями – западный ладожский фарватер, возможность для наблюдений за состоянием краев которого дает воздушная съемка.

Южный берег характеризуется наличием трех крупных бухт – Свирской, Волховской и Петрокрепость, разделенных двумя низменными заболоченными полуостровами. Морфологически южный берег в какой-то мере схож с западным, но характеризуется более интенсивным зарастанием макрофитами с формированием прибрежных ветландов. Будучи в основном аккумулятивным, он сложен полимиктовыми песками с примесью гранитоидного валунно-галечного материала. Иногда эти валунно-галечно-песчаные отложения подстилаются глинистыми. Часто на таких берегах сформированы пляжи шириной до 10 м и более (рис. 5.3.3, а – д). На рис. 5.3.3 хорошо видно прибрежное мелководье в районе станции Ю2, сложенное песком с существенной примесью (около 30%) валунов размерами до 1–2 м.

Рис. 5.3.3, д – ж, показывает, что бухты южного берега разделены между собой не только абразионно-аккумулятивными мысами, но и аккумулятивными выступами суши с обильной растительностью, сложенными, по-видимому, алевропелитовыми отложениями. Форма берегов кутовой части Волховской губы определяется в основном приустьевыми частями рек Волхов и Сясь, обычно сложенными низкими, песчаными, сильно заросшими косами и пляжами. Берега и мелководье бухты Петрокрепость довольно схожи с таковыми в Волховской губе – низкие аккумулятивные, частично заросшие, сложенные песками и алевропелитовыми отложениями с существенной примесью гальки, щебня и валунов.

Космические данные позволяют составить обобщенное представление о южном побережье Ладоги. Одна из его характерных черт – весьма интенсивное зарастание макрофитами, в том числе и акваториальной части. Во многих местах растительность «наступает» на озерное мелководье на расстояния, измеряемые километрами. В некоторых местах сквозь заросли просматриваются участки пляжей и береговых песчаных валов. Таким образом, можно сделать вывод, что южные берега Ладоги в существенной своей части – это заросшие пляжи (рис. 5.3.5).

Интенсивное площадное зарастание макрофитами представляется наиболее значимым процессом для южного берега, и авторы выделяют его в качестве главного берегообразующего в этой части, а тип берега обозначают как «ветланды» (рис. 5.3.5). Возможно, какое-то влияние на береговые процессы (в т. ч. и на зарастание макрофитами) в южной зоне оказывает Новоладожский канал. На протяжении большей части южной береговой зоны он располагается в нескольких десятках метров от берега озера параллельно ему. Учитывая, что грунт, изъятый при строительстве канала, перемещался большей частью на его «озерный» борт, можно предположить, что на существенном своем протяжении южный берег Ладоги, по сути, является техногенным (рис. 5.3.5).

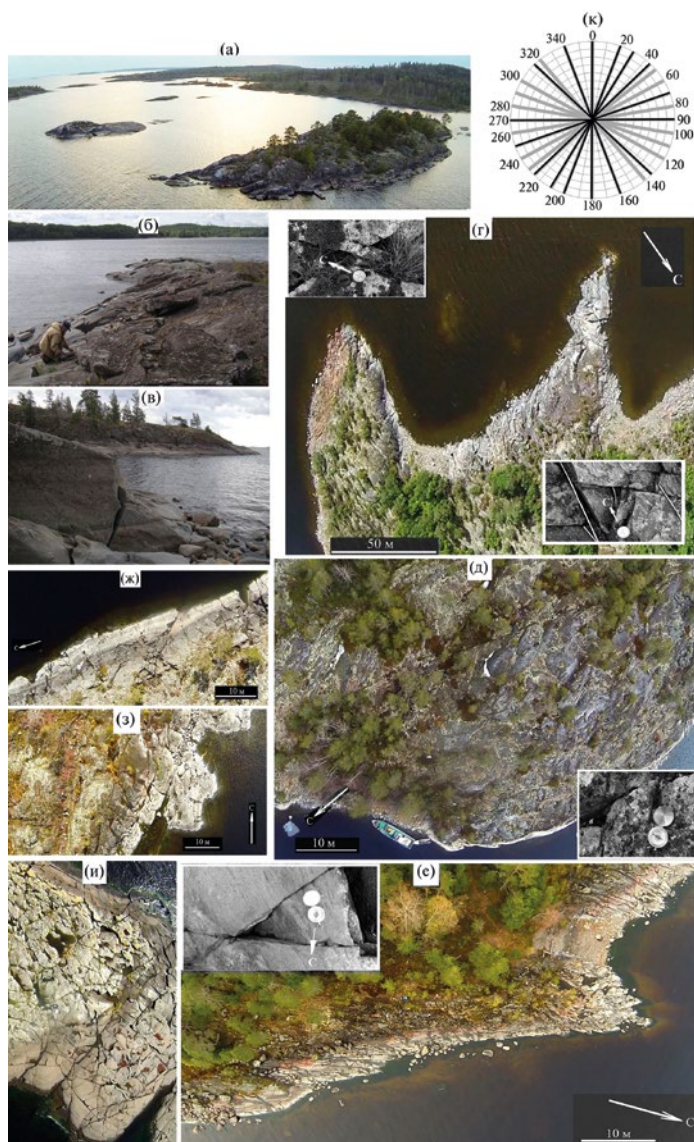


Рис. 5.3.1 – Северные берега Ладожского оз.: (а) – общий вид на шхерные берега в районе станции С1 (расположение станций – см. рисунок 5); (б), (в) – наземные снимки шхерных берегов в районе станции С12; (г) – вертикальный снимок тех же берегов на станции С12 (на врезках – ориентация трещин в коренных породах, зафиксированная на земле); (д) – вертикальный снимок берега в районе станции С1 (на врезке – ориентация трещин в коренных породах, зафиксированная на земле); (е) – вертикальный снимок берега в районе станции С4 (на врезке – ориентация трещин в коренных породах, зафиксированная на земле); (ж) – вертикальный снимок берега в районе станции С7; (з) – вертикальный снимок берега в районе станции С7; (и) – перспективный снимок берега в районе станции С7; (к) – роза-диаграмма наиболее часто встречающихся направлений трещин на станциях наблюдения северного берега Ладожского оз. Серые лучи – направления трещин, измеренные на земле, черные лучи – направления трещин, измеренные на земле и видимые на воздушных снимках (на круговой шкале – градусы лимба)

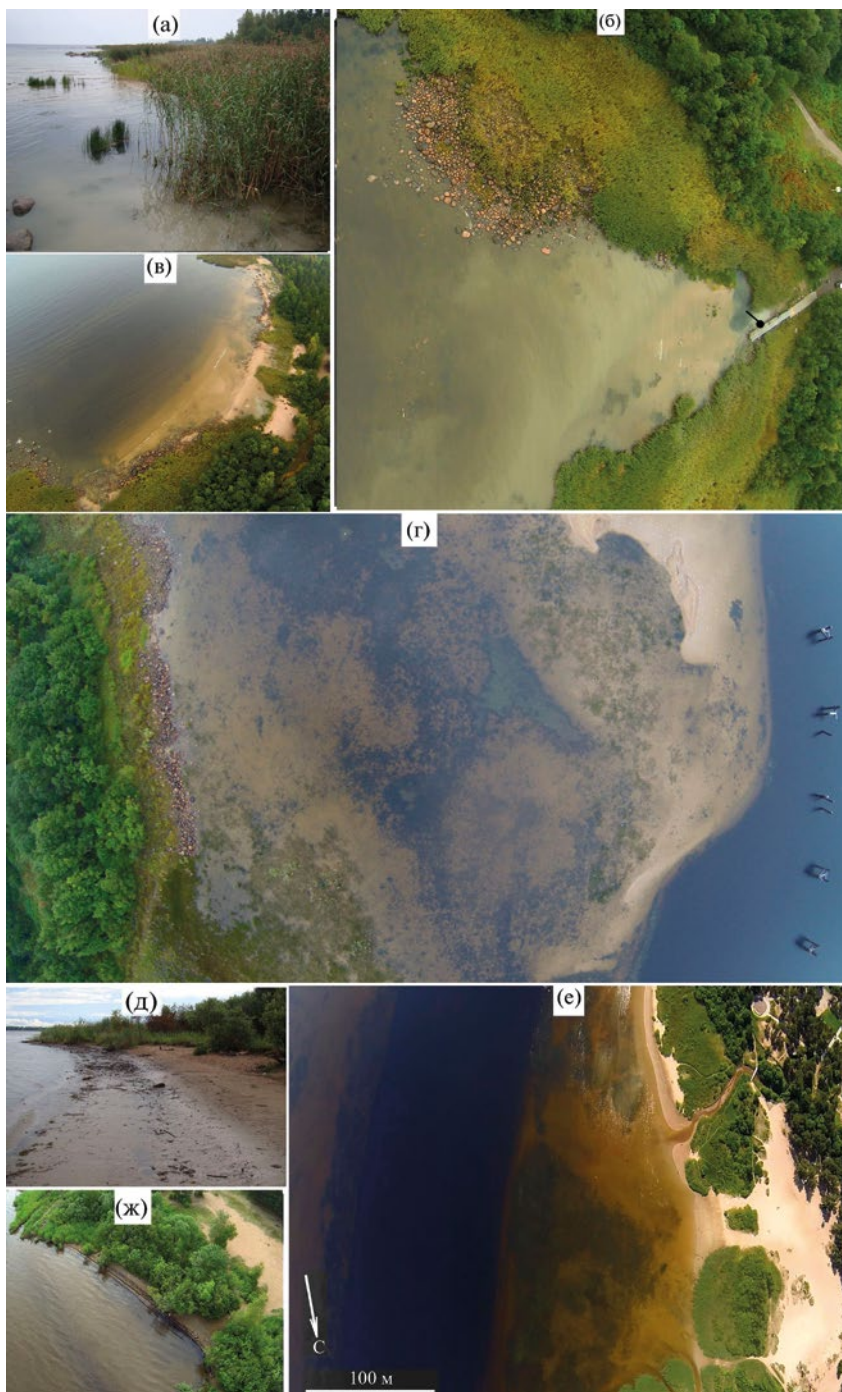


Рис. 5.3.2 – Западные берега Ладожского оз.: (а) – заросший растительностью берег в районе станции 31; (б), (в) – тот же берег, снимки с воздуха; (г) – вертикальный снимок берега в районе станции 32; (д) – пляж в районе станции Ю6; (е), (ж) – тот же берег, виды с воздуха. Номера станций показаны на рис. 5.3.5

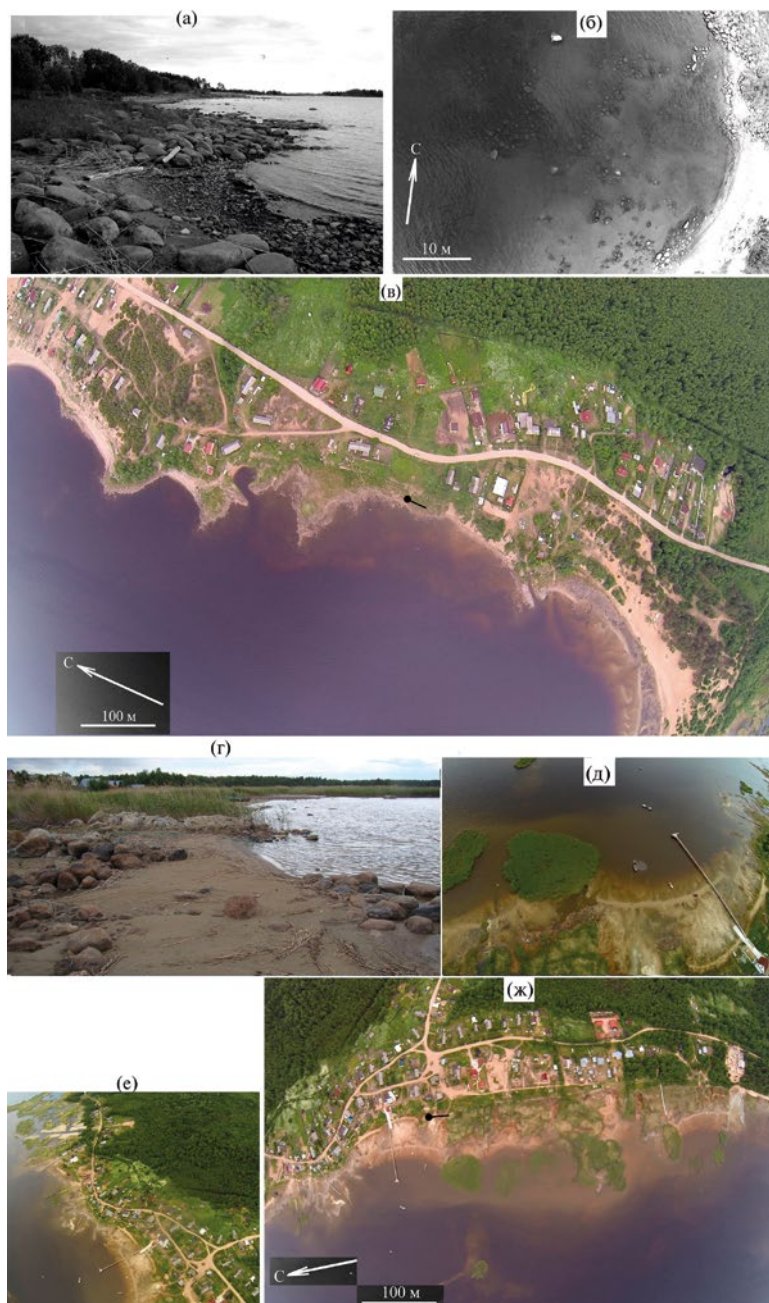


Рис. 5.3.3 – Южные берега Ладожского оз.: (а) – наземный снимок пляжа в районе станции Ю2; (б) – там же, снимок с воздуха на малой высоте; (в) – там же, снимок с воздуха на большой высоте, черная точка с отрезком – положение и ориентация наземного снимка (а); (г) – наземный снимок пляжа в районе станции Ю1; (д) – там же, перспективный снимок с воздуха на малой высоте; (е) – там же, перспективный снимок с воздуха на большой высоте; (ж) – там же, вертикальный снимок с воздуха на большой высоте, черная точка с отрезком – положение и ориентация наземного снимка (г). Номера станций показаны на рис. 5.3.5

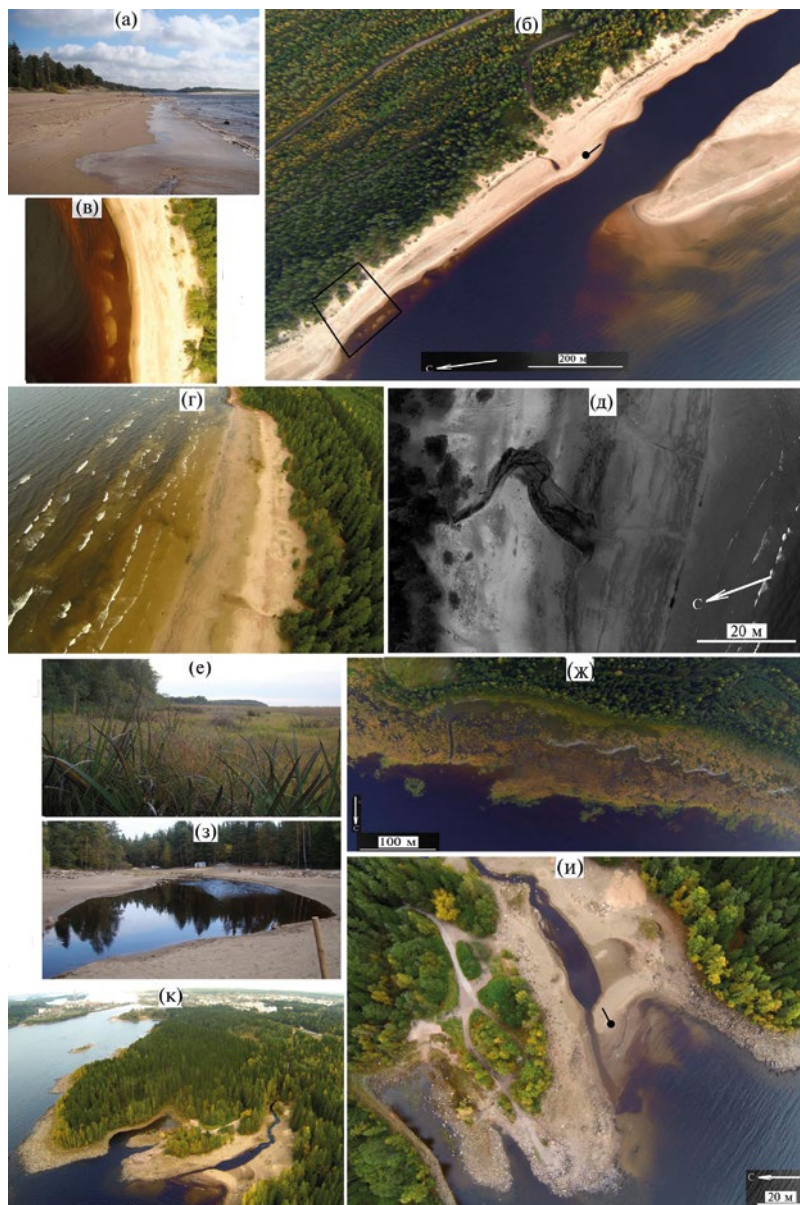


Рис. 5.3.4 – Восточные берега Ладожского оз.: (а) – пляж в районе станции В1 (наземный снимок); (б) – там же, вертикальный снимок с воздуха, черная точка с отрезком – положение и ориентация наземного снимка (а), черный контур – положение снимка (в); (в) – там же, вертикальный снимок с малой высоты; (г) – пляж в районе устья р. Видлицы (перспективный воздушный снимок), станция В3; (д) – там же, вертикальный снимок с воздуха; (е) – СВ берег о. Лункулансаари, заросший растительностью (наземный снимок), станция В7; (ж) – там же, вертикальный воздушный снимок, черная точка с отрезком – положение и ориентация наземного снимка (е); (з) – устье ручья в районе станции В9 (наземный снимок); (и) – там же, вертикальный воздушный снимок, черная точка с отрезком – положение и ориентация наземного снимка 8; (к) – там же, перспективный снимок с видом на г. Питкяранта на заднем плане. Номера станций показаны на рис. 5.3.5

Восточный берег в своей южной части представляет полосу широких пляжей, протянувшуюся примерно от Свирской губы до устья р. Видлицы (станция ВЗ – рис. 5.3.5) и в какой-то мере далее до о. Лункулансаари (рис. 5.3.4, а – д). Он представлен пляжами, сложенными полимиктовыми песками, шириной до 40–70 м, с уклонами до 3–5°, которые ограничиваются полосами дюн высотой до 10–20 м, с уклонами 40–60°; в основании дюн пески имеют эоловую слоистость с мощностью слоев в первые сантиметры.

Подводные береговые склоны осложнены рядами (до 3–4 рядов) подводных баров, которые распространяются до глубин 4–5 м. Юго-восточный берег имеет признаки наиболее интенсивных аккумулятивных процессов в Ладожском оз. По-видимому, это связано с господством западных ветров, открытостью, относительной прямолинейностью и наветренным положением территории.

В интервале от устья р. Видлицы до о. Лункулансаари восточный берег Ладожского оз. осложняется участками валунно-глыбовых отложений, формирующих мысы и островки и заполняющих пляжи. Последние здесь глыбово-валунные, песчано-глыбово-валунные, шириной до 40–50 м, уклонами до 1–2°. Далее на северо-запад вдоль берега озера протянулась группа островов, наиболее крупными из которых являются о-ва Лункулансаари и Мантсинсаари. Берега о. Лункулансаари в основном низкие, аккумулятивные, поросшие тростником и др. растениями. На северо-восточном окончании острова песчаная коса шириной до 3–5 м ограничивает обширную заросшую площадь (примерно 300×3000 м), которая затопляется при высоких уровнях воды в Ладожском оз.

В средней части о. Мантсинсаари и на прилегающих берегах начинают встречаться выходы коренных пород, в частности, на Мантсинсаари выходят долериты восточного окончания Валаамского силла, а вблизи г. Питкяранта при впадении в озеро ручья Лотиноя (станции В9) имеются куполообразные выходы серо-красных крупнокристаллических гранитов. Коренные породы окружены рыхлыми отложениями: в устье Лотиноя приустьевые песчаные косы образуют пляжи до 20–30 м шириной, уклоны у уреза воды – до 30–40°, выше – до 5–10° (рис. 5.3.4, з – к). При устье располагается подпорная коса шириной около 10 м. Берега озера на юго-восток и северо-запад от станции В9 сложены валунно-глыбовыми отложениями.

На схеме типов берегов Ладожского оз. (рис. 5.3.5) видно, как протяженные участки эолово-волновых пляжей сменяются к северо-западу небольшими бухтами с песчаными пляжами, ограниченными валунно-глыбовыми мысами. Далее на северо-запад увеличивается удельный вес берегов, сложенных валунно-глыбовыми отложениями. Можно отметить весьма интенсивное зарастание берегов (в основном восточных) в районе о-вов Лункулансаари, Мантсинсаари.

По данным воздушной съемки уточнены направления трещиноватости коренных пород на ряде массивов северного берега в районе Сортавала – Питкяранта: 0°, 20°, 30°, 45°, 90°, 135°, 160°. Системы 0°, 45°, 90° и 135° соответствуют направлениям систем планетарной трещиноватости.

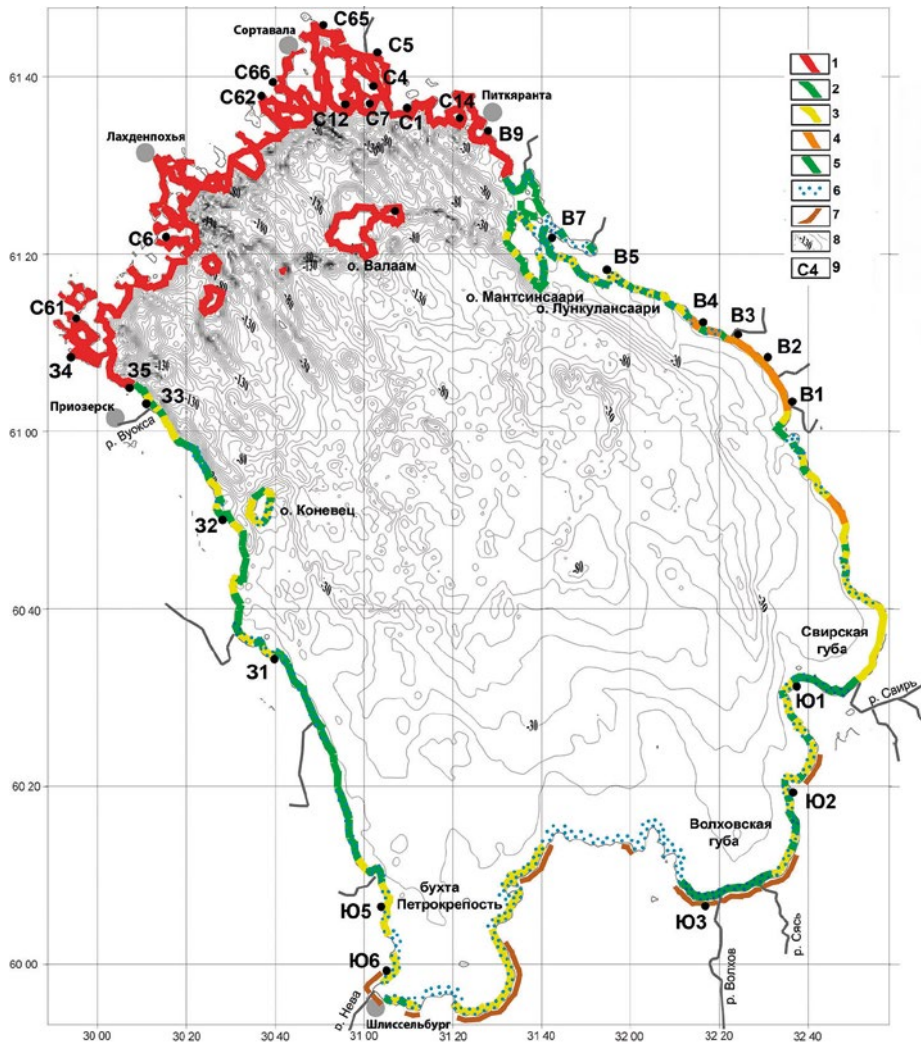


Рис. 5.3.5 – Карта-схема типов берегов Ладожского оз. (с использованием [Ладожское..., 2002, 2015, Ладога, 2013; Геоэкология..., 1995]). Берега, мало измененные озерными процессами: 1 – с ледниково-тектоническим расчленением – фиардовые и шхерные. Берега, существенно измененные озерными процессами: 2 – абразионно-аккумулятивные, сложенные существенно валунно-глыбовыми отложениями; аккумулятивные: 3 – созданные волновыми процессами, пляжевые, 4 – созданные волновыми и озовыми процессами, пляжево-дюнные, 5 – созданные устьевыми процессами, дельтовые; 6 – ветланды, 7 – техногенно-измененные берега, 8 – станции наблюдения и их номера, 9 – изобаты, м

Геоморфологические особенности дна Ладожского оз. В ИНОЗ РАН накопился значительный объем информации о рельефе дна Ладоги. Создана наиболее полная из всех существующих цифровая модель рельефа (ЦМР) с пространственным разрешением 500 м. На основе этой модели можно корректировать первичные морфометрические характеристики озера, проводить геоморфологический и, в частности, линеаментный анализ рельефа,

составлять батиметрические и геоморфологические карты [Науменко, 1995; 2013; Sorokin et. al., 1996].

По морфометрии рельефа дно Ладожского оз. в первом приближении можно разделить на две крупные зоны – северо-западную и юго-восточную, с некоторой переходной подзоной между ними. Северо-западная зона располагается в пределах Балтийского кристаллического щита, ее рельеф обусловлен тектоническими особенностями строения его юго-восточной окраины, сложенной в существенной степени обнаженными кристаллическими породами архейско-протерозойского возраста (в основном гнейсо-граниты и гнейсы), а также терригенными и эффузивными породами рифея. Образования кристаллического щита разбиты многочисленными разрывными нарушениями. Рельеф дна в основном долинно-грядовый. Протяженные гряды имеют относительную высоту, достигающую 100–150 м, длину до 5–10 км, ширину до 1–5 км по основанию.

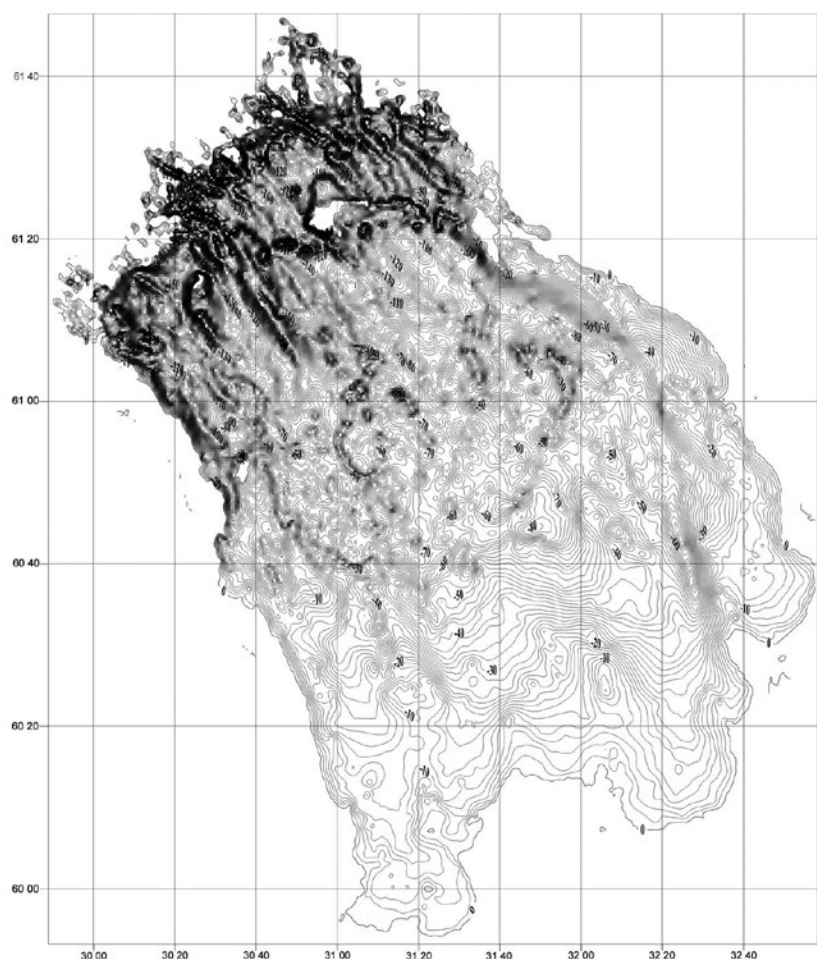


Рис. 5.3.6 – Батиметрическая карта Ладожского оз. с изобатами через 2 м

Гряды возвышаются над всхолмленной поверхностью с высотами вытянутых холмов до 20–50 м, имеющих общий наклон на северо-запад. Заметна преобладающая направленность как гряд, так и холмов в северо-западном направлении. Перепады глубин, характеризующие расчлененность рельефа в северо-западной зоне, колеблются от 5 м/км в понижениях между грядами до 30–50 м/км на склонах гряд.

Примерно от широты Приозерска на юго-восток склон кристаллического щита все более перекрывается четвертичными отложениями, включающими озерные, озерно-ледниковые и прочие отложения. Южнее широты о. Коневец по всей ширине дна озера кристаллические породы щита перекрываются вендско-фанерозойскими отложениями, входящими в плитный комплекс. Далее простирается юго-восточная зона сглаженного рельефа, распространенного на все более мощном осадочном чехле вендских и фанерозойских отложений Русской платформы. Рельеф юго-восточной зоны можно назвать равнинным. Расчлененность рельефа в юго-восточной зоне крайне низкая, перепады глубин составляют 1–3 м на км. Дно здесь так же, как и в северо-западной зоне, имеет слабый наклон на северо-запад.

На основе существующей ЦМР дна Ладоги была построена батиметрическая карта озера с изобатами через 2 м (рис. 5.3.6). На ее основе был проведен линеаментный анализ протяженных форм рельефа – трассирование осей гряд, долин и уступов с последующим объединением цепочек первичных линий рельефа, имеющих сходные устойчивые направления. Выделены линеаменты – полигенные линейные объекты, предположительно являющиеся поверхностными выражениями разрывных нарушений [Анохин, 2006].

На рис. 5.3.7 приводится схема выделенных линеаментов, на которой видны следующие особенности структурного плана дна Ладожского оз.: подчиненность направлений подавляющего большинства линеаментов нескольким главным взаимно ортогональным направлениям, тенденцию к чередованию диагональных систем с определенной протяженностью (около 20–30 км), что указывает на наличие регулярной взаимно ортогональной сети. В направленности линеаментов, показанной на розе-диаграмме на рис. 5.3.7, заметно преобладание систем: 140°, 0°, 90°, 40°. При этом общие закономерности направлений сохраняются, хоть и менее выражено, и в юго-восточной, платформенной части дна, что иллюстрирует существенную общность тектонического плана всей площади дна озера.

На схему линеаментов нанесены также уже известные разломы, выделяемые на суше – В. А. Рудником, Б. Г. Дверницким, на акватории – А. В. Амантовым [Амантов, 2014], Б. А. Ассиновской [Ассиновская, 2005]. Очевидно, что известные разломы хорошо вписываются в систему выделенных линеаментов, что подтверждает ее достоверность. Сеть линеаментов может служить основой для уточнения и дополнения сети разрывных нарушений.

По-видимому, рисунок линеаментов дна Ладожского оз. показывает блоковую расчлененность фундамента, подчиняющуюся 4 главным направлениям – меридиональному, широтному, диагональному СВ (40–50°) и диагональному ЮВ (140°), т.е. направлениям планетарной трещиноватости, или регматической сети [Анохин, 2006] с преобладанием СЗ-ЮВ систем направлений.

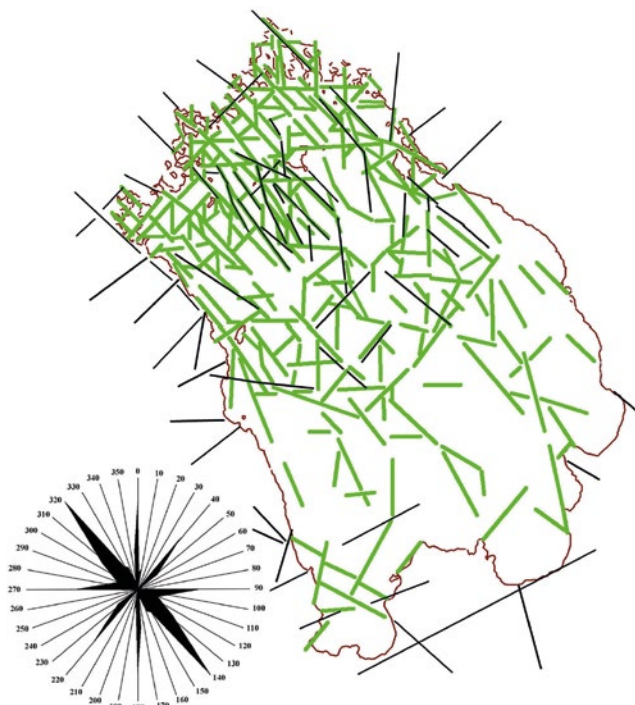


Рис. 5.3.7 – Схема линеаментов дна Ладожского оз. Зеленые отрезки – линеаменты; черные отрезки – известные разломы. На розе-диаграмме даны направления линеаментов, на круговой шкале – градусы лимба, на радиальных – длина линеаментов, км

Несмотря на существенную разницу в типах рельефа в пределах северо-западной и юго-восточной частей дна Ладожского оз., общие направления линейных форм рельефа одинаковы для всего дна озера и в общем соответствуют направлениям сети планетарной трещиноватости Земли. Выделенная на дне озера сеть линеаментов совпадает с известными дизъюнктивами, и, следовательно, с некоторой долей условности, сеть разломов может быть прослежена вдоль линий линеаментной сети. Уточнение расположения дизъюнктивов в районе Ладоги выявляет новые особенности тектонического строения района, что позволяет более обоснованно оценивать сейсмическую опасность, перспективы на эндогенные полезные ископаемые, геоэкологическую обстановку района.

При построении геоморфологической карты дна Ладожского оз. (рис. 5.3.8) применена методика, отработанная в ряде предшествующих работ на других акваториях [Плетнев и др., 2020], учтены наиболее важные построения предшественников [Амантов, Амантова, 2014; Геоэкология..., 1995; Ладога, 2013; Ладожское..., 1978]. Для построений использовались батиметрические основы с сечениями изобат через 2, 5 и 10 м, построенные на основе ЦМР дна Ладоги, что позволяло выделять границы геоморфологических объектов как в зонах с высокой расчлененностью рельефа, так и в зонах с низкой расчлененностью. Оконтуривание форм рельефа проводилось по высокоградиентным линиям сгущения изобат, соответствующих

наиболее крутым склонам и уступам. Далее определялись относительные превышения и понижения выделенных форм, проводился их сравнительный морфологический анализ для разных зон озера, с последующим выделением основных генетических типов.

По результатам геоморфологического анализа обнаруживаются не 2, как показывает предварительный взгляд на рисунок изобат (см. выше), а 3 крупные геоморфологические зоны: 1) структурно-денудационного долинно-грядового рельефа в северной части озера (зона Балтийского щита); 2) абразионно-аккумулятивного, в основном гляциального, рельефа в центральной части озера; 3) аккумулятивного рельефа в южной части озера (рис. 5.3.8). Выделяются также участки распространения прибрежного рельефа. В зоне структурно-денудационного рельефа выделены протяженные долины и гряды, вытянутые в основном с СЗ на ЮВ. В структуре гряд выделяются вытянутые и относительно изометричные «вершины» – наиболее приподнятые части, иногда поднимающиеся над уровнем воды и образующие острова. В составе долин имеются переуглубленные участки, часто изометричные, достигающие глубин 200 и более метров. Углы склонов между долинами и грядами могут достигать 5 и более градусов. Последние исследования с помощью донной видеосъемки обнаружили на нескольких склонах субвертикальные уступы высотой до нескольких десятков метров. Данный тип рельефа явно наследует тектоническую структуру района, здесь на поверхность дна выходят протяженные приподнятые и опущенные блоки Балтийского щита, разделенные обычно сбросами.

В зоне абразионно-аккумулятивного рельефа на фоне равнины, располагающейся в диапазоне глубин 50–110 м, выделяются гляциальные поднятия и впадины. Поднятия представляют собой разнообразные моренные формы, как протяженные (часто изогнутые) – озы, так и более мелкие изометричные – камы. Впадины обычно протяженные, видимо, образованные потоками талых вод. Перепады глубин здесь не превышают первых десятков метров, уклоны – первых градусов. В зоне развития аккумулятивного рельефа выделяются участки аккумулятивных равнин разных уровней: 10–20 м, 20–30 м, 30–50 м. Здесь же присутствует и некоторое количество мелких изометричных положительных ледниковых форм.

Особо выделяются прибрежные формы рельефа – там, где они могут быть выражены в масштабе карты. Это пологие береговые склоны, с уклонами до первых градусов, шириной до нескольких км (они развиты в основном в зоне абразионно-аккумулятивного рельефа), прибрежные гряды, вероятно, ледникового происхождения, развитые на южных берегах озера и береговые склоны в зоне фиардово-шхерных берегов в северной части озера.

Таким образом, геоморфологическое строение дна Ладожского оз. является довольно сложным не только в северной части озера, но и в центральной и южной его частях. Перепады глубин южнее широты Приозерска значительно ниже, чем в северной части, но количество форм рельефа вполне сопоставимо с таковым в северной части. Это обусловлено уже не обнаженностью тектонических блоков, а наличием гляциальных форм. В пределах каждой из зон имеется свой, характерный для данной зоны комплекс форм рельефа: в зоне структурно-денудационного рельефа (северная часть озера)

развиты гряды и долины, ориентированные с СЗ на ЮВ и наследующие положение практически обнаженных протяженных блоков Балтийского щита; в зоне абразионно-аккумулятивного рельефа (в центральной части озера) развиты в основном четвертичные ледниковые формы; в зоне аккумулятивного рельефа в южной части озера расположена пологая аккумулятивная равнина, занимающая три уровня – 10–20 м, 20–30 м, 30–50 м.

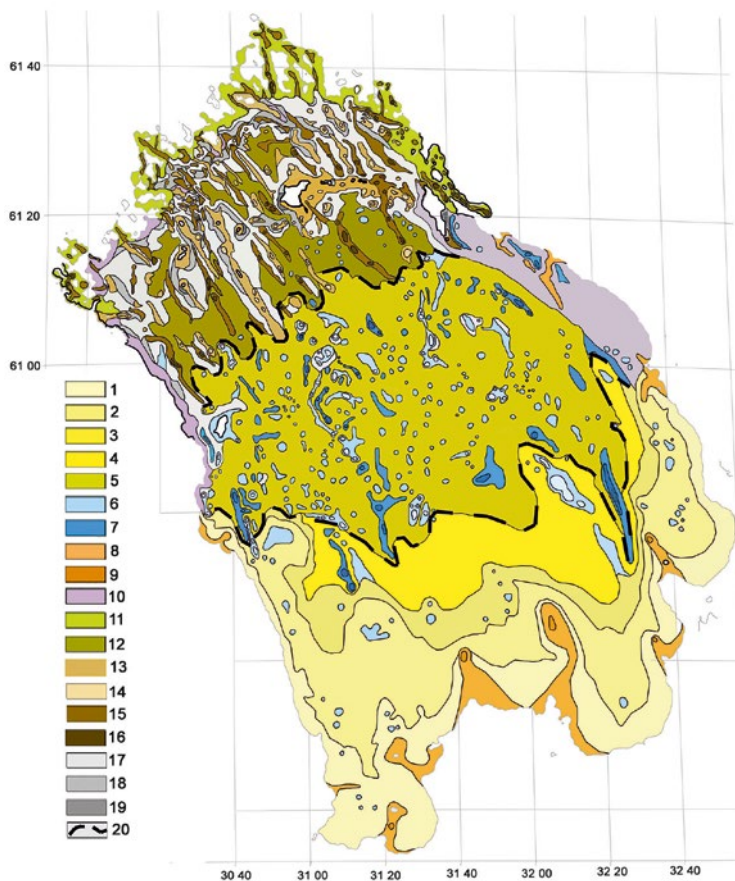


Рис. 5.3.8 – Геоморфологическая карта дна Ладожского оз.

Аккумулятивный рельеф: 1 – прибрежные равнины, осложненные крупными прибрежными гляциальными формами, уровень 0–10 м, 2 – равнины прибрежной отмели, уровень 10–20 м, 3 – пологонаклонные плоские равнины со слабым развитием преимущественно изометричных ледниковых форм, уровень 20–50 м, 4 – пологонаклонные плоские равнины со слабым развитием преимущественно протяженных ледниковых форм, уровень 30–50 м. Абразионно-аккумулятивный рельеф, в т. ч. гляциальный рельеф: 5 – всхолмленная гляциальная равнина, уровень 50–110 м, 6 – положительные гляциальные формы (камы, озы и их комбинации), 7 – впадины (вероятно, ледниковые борозды); полигенный прибрежно-мелководный рельеф: 8 – прибрежные гляциальные гряды, 9 – локальные поднятия в составе прибрежных гряд, 10 – береговые склоны пологие, 11 – береговые склоны крутые (фиардово-шхерные). Абразионный рельеф. Структурно-денудационный рельеф: 12 – долинно-грядовый рельеф, 13 – гряды, 14 – локальные поднятия в составе гряд, 15 – долины, 16 – локальные впадины в составе долин. Склоны: 17 – 1°–2,5°, 18 – 2,5°–5°, 19 – более 5°. 20 – границы геоморфологических зон

5.4 Распространение вод притоков и подземных вод по данным изотопных индикаторов

Несмотря на длительность изучения бассейна Ладожского оз. широким спектром методов в рамках решения практических задач и реализации разнообразных научных проектов, ряд вопросов, касающихся количественной оценки параметров, определяющих водный баланс и качество воды, остаются не до конца проясненными. В частности, традиционно возникают определенные проблемы с модельным воспроизведением годового хода осадков на Ладожском водосборе [Мелешко, 1998; Голицын, 2000; Golitsyn, 2002]. Имеет место довольно большой разброс в значениях испарения, рассчитанных по эмпирическим и по модельным данным, причем среднее модельное испарение, как правило, несколько занижено по сравнению с рассчитанным по эмпирическим данным [Румянцев, 2007]. Есть указания на наличие субаквальной разгрузки подземных вод в озеро [Калесник, 1968; Румянцев, 2017], однако локализация участков этой разгрузки, оценка ее вклада в формирование вещественного состава и практической значимости пока не выполнена. Обеспечение балансовых моделей параметрами, их верификация и калибровка, особенно с учетом масштабных эффектов, представляют собой значительную трудность.

Известно, что стабильные изотопы водорода и кислорода – дейтерий (^2H) и кислорода-18 (^{18}O), входящие в молекулу воды (далее – изотопный состав воды), широко используются как глобальные индикаторы при решении прикладных водохозяйственных задач и для фундаментальных исследований. Эти трассеры позволяют установить генетическую связь поверхностных вод с атмосферными осадками, водотоками и подземными водами, оценивать влияние испарения и темпы водообмена, а также отслеживать химическую трансформацию водных масс, поступающих из притоков в водоемы [Jasechko, 2014]. На взгляд авторов, использование дейтерия и кислорода-18 в качестве трассеров при изучении Ладожского оз. и его водосбора позволяет улучшить уровень интерпретации первичных данных, а также разрешить трудности, возникающие при построении математических моделей. В данной главе рассматриваются результаты исследования водосбора Ладожского оз. с помощью дейтерия и кислорода-18, выполненные авторами в 2008–2019 гг. Эти наблюдения носили регулярный характер, и в силу их относительной новизны ряд полученных на их основе заключений представляется интересным.

В геологическом отношении южная часть ложа озера расположена в пределах осадочного чехла Восточно-Европейской платформы и соответствующего артезианского бассейна, а северная ванна – на Балтийском щите, сложенном архей-протерозойскими кристаллическими породами. Немного севернее зоны сочленения указанных структур на дно озера выходит силл, образующий на поверхности Валаамский архипелаг. В западной и южной частях озера под донными осадками и вендскими отложениями в депрессии фундамента залегают песчаники рифея, образующие Ладожский грабен. В плане грабен выходит за пределы акватории на несколько десятков километров.

Исследование водных масс акватории Ладожского оз. выполнялись с борта НИС «Талан», НИС «Посейдон», НИС «Эколог» и с катера «Полярник»

(совместно с ААНИИ) на станциях мониторинга, расположенных в заливах и открытой части водоема (рис. 5.4.1). Рейсы, в основном, выполнялись в мае – июне и августе – сентябре. На большинстве станций пробы отбирались батометром с двух горизонтов – поверхностного (0,5 м) и придонного слоев. На рисунке не показаны дополнительные станции, расположенные в северной глубоководной части Ладожского оз., на склонах его котловины, где обнажаются породы рифейского водоносного горизонта. На отдельных станциях выполнялось более детальное опробование водной толщи (до 12 горизонтов). Последние пять лет, помимо стандартных точек мониторинга, пробы отбирались в северной, глубоководной части озера в местах обнажения рифейских отложений, где происходит субаквальная разгрузка подземных вод.

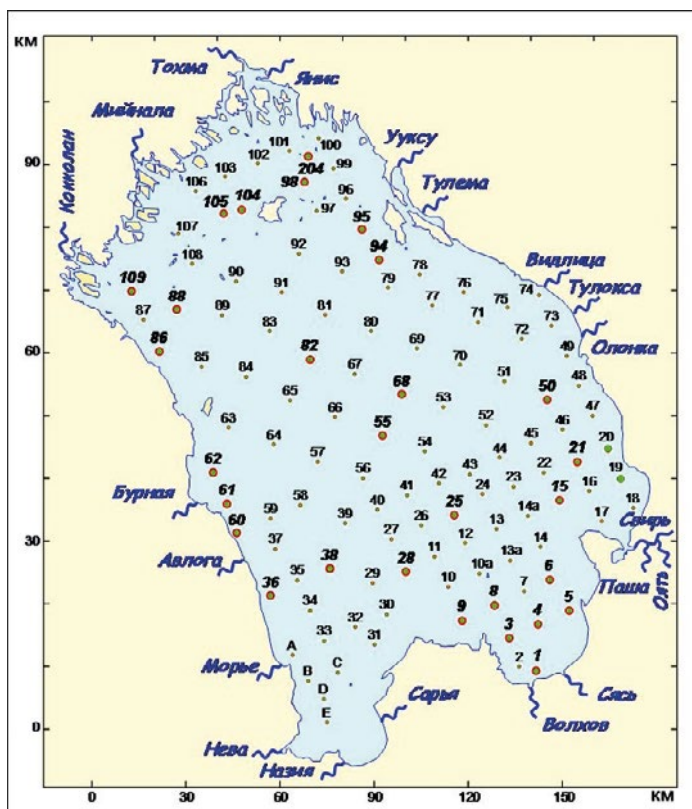


Рис. 5.4.1 – Схема опробования Ладожского оз. и притоков (точки, в которых выполнялось опробование изотопного состава воды в акватории, выделены наклонным шрифтом и размером значков)

Исследованы воды осадочных комплексов и кристаллических пород (в содружестве с Петербургской комплексной геологической экспедицией). Пробы отбирались только из самоизливающих скважин или скважин, оборудованных электрическими насосами, а также восходящих родников. Это несколько сужало круг опробуемых водопунктов, но исключало необходимость прокачки скважин и снижало возможность случайного воздействия

антропогенных, сезонных и других мешающих факторов. На изотопный состав воды в весеннее-летне-осенний период в 2012–2019 гг. неоднократно опробовано 15 наиболее крупных притоков в нижнем течении или замыкающих створах (рис. 5.4.1). Ряд относительно мелких притоков опробовались единожды или двукратно.

Кроме того, с 2012 г. выполняются регулярные наблюдения за изотопным составом атмосферных осадков на станции «Петродворец» (территория СПбГУ) и на болотном полигоне «Ламмин-Суо» (7 км севернее г. Зеленогорска, работы выполнялись в содружестве с Государственным гидрологическим институтом). С 2009 г. наблюдения осуществляются также на станции «Петрозаводск» (в содружестве с Институтом водных проблем Севера КарНЦ РАН). Отбор проб производится на среднедекадной и средненедельной основе, отдельно опробуются массивные выпадения. В 2015–2019 гг. в различные сезоны выполнено около 50 экспериментов по оценке влияния неравновесного изотопного фракционирования при испарении на содержание дейтерия и кислорода-18 в остаточной воде.

Пробы воды для анализа содержаний кислорода-18 и дейтерия отбирались в пластиковые герметичные емкости объемом 20–150 мл. В некоторых случаях на месте определялась температура и электропроводность воды, а в лаборатории выполнялся сокращенный химический анализ. Измерения содержаний дейтерия и кислорода-18 в воде производились на лазерном инфракрасном анализаторе изотопного состава воды *Picarro L-2120-i* (Ресурсный центр «Геомодель» Научный парк СПб ГУ). В качестве образцов сравнения использованы стандарты МАГАТЭ: V-SMOW-2, GISP и SLAP, а также стандарты Американского геологического общества USGS-45 и USGS-46. В пробах 2008 и 2009 гг. во ВСЕГИНГЕО определялось только содержание кислорода-18 на масс-спектрометре МИ-1201 после уравнивания воды с углекислым газом. В качестве эталонов использовались внутрилабораторные образцы сравнения, привязанные к стандартам МАГАТЭ. Неопределенность измерений во всех случаях составляла $\pm 0,1\%$ по кислороду-18 и $\pm 1\%$ по дейтерию. Всего проанализировано около 720 проб. Все результаты приводятся в виде $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в промилле относительно состава средней океанической воды (SMOW). Ниже приведены результаты выполненных экспериментальных исследований и их интерпретация

Атмосферные осадки. В атмосферных осадках наблюдается естественный временной ход изотопного состава, когда зимние осадки характеризуются наименьшими концентрациями дейтерия и кислорода-18, а летние – наибольшими. В 2012–2019 гг. на станциях «Петродворец» и «Ламмин-Суо» наиболее легкий изотопный состав снега составил $\delta^{18}\text{O} = -24,3\%$ и $\delta^2\text{H} = -183\%$, наиболее тяжелый изотопный состав дождя – $\delta^{18}\text{O} = -6,1\%$ и $\delta^2\text{H} = -32\%$. Взвешенный среднегодовой состав атмосферных осадков рассчитан с учетом распределения объема и состава выпадений во времени и составляет $\delta^{18}\text{O} = -9,7\%$ и $\delta^2\text{H} = -75\%$. Локальная линия метеорных вод описывается уравнением $\delta^2\text{H} = 7,86 \times \delta^{18}\text{O} + 1,7$ ($n = 187$, $R^2 = 0,98$). В 2009–2019 гг. для атмосферных осадков на станции «Петрозаводск» наиболее легкий изотопный состав снега составил $\delta^{18}\text{O} = -30,9\%$ и $\delta^2\text{H} = -239\%$, наиболее тяжелый изотопный состав дождя – $\delta^{18}\text{O} = -4,1\%$ и $\delta^2\text{H} = -26\%$.

Взвешенный среднегодовой состав атмосферных осадков составляет $\delta^{18}\text{O} = -11,7\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} = -84\text{‰}$. Локальная линия метеорных вод описывается уравнением $\delta^2\text{H} = 7,66 \times \delta^{18}\text{O} + 4,5$ ($n = 139$, $R^2 = 0,97$).

Воды притоков. В притоках Ладожского оз. диапазон вариаций изотопного состава воды, естественно, значительно меньше, чем в осадках вследствие осреднения стока на индивидуальных водосборах (рис. 5.4.2). Наблюдается дифференциация состава воды притоков по сезонам (рис. 5.4.3). Летом и осенью содержание тяжелых изотопов в речной воде значительно выше, чем зимой, отражая влияние утяжеления осадков в теплый период года. Зимой изотопный состав воды в реках оказывался существенно легче среднегодового для осадков из-за влияния разгрузки подземных вод, питание которых происходит в значительной степени в период весеннего половодья за счет изотопически легких осадков холодного периода года. В мае, иногда и в начале июня, в речном стоке ощущается вклад изотопически легкой снеготалой воды.

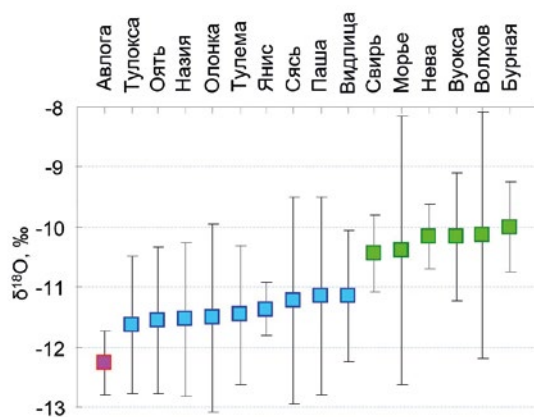


Рис. 5.4.2 – Изотопный состав кислорода притоков Ладожского оз. и р. Невы («усами» показано среднеквадратическое отклонение)

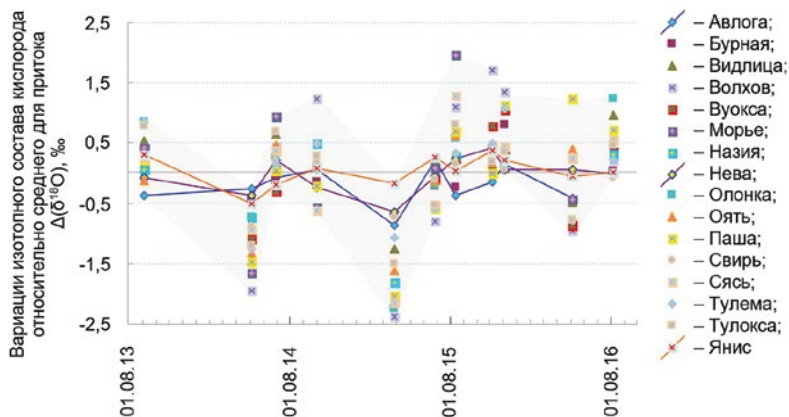


Рис. 5.4.3 – Вариации изотопного состава кислорода притоков Ладожского оз. и р. Невы во времени

По абсолютным величинам $\delta^{18}\text{O}$ все притоки можно разделить на три группы:

- Авлога – река с наиболее изотопически легкой водой и узким диапазоном вариаций изотопного состава кислорода во времени;
- Тулокса, Оять, Назия, Олонка, Тулема, Сясь, Паша, Видлица – реки со средней по изотопному составу кислорода водой и несколько различающимся размахом сезонных вариаций;
- Свирь, Морье, Вуокса и Бурная, Волхов – реки с наиболее изотопически тяжелой водой, со значительно различающимся размахом сезонных вариаций.

Выявленное устойчивое различие притоков по изотопному составу кислорода отражает, в первую очередь, особенности питания. В частности, Авлога с $\delta^{18}\text{O} = -12,2 (\pm 1,07) \text{‰}$, по-видимому, является базисом разгрузки регионального потока подземных вод в восточной части Карельского перешейка и, соответственно, имеет незначительную долю атмосферного питания. В пользу этого свидетельствует то обстоятельство, что соседняя, несколько южнее расположенная р. Морье (рис. 5.4.1) с аналогичными характеристиками водосбора несет существенно более тяжелый средний состав кислорода и отличается относительно большим размахом его вариаций $\delta^{18}\text{O} = -10,4 (\pm 4,45) \text{‰}$. Подземные воды, разгружающиеся в р. Авлогу, должны иметь относительно легкий, даже для подземных вод Карельского перешейка, изотопный состав и, вероятнее всего, отличаются значительным возрастом [Воронюк, 2016].

В качестве подтверждения возможности разгрузки регионального потока на этом участке водосбора приведем данные по скважине глубиной 250 м, расположенной несколько севернее р. Авлоги в пос. Луговое в районе южной оконечности оз. Суходольского [Токарев, 2016]. Скважина с открытым стволом опробовалась с помощью поинтервальных выпусков по мере углубления ходками по 50 м. В рифейском комплексе были вскрыты воды с напором 7 м над поверхностью земли (абсолютная отметка +18 м), что превышает отметку уреза воды в расположенном в 900 м к северу оз. Суходольского (+6 м). При последовательном вскрытии разреза произошло постепенное увеличение дебита выпуска с 500 до более чем 1000 м³/сут. Минерализация воды в вендском комплексе (верх разреза) составляла около 140 мг/л, а в конце, после вскрытия рифейских отложений достигла 640 мг/л. Произошла смена состава подземных вод с $\text{HCO}_3 - \text{Ca} - \text{Mg}$ на $\text{Cl} - \text{HCO}_3 - \text{Na}$, и заметно изменилось содержание некоторых микроэлементов. Изотопный состав кислорода облегчился от $\delta^{18}\text{O} = -13,4 \text{‰}$ в вендском комплексе до $\delta^{18}\text{O} = -16,6 \text{‰}$ при выпуске из вендского и рифейского комплексов одновременно.

Похоже, что малые неозерные реки (р. Янис) северного Приладожья также могут иметь преимущественное подземное питание в течение всего года, о чем свидетельствует легкий изотопный состав воды в летний период $\delta^{18}\text{O} = -11,4 \text{‰}$ и $\delta^2\text{H} = -83 \text{‰}$ (в среднем) и малые вариации изотопного состава за период наблюдений. Однако в бассейне р. Янис, по-видимому, отсутствуют подземные воды с большим возрастом и, соответственно, легким изотопным составом. Последнее связано с тем, что бассейн р. Янис

располагается уже в пределах Балтийского гидрогеологического массива, в то время как бассейн р. Авлоги – на северной границе платформы.

Вторая группа рек с $\delta^{18}\text{O} = -11,6\text{‰} \text{--} -11,2\text{‰}$ – несколько более тяжелым изотопным составом кислорода, чем в р. Авлоге, по-видимому, имеет примерно одинаковый вклад подземного и атмосферного питания. В силу этого они характеризуются несколько более легким изотопным составом, по сравнению со взвешенным среднегодовым составом атмосферных осадков, относительно небольшой и примерно одинаковый размах содержаний кислорода-18.

Третья группа рек отличается наиболее тяжелым изотопным составом $\delta^{18}\text{O} = -10,4\text{‰} \text{--} -10,0\text{‰}$, приближающимся к взвешенному среднегодовому составу осадков и, как правило, имеет значительный сезонный разброс величины $\delta^{18}\text{O}$, что указывает на преимущественно атмосферное питание.

В пределах водосборов происходит перемешивание осадков различных сезонов, о чем свидетельствует постепенное уменьшение размаха вариаций $\delta^{18}\text{O}$ в году (рис. 5.4.4). При этом всплеск вариативности параметра $\delta^{18}\text{O}$ в конце июля и начале августа соответствует годовому пику атмосферных осадков.

Для крупных рек зависимость изотопного состава воды от сезона года менее выражена, чем для малых водотоков. В р. Свирь изменчивость параметра $\delta^{18}\text{O}$ одна из самых небольших в силу осреднения ее стока Онежским оз., среднее время пребывания воды в котором составляет около 16 лет [Онежское..., 2010]. Аналогично невысока изменчивость и изотопного состава кислорода в воде р. Невы. Вероятнее всего, межгодовое перераспределение стока может происходить также на крупных водосборах, а не только в Ладожском и Онежском оз. Интересно, что среди крупных рек изотопный состав меняется наиболее значительно в р. Волхов, указывая на наибольшую долю атмосферного питания на его водосборе. На этом фоне незначительные вариации параметра $\delta^{18}\text{O}$ в малых реках Авлога, Янис и Бурная особенно заметны.

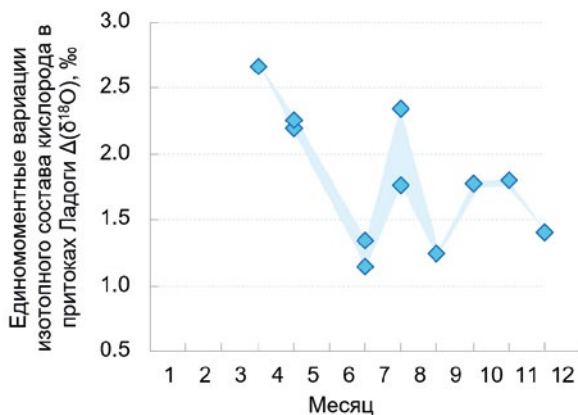


Рис. 5.4.4 – Средний размах единомоментных вариаций изотопного состава кислорода относительно среднееголетнего для притоков Ладоги в различные периоды года за 2012–2019 гг.

Приведенные выше соображения насчет условий питания притоков Ладоги, полученные на основании анализа изотопного состава их воды, в целом согласуются с многолетними гидрологическими наблюдениями [СКИОВО Волхов, 2015; СКИОВО Карелия, 2014]. Исключение составляет р. Авлога, для которой значимость подземного питания не оценивалась напрямую, а в качестве реки-аналога была выбрана р. Морье, что является ошибкой. Для многих притоков летом отмечается влияние испарения на водосборах (на диаграмме $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ точки смещены вправо от ЛЛМВ). Для крупных рек смещение изотопных составов за счет испарения отмечается не только в летнем, но и в зимнем стоке, что также указывает на межгодовое перераспределение стока на их водосборах. Расчет потерь на испарение производился на основании экспериментальных зависимостей изотопного состава остаточной воды от доли испарившейся. Расчетная доля потерь воды на испарение с речных водосборов летом достигает 23%.

Ладожское оз. Изотопный состав воды в Ладожском оз. в целом относительно стабилен $\delta^{18}\text{O} = -11,7.. - 9,5\text{‰}$ (в среднем $\delta^{18}\text{O} = -10,6\text{‰}$), $\delta^2\text{H} = -84.. - 74\text{‰}$ (в среднем $\delta^2\text{H} = -78\text{‰}$), что свидетельствует о достаточно интенсивном перемешивании воды на акватории. На диаграмме $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ фигуративные точки для озерной воды практически всегда оказываются несколько смещены вправо относительно изотопного состава атмосферных осадков, что свидетельствует о влиянии испарения (рис. 5.4.5). Отметим, что в измерениях 2008–2009 гг. присутствовали только данные по кислороду-18, что не дает возможности идентифицировать эффект испарения. Откуда следует, что в дальнейшем, для корректной интерпретации исходных данных, измерения должны включать оба параметра – и $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$.

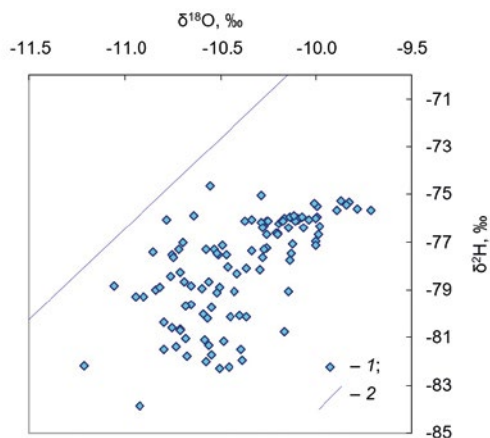


Рис. 5.4.5 – Изотопный состав воды Ладожского оз. по данным опробования в 2013–2019 гг. (в данных 2008 и 2009 гг. присутствуют измерения только изотопного состава кислорода): 1 – изотопный состав воды в Ладоге; 2 – локальная линия метеорных вод

В годовом разрезе времени наблюдается утяжеление изотопного состава воды в озере к концу лета (табл. 5.4.1 и рис. 5.4.6), что указывает на: ослабление влияния весеннего половодья, привносящего в озеро изотопически

легкую талую воду; поступление изотопически тяжелых летних осадков; рост влияния испарения (на диаграмме $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ это отражается в постепенном смещении точек вправо от локальной линии метеорных вод). Постепенное уменьшение размаха вариаций изотопного состава воды по акватории отражает постепенное перемешивание водных масс.

Таблица 5.4.1

Внутригодовое изменение среднего изотопного состава кислорода и размаха его вариаций в воде Ладожского оз.

Дата	Средняя величина $\delta^{18}\text{O}$	Стандартное отклонение
Октябрь 2008	-10,8	0,091
Май 2009	-11,1	0,234
Август 2013	-10,2	0,133
Август 2015	-10,6	0,150
Июль 2016	-10,6	0,321

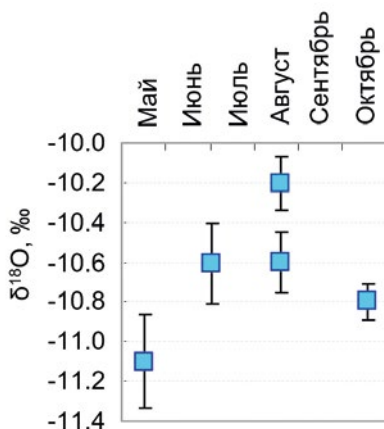


Рис. 5.4.6 – Внутригодовое изменение среднего изотопного состава кислорода и размаха его вариаций в воде Ладожского оз.

Воздействие испарения на изотопный состав воды в Ладоге, однозначно диагностируемое по смещению фигуративных точек вправо относительно ЛЛМВ на диаграмме $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$, обусловлено неравновесным изотопным фракционированием. Расчет, с использованием экспериментальных зависимостей смещения изотопного состава под действием испарения, дает долю испаренной воды от 5% весной до 28% в конце лета, составляя в среднем около 18%. Начальный изотопный состав воды (до испарения) может быть приблизительно определен по точкам пересечения ЛЛМВ с линиями, аппроксимирующими изменение состава воды при испарении. На данный момент эта оценка составляет $\delta^2\text{H} = -78.. - 91\text{‰}$ и $\delta^{18}\text{O} = -11,2.. - 12,3\text{‰}$, что в целом совпадает с данными по изотопному составу притоков и обнаруживает влияние испарения не только на водосборе, но и с зеркала воды в озере.

При детальном опробовании северной ванны Ладожского оз. в 2015 г. в толще воды были обнаружены значимые вариации параметра $\delta^{18}\text{O}$ (рис. 5.4.7).

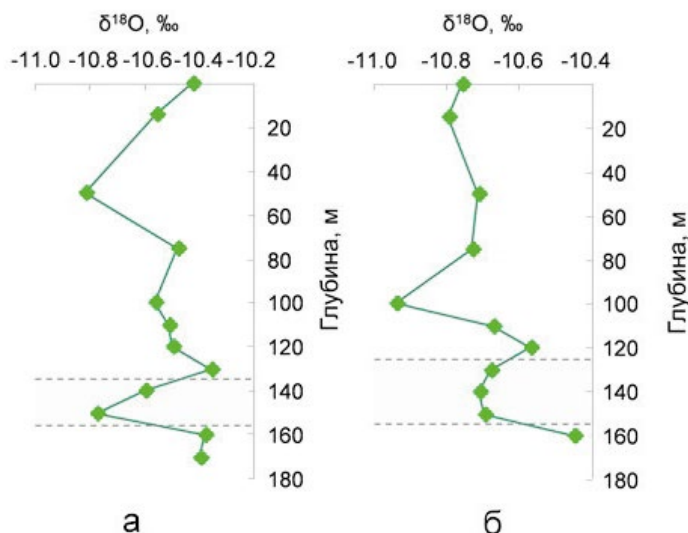


Рис. 5.4.7 – Изотопный состав кислорода в разрезе водной толщи северной ванны Ладожского оз. в 2015 г.

В придонной зоне несколькими точками по вертикали на глубинах 135–155 м фиксируется аномалия облегчения состава кислорода, происхождение которой нельзя связать с погружением в глубину слоя талой изотопически легкой воды [Румянцев, 2010]. К влиянию последней можно отнести аномалии на глубинах около 50 м (рис. 5.4.7, а) и 100 м (рис. 5.4.7, б).

Местоположение аномалий и сопоставление условий их обнаружения с вышеприведенными данными по притокам и подземным водам, а также геологическому строению озерного ложа дает основание предполагать, что их источником могут быть либо речные воды, например Авлоги или другой, пока не идентифицированной реки с преимущественно подземным питанием, за счет их погружения по склону озерного ложа, либо субаквальная разгрузка подземных вод из рифейских отложений.

Субаквальная разгрузка подземных вод может быть связана с обнаруженной в северной части озера котловиной, которая прослеживается от берегового склона до основного ложа (рис. 5.4.8). Стенки этих глубоководных «каньонов» сложены песчаниками рифейского комплекса (рис. 5.4.9), который, как это указывалось выше, содержит в этой области изотопически легкие древние воды регионального потока. На рис. 5.4.8 приведена поверхность дна в северной (глубоководной) части Ладожского оз., построенная по данным профилирований с помощью многолучевого эхолота EM2040. Результаты получены в 2012 г. совместно со специалистами ЗАО МАРИ-МЕТР. На северных пологих склонах дна Ладожского оз. породы рифейского комплекса обнажаются и в виде уступов и обрывов.

В 2009 г. в Западно-Валаамской глубоководной впадине, в которой впоследствии, по данным изотопных исследований в 2015 г., на точке № 105 (рис. 5.4.1) были зафиксированы локальные понижения концентрации стабильного изотопа кислорода, с борта НИС «Талан» были проведены геофизические исследования. Для изучения строения дна использовали сейсмоакустический комплекс ГЕОНТ – НРР для непрерывного сейсмоакустического профилирования ФГУП ВСЕГЕИ им. А. П. Карпинского.

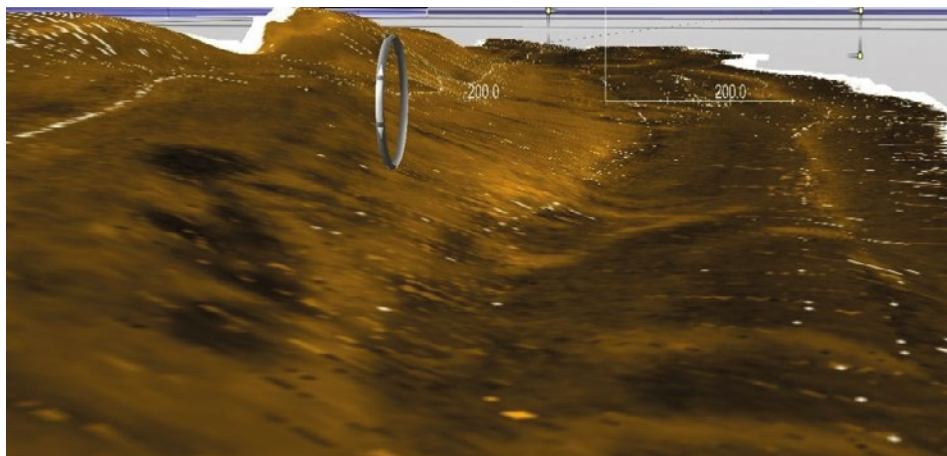


Рис. 5.4.8 – Вид склона дна в северной части Ладожского оз., вдоль которого прослеживается обнажение рифейских пород. Получено с помощью многолучевого эхолота EM2040, глубины от 70 до 180 м

По геофизическим данным достаточно надежно выделяется рифейская грабен-синклинальная структура, которая ограничивает площадь развития самостоятельного рифейского водоносного комплекса (РВК) (рис. 5.4.9). Водоносные горизонты РВК связаны, скорее всего, с песчаниками рифея, а водоупором служат субвулканические образования Валаамского силла. Плейстоценовая ледовая экзорация и эрозия привели к селективному выпавиванию рифейских песчаников с образованием естественных подводных обнажений в крутых склонах, где можно предполагать наличие зон разгрузки подземных вод (субаквальных напорных источников). У подножья уступа, расположенного в южной части профиля НСП, с высокой долей вероятности также устанавливается крупное разрывное нарушение (разлом), вероятно, с обнажением не только водоупорных образований, но и локально водоносных песчаников. Геологическая интерпретация разреза в зоне указанного разлома приведена на рис. 5.4.9.

Таким образом, проведенные исследования зафиксировали в разрезе водной толщи северной ванны Ладожского оз. на глубинах 135–155 м аномалию облегчения состава кислорода, происхождение которой может объясняться или погружением речных вод, например, Авлоги по склону озерного ложа, или субаквальной разгрузкой подземных вод из рифейских отложений. Последнее предположение кажется более достоверным, поскольку в дне се-

верной ванны геофизическими работами обнаружены обнажения рифейских песчаников, лишенные осадочного покрова, а подземные воды рифейских отложений характеризуются повышенной минерализацией и стабильной (во времени) температурой. Для выяснения природы аномалий и для дополнения уже имеющихся изотопных данных, предполагается провести дополнительные исследования с привлечением методов полевой геофизики и геохимии, а также более детальным опробованием разреза воды.

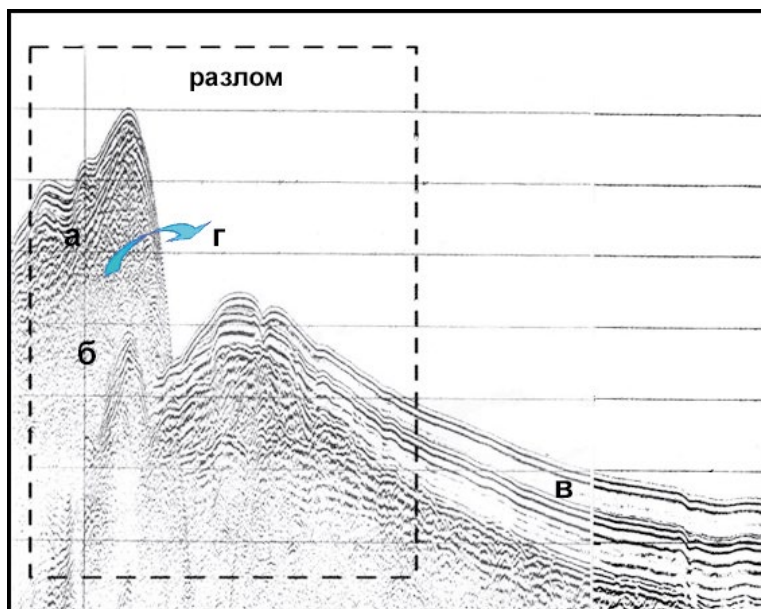


Рис. 5.4.9 – Геологическая интерпретация разреза по профилю НСП в зоне разлома в Западно-Валаамской глубоководной впадине: а – бронирующие габброиды валаамского силла; б – рифейские песчаники (рифейского водоносного комплекса); в – четвертичные отложения; г – вода из рифейских песчаников

Таким образом, с использованием разработанных в ИНОЗ РАН методик и технических средств изучения донных ландшафтов различного иерархического уровня удалось показать, что наибольшей структурной сложностью донных ландшафтов обладает прибрежная зона озера. Причем имеются отличия для разных частей озера, во многом обусловленные морфометрическими особенностями берегового склона, что в свою очередь связано с геологическим строением. Выявлено, что с ростом крутизны склона наблюдается более резкая смена ландшафтных фаций и меньшее их разнообразие. Высокая сложность ландшафтов характерна для относительно пологих участков береговой зоны с неровным мезорельефом, сформированным за счет гляциальных моренных отложений.

Впервые построена карта-схема распределения плотности донных отложений Ладожского оз., демонстрирующая уменьшение плотности донных наносов при переходе от южных мелководных районов Ладоги к северным глубоководным. Показано, что плотность частиц донных отложений

оказывает влияние как на результирующие формы донного ландшафта, так и на условия взаимодействия твердых частиц с водной массой в придонной зоне. Подтвержден вывод о значительном влиянии плотности донных наносов на гидродинамические процессы и необходимости учета ее вариаций.

Рисунок линейных форм рельефа и образованных ими линеаментов дна Ладожского оз. показывает блоковую расчлененность фундамента, подчиняющуюся 4 главным направлениям – меридиональному, широтному, диагональному СВ (40–50°) и диагональному ЮВ (140°), т.е. направлениям планетарной трещиноватости, или регматической сети с преобладанием СЗ-ЮВ систем направлений. Несмотря на существенную разницу в типах рельефа в пределах северо-западной и юго-восточной частей дна Ладожского оз., общие направления линейных форм рельефа одинаковы для всего дна озера и в общем соответствуют направлениям сети планетарной трещиноватости Земли. Выделенная на дне озера сеть линеаментов совпадает с известными дизъюнктивами, и, следовательно, с некоторой долей условности, сеть разломов может быть прослежена вдоль линий линеаментной сети.

Построена новая геоморфологическая карта, на которой отражены особенности геоморфологического строения дна озера. В частности, выполнено разделение площади дна озера на 3 крупные геоморфологические зоны: 1) структурно-денудационного долинно-грядового рельефа в северной части озера (зона Балтийского щита); 2) абразионно-аккумулятивного, в основном гляциального, рельефа в центральной части озера; 3) аккумулятивного рельефа в южной части озера. Выделяются также участки распространения прибрежного рельефа.

В разрезе водной толщи северной ванны Ладожского оз. на глубинах 135–155 м фиксируется аномалия облегчения состава кислорода. Ее происхождение можно объяснять как погружением речных вод, например, Авлогы по склону озерного ложа, так и субаквальной разгрузкой подземных вод из рифейских отложений. Последнее предположение является более достоверным, поскольку в дне северной ванны геофизическими работами обнаружены обнажения рифейских песчаников, лишенные осадочного покрова. Подземные воды рифейских отложений характеризуются несколько повышенной минерализацией, стабильной (во времени) температурой и облегченным составом стабильных изотопов кислорода и водорода. В настоящее время это было подтверждено изотопическими исследованиями проб воды, отобранных в этой части озера.

Глава 6. Водный баланс и уровень Ладожского озера

В настоящей главе представлены результаты оценок водного баланса (ВБ) Ладожского оз., полученных разными авторами за разные годы, в том числе и результаты современных оценок. Изучены закономерности внутри-вековой и внутригодовой изменчивости элементов водного баланса (ЭВБ) и уровня воды. Представлены сведения о долгосрочном прогнозировании ЭВБ и уровня Ладожского оз.

6.1 Оценка элементов водного баланса

Первые оценки ВБ Ладожского оз. получены И. В. Молчановым [Молчанов, 1945], а позднее Р. А. Нежиховским [Нежиховский, 1980]. Более полно, с учетом подземного притока, ВБ был оценен работами сотрудников Лаборатории озероведения АН СССР [Малинина, 1966; Иванова, Кириллова, 1966] по данным, полученным за 1932–1962 гг. В их работах учитывался приток трех основных рек, впадающих в озеро (Свирь, Вуокса и Волхов). По данным [Чеботарев, 1978], в Ладожское оз. впадает 195 водотоков. Приток в озеро от 3 основных рек, по данным за 1932–1962 гг. [Малинина, 1968], в среднем составил $66,4 \text{ км}^3$ в год, слой стока – 3754 мм . Наибольший приток ($89,6 \text{ км}^3$) отмечен в 1958 г., а наименьший – $37,8 \text{ км}^3$ – в 1940 г. В сезонном аспекте наибольший сток рек имел место весной (35,5% годового объема), наименьший – летом (16,3%), а осенью и зимой поступало 23–25% [Иванова и Кириллова, 1966]. Годовое количество осадков оценивалось в 606 мм . Малининой при расчетах ВБ учитывался ежегодный подземный приток ($1,296 \text{ км}^3$), что составляет менее 2% приходной части ВБ [Малинина, 1968]. В расходной части сток р. Невы оценивался по данным наблюдений 1932–1962 гг. [Иванова, Кириллова, 1966] и составлял в среднем за год $73,7 \text{ км}^3$, максимальный – $100,4 \text{ км}^3$ (1958 г.), минимальный – $42,4 \text{ км}^3$ (1940 г.). Испарение с поверхности озера оценивалось в очень широких пределах от 176 до 500–600 мм/год. В работе [Изотова, 1966] было показано, что с акватории озера за год испаряется в среднем слой в 344–352 мм.

Важный вклад в изучение закономерностей изменчивости ВБ и уровня воды озер внесла работа А. В. Шнитникова [1966], который выявил цикличность колебаний общей увлажненности территории водосборов озер. Им было обосновано, что ВБ следует рассчитывать по циклам и фазам водности. Многоводные фазы характеризуются более прохладным климатом, в этот период отмечается увеличение стока рек и подъем уровня озер. Для маловодной фазы с более сухим и теплым климатом, к которой относится и последний климатический цикл 1990–2020 гг., характерно уменьшение стока рек и понижение уровня воды Ладожского оз. [Балаганский и др., 2020]. При этом сезонные изменения притока в Ладогу из-за значительного регулирования стока рек на водосборе «не испытывают существенных изменений под влиянием фазы водности» [Кириллова, 1987].

Объем ВБ в многоводные годы (1932, 1936, 1957, 1958-й) на 24% превышал норму [Малинина, 1966]. Речной приток увеличивался на 23%, сток из озера – на 20%, атмосферные осадки на 11%, испарение примерно на 3%. Увеличение приходной части баланса повышало уровень воды в озере за год в среднем на 27 см. В маловодные годы (1939, 1940, 1941, 1948-й) речной приток уменьшался по сравнению с нормой на 35%, сток – на 30%.

Последующие оценки ВБ Ладожского оз. по данным наблюдений и расчетов были выполнены М.Ф. Веселовой [Атлас..., 2002; 2015] до 1980 г. и Т.П. Гронской [Водные..., 2008] до 2005 г. Вопросам оценки изменчивости уровня воды и особенностям ВБ озера посвящены работы [Догановский, 2006; Догановский и др., 2013; Малинина и др., 1986; Румянцев и др., 2001; Румянцев, Трапезников, 2008; Филатова, Филатов, 1990]. В работах [Атлас..., 2002; 2015] границы циклов и фаз различной водности установлены с помощью интегральной кривой модульных коэффициентов стока р. Невы. В результате за весь период гидрологических наблюдений выделено три полных цикла колебания водности: 1899–1922, 1923–1952, 1953–1980 гг. (рис. 6.1.1). При этом различие фазовых балансов состоит в том, что в маловодную фазу по сравнению с многоводной происходит сокращение объема притока, стока и осадков с незначительным увеличением испарения. Например, в цикле 1953–1980 гг. в многоводную фазу доля притока составила 87%, а доля стока – 93%, в маловодную фазу их относительная величина уменьшилась до 85 и 90% соответственно, тогда как роль осадков и испарения возросла и составила 15 и 10%. Подземный приток в этом случае не оценивался. Испарение с поверхности озера было рассчитано для периода открытой воды по формуле ГГИ, испарение со льда – по формуле П.П. Кузьмина. Полученные значения усреднены по акватории [Атлас..., 2002; 2015].

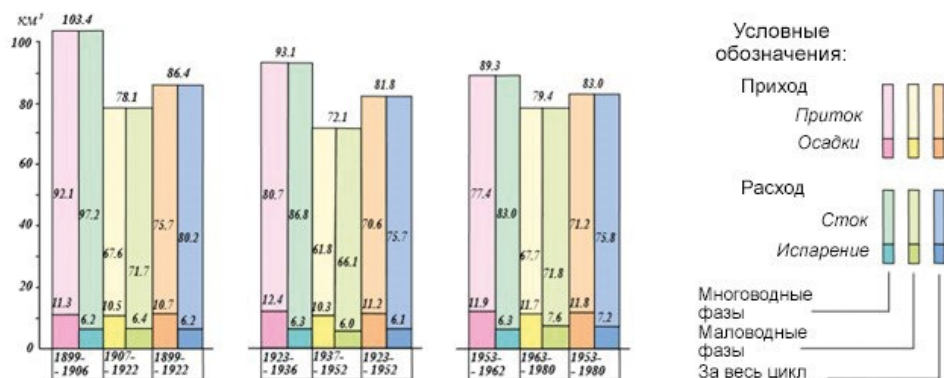


Рис. 6.1.1 – Водный баланс Ладожского озера для различных циклов и фаз водности [Атлас..., 2002; 2015]

ВБ в указанных работах оценен для разных промежутков времени от 7 до 29 лет и поэтому их достаточно сложно сравнивать с результатами, полученными другими авторами, поскольку оказалось непросто определить продолжительность фаз водности по данным за последний климатический цикл 1990–2020 гг. Это обусловлено значительной изменчивостью ЭВБ Ладож-

ского оз. из-за большей неустойчивости климатической системы при значительном глобальном и региональном потеплении в 1990–2020 гг. [Балаганский и др., 2020; Мохов и др., 2012]. В этот период фазы водности оказались более короткими – 2–5 лет – и имеющими большой разброс по продолжительности по сравнению с 1932–1980 гг. На рис. 6.1.2 ВБ представлен в виде круговой диаграммы за 1953–1980 гг., величины составляющих вычислены по средним месячным значениям. значения ЭВБ в объемных единицах (км^3), в слое воды на озеро (мм) и в % от объема баланса, равного 83 км^3 .

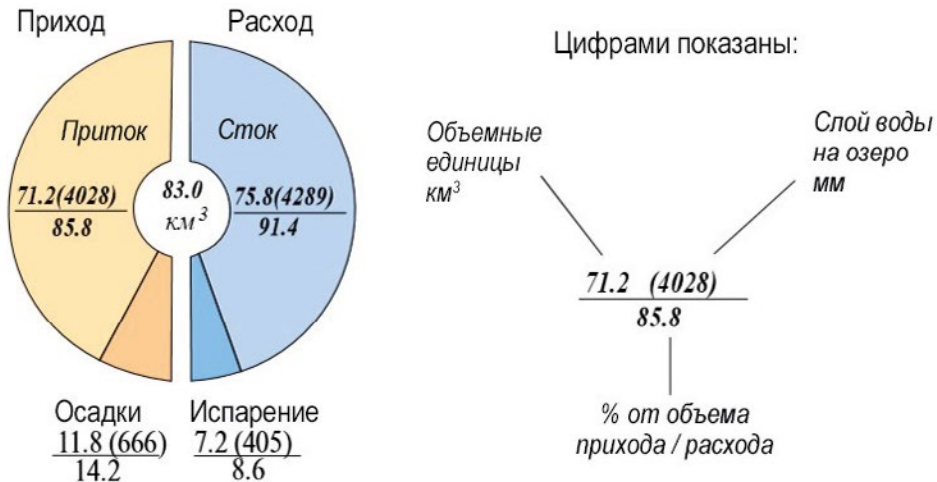


Рис. 6.1.2 – Средний многолетний водный баланс за 1953–1980 гг., составляющие которого вычислены по средним месячным значениям [Атлас..., 2002]

В работах [Атлас..., 2015; Ладожское..., 2002] показано, что во всех циклах в приходной части баланса доля притока достигает 83–89%, а доля осадков – 5–11%. В расходной части сток из озера составляет 90–94%, и 10–8% приходится на испарение.

Т. П. Гронская сделала оценки водного баланса озера за маловодный период 1932–1980 гг. и за относительно многоводный период 1981–2005 гг. [Водные..., 2008], которые представлены на рис. 6.1.3. Последний период в среднем отличался повышенной водностью. Приток и испарение с акватории озера были, соответственно, на 8 и 9% выше, чем за предшествующий период.

Далее представлены современные оценки ВБ и выявленные закономерности изменений для внутривековых и сезонных колебаний уровня воды Ладожского оз. по данным до 2018 г. включительно. Более корректно, чем в предыдущих исследованиях ЭВБ, определены границы водосборной площади Ладожского оз. и его частных водосборов в результате оцифровки по картам масштаба 1:200000 с использованием программы Mapinfo 12.0. Расчеты притока с водосборной площади Ладожского оз. и стока р. Невы выполнены по среднегодовым данным за период 1956–2018 гг. При этом приток в озеро оценивался как сумма притоков с 24 частных водосборов. Слой стока для неизученных водосборов принимался как среднеарифмети-

ческое значение между слоями стока сопредельных изученных водосборов. Результаты расчета: приток – 70,16, сток – 76,49 км³/год.



Рис. 6.1.3 – Водный баланс Ладожского оз. (км³/год) по данным за периоды 1981–2005 гг. (а) и 1932–1980 гг. (б) [Водные..., 2008]

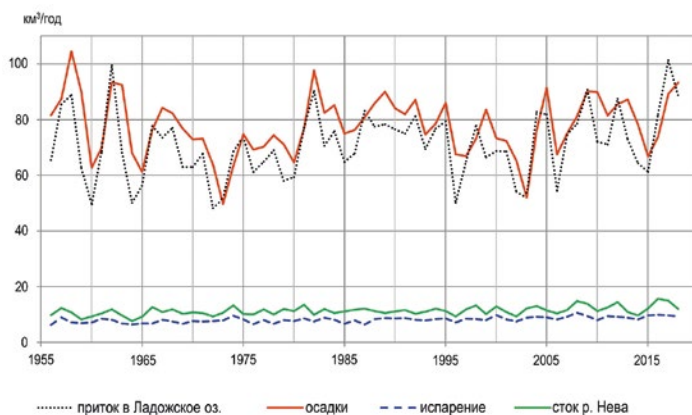


Рис. 6.1.4 – Изменчивость ЭВБ Ладожского оз. (км³/год): речной приток (а), сток р. Невы (б), осадки (в) и испарение (г) за 1956–2018 гг.

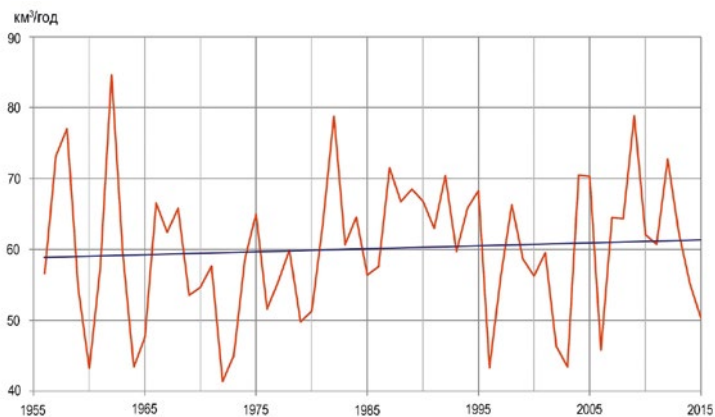


Рис. 6.1.5 – Изменчивость суммарного притока трех рек (Свири, Волхова и Вуоксы) в Ладожское оз. по данным за 1956–2018 гг. Показан линейный тренд

Испарение с зеркала озера определялось по данным результатов наблюдений за температурой воздуха и осадками на метеостанциях Росгидромета Сортавала, Олонец и Валаам. Расчет испарения выполнен по формуле Э.М. Ольдекопа [Сало и др., 2016]. Результат расчета – $8,17 \text{ км}^3/\text{год}$. Осадки, выпадающие на акваторию озера, рассчитывались по данным результатов наблюдений на метеостанциях, результат расчета – $11,32 \text{ км}^3/\text{год}$.

На рис. 6.1.4 представлены графики изменений ЭВБ за 1956–2018 гг. Небольшой положительный тренд с 67 до $76 \text{ км}^3/\text{год}$ отмечается лишь в речном притоке, в стоке р. Невы тренд отсутствует. В изменчивости речного притока в озеро и в стоке р. Невы наблюдаются выделенные ранее [Догановский, Мякишева, 2013; Филатов, Филатова, 1990] квазициклические колебания с временными масштабами порядка 30 и 11 лет. Более наглядно это показано на рис. 6.1.5 и 6.1.6.

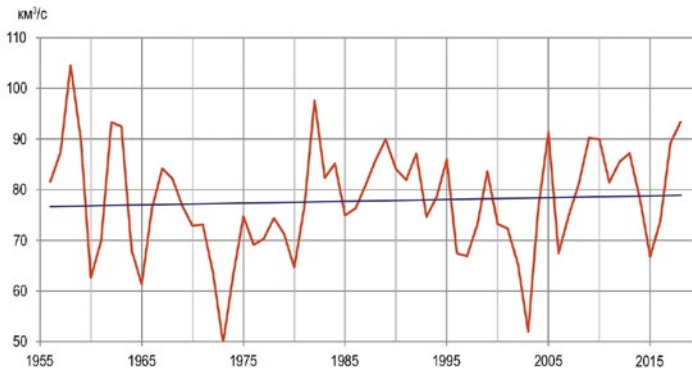


Рис. 6.1.6 – Изменчивость стока р. Невы по данным за 1956–2018 гг. Показан линейный тренд

Трансформация речного стока р. Невы вследствие его регулирования Ладожским оз. оценивалась в работах [Румянцев, Трапезников, 2008; Журавлев, 2020]. Взаимная корреляция стока р. Невы, вытекающей из Ладожского оз., с речным притоком достаточно высокая (0,58–0,69), при этом корреляция стока с суммарным притоком 3 рек, вносящих основной вклад в ВБ, повышается до 0,81. Корреляция стока Невы с атмосферными осадками на акваторию водного объекта практически отсутствует и составляет всего 0,05 [Балаганский и др., 2020].

Подземный приток в озеро учитывался при расчетах ВБ в работах [Малина, 1968; Нежиховский, 1980; Вивенцова, 2004]. В настоящем исследовании его значение принималось равным $1,3 \text{ км}^3/\text{год}$ по оценкам, полученным И. С. Зекцером [Зекцер и др., 1966]. На рис. 6.1.7 представлена итоговая диаграмма ВБ Ладожского оз. за 1956–2018 гг., учитывающая вклад подземного притока.

Нетрудно видеть, что невязка баланса составит $1,88 \text{ км}^3/\text{год}$, или 2,2% от суммарного значения расходной части ВБ. Наиболее вероятное объяснение наличия указанной невязки – неточности измерений и метода расчетов. В работе [Румянцев и др., 2017] показано, что несмотря на длительность изучения бассейна Ладожского оз., количественные оценки ЭВБ остаются

не до конца выясненными, в особенности это касается подземного притока. Отмечаются проблемы с определением годового хода осадков и испарения, рассчитанных по эмпирическим и модельным данным.

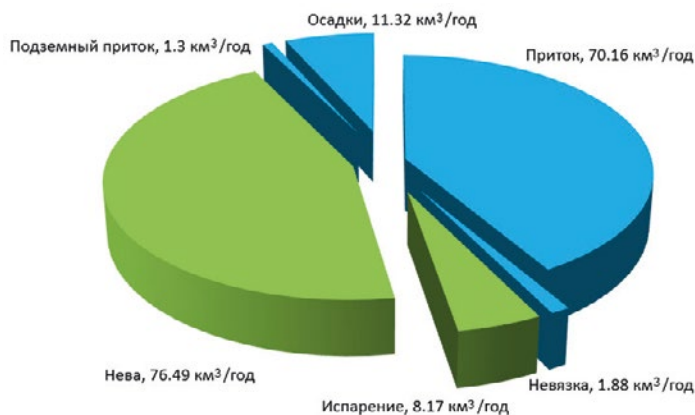


Рис. 6.1.7 – Структура водного баланса Ладожского оз. за период 1956–2018 гг.

Сопоставив объем водной массы озера (848 км^3) и величину годового стока Невы ($76,49 \text{ км}^3/\text{год}$), легко убедиться, что время условного водообмена Ладожского оз. в рассматриваемый период составляло около 11 лет. Если же при оценке водообмена озера использовать значение всей расходной части водного баланса ($84,66 \text{ км}^3/\text{год}$), то рассчитанное время условного водообмена сократится до 10 лет.

Анализ данных натурных наблюдений показал, что повышение уровня озера наступает лишь после 2–3 многолетних лет подряд, понижение – после нескольких маловодных лет. Для повышения уровня озера на 1 м необходимо, чтобы приходная часть водного баланса была больше расходной на 18 км^3 [Калесник, 1968]. По соотношению элементов в приходной и расходной частях баланса озеро относится к стоково-приточному типу, где преобладающими составляющими ВБ являются приток и сток [Богословский, 1960]. Роль осадков и испарения не так значительна из-за огромных размеров водосборного бассейна.

Следует отметить, что после 1954–1955 гг. в бассейне Ладожского оз. было открыто большое число гидрометрических постов, на которых велись систематические наблюдения на 15 реках, площадь водосбора которых охватывала $241\,327 \text{ км}^2$ (около 93% от всего водосбора Ладоги). Но в последние 30 лет сеть государственного мониторинга Росгидромета существенно сократилась, что затрудняет современную оценку ВБ [Балаганский и др., 2020].

6.2 Изменчивость уровня воды и его прогнозирование

В последнее десятилетие низкий уровень воды отмечен на многих крупных озерах мира: Байкале, Великих американских озерах (BAO), Великих озерах Европы (BOE). В 2013 г. зафиксирован самый низкий уровень воды, когда-либо зарегистрированный на оз. Мичиган и Гурон (BAO), а несколько-

ми годами ранее, исторически самый низкий уровень воды был зарегистрирован на озере Верхнее. Такой низкий уровень воды объяснялся потеплением климата и нарушением многолетнего ВБ этих озер [MacKay, Seglenieks, 2015]. На Ладожском и Онежском озерах низкий уровень воды наблюдался в 2014–2016 гг. Серьезные проблемы возникли при управлении ресурсами оз. Байкал в 2015–2017 гг., поскольку при маловодье и значительном падении уровня озера оказалось трудным обеспечить нужды многочисленных пользователей. Потребовалось принятие мер, противоречивших принятому закону о сохранении оз. Байкал в части ограничений изменений уровня воды в разрешенных пределах 454–455 м [Синюкович, Чернышева, 2018]. Значительное падение уровня воды привело к серьезным экономическим потерям для обеспечения работы водного транспорта, ГЭС, водоснабжения, проведения берегозащитных и дноуглубительных работ, рекреации, проблемам в управлении ресурсами озер для многочисленных потребителей. Потребовалась разработка комплекса мероприятий по адаптации экономики регионов к дальнейшим возможным изменениям уровня воды озер, которые прогнозируются до конца XXI века при потеплении климата [Выручалкина и др., 2016; Румянцев, Трапезников, 2008; Фролов, 2003; Gronewold, Stow, 2014]. Для прогноза изменений уровня воды, решения задач управления в качестве одного из важных мероприятий требуется улучшить количественную оценку ЭВБ, уровня вод и факторов, их определяющих. На ВАО это было сделано в работе [Gronewold, Stow, 2014]. Требуется проведение дальнейших исследований закономерностей изменчивости уровня воды и ЭВБ, а также совершенствование методов долгосрочного прогноза в условиях заметного потепления и интенсификации антропогенных воздействий.

В настоящем разделе рассмотрены закономерности изменчивости уровня Ладожского оз. во внутривековых и сезонных масштабах по данным, полученным с 1859 до 2018 г., рассмотрен опыт долгосрочного прогнозирования уровня воды. Для выявления общих глобальных и региональных особенностей изменчивости уровня воды Ладоги выполнен взаимный анализ изменчивости уровня воды озера с другими озерами, входящими в ВОЕ, т. е. с Онежским и Саймаа, а также рассмотрены «удаленные» связи изменений уровня воды с оз. Байкал и ВАО.

Для анализа внутривековых колебаний уровня Ладожского оз., а также озер Онежского и Саймаа использовались среднемесячные и среднегодовые ряды наблюдений за уровнем воды, ЭВБ и климатическими параметрами по данным измерений о. Валаам с 1859 г. и на станциях государственной сети наблюдений (в настоящее время Росгидромета). По оз. Саймаа данные получены как из Гидрологических ежегодников Финляндии, так и с сайтов министерства окружающей среды: http://www.ymparisto.fi/fi-I/Kartat_ja_tilastot/Hydrologiset_havainnot/Hydrologiset_vuosisikirjat. Для ВАО использовались сведения из наиболее надежных баз данных с 1918 г. (<http://www.lre.usace.army.mil/>).

Закономерности внутривековых колебаний уровня, ЭВБ и регионально-го климата анализировались по методике вероятностного анализа данных [Румянцев, Трапезников, 2008]. Ниже представлены результаты анализа внутривековой изменчивости уровня воды Ладожского оз. как по среднемесячным, так и по среднегодовым данным с 1859 по 2017 г. (рис. 6.2.1).

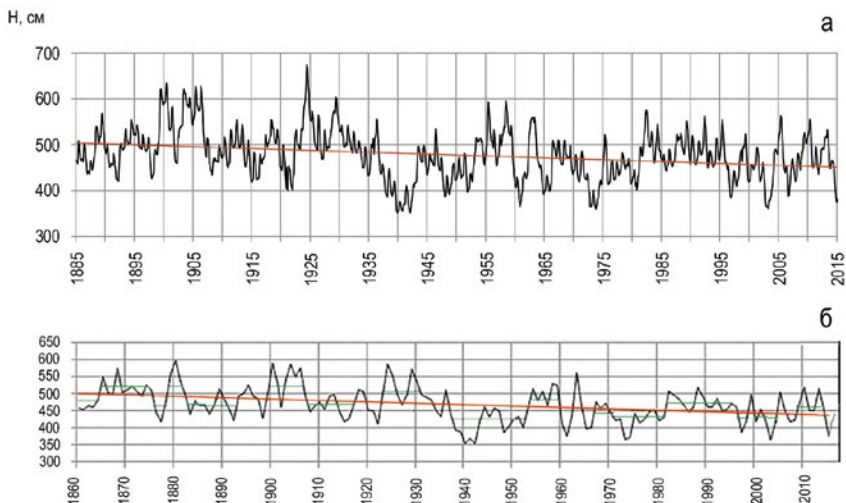


Рис. 6.2.1 – Изменчивость уровня воды Ладожского оз. по среднемесячным (а) и среднегодовым (б) данным с 1859 по 2017 г. Зеленым цветом показаны маловодные и многоводные годы

Как видно из рис. 6.2.1, характер изменчивости уровня Ладоги, рассчитанный по среднемесячным (а) и среднегодовым (б) данным, в общих чертах сохраняется. Отмечается заметный тренд падения уровня воды порядка 3,6 мм в год за весь период инструментальных измерений 1881–2018 гг., а также флуктуации с временными масштабами порядка 30 лет и более короткопериодные, квазициклические порядка 5–11 лет. По среднемесячным данным измерений за этот же период выделяются внутригодовые квазипериодические флуктуации уровня. Отмечается большая амплитуда колебаний уровня по среднемесячным данным, чем по среднегодовым (рис. 6.2.1., табл. 6.2.1.). Колебания уровня воды Ладожского оз. во внутривековых временных масштабах отражают как естественные климатические изменения, так и антропогенные флуктуации. Выбор периода осреднения (продолжительность реализации), несомненно, влияют на особенности флуктуаций уровня воды.

На рис. 6.2.2 показан график изменчивости уровня воды Ладожского оз. по данным после периода ввода в эксплуатацию водных объектов на реках и Онежском оз. (Верхнесвирское водохранилище) в исследуемой водной системе, т. е. с 1956 по 2018 г.

Рассчитанные значения уровня воды за период после зарегулирования водных объектов на водосборе Ладоги и Онего (после 1956 г.) показывают наличие квазициклических флуктуаций с временными масштабами в несколько лет и отсутствие заметного тренда, который выявлен по результатам анализа более длительной реализации – колебаний уровня за весь период инструментальных измерений. На рис. 6.2.3 представлены среднемесячные внутригодовые изменения уровня воды на Ладоге – о. Валаам.

Из рис. 6.2.4 видно, что при заметных климатических колебаниях и регулировании гидрологического режима ряда рек, впадающих в озеро, характер сезонных, внутригодовых колебаний сохраняется. При этом максимум

уровня воды отмечается в июне. На рис. 6.2.4 представлены оценки спектральной плотности внутривековых колебаний уровня озер, рассчитанные по среднегодовым данным за 1990–2017 гг. с использованием сглаживающей функции Хемминга.

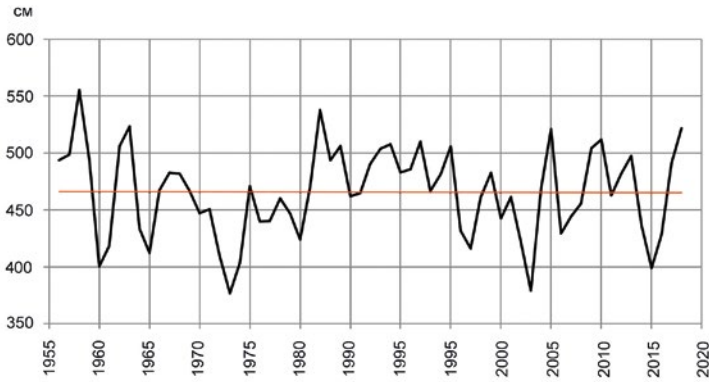


Рис. 6.2.2 – Изменчивость уровня воды Ладожского оз. по данным с 1956 по 2018 г., показан линейный тренд

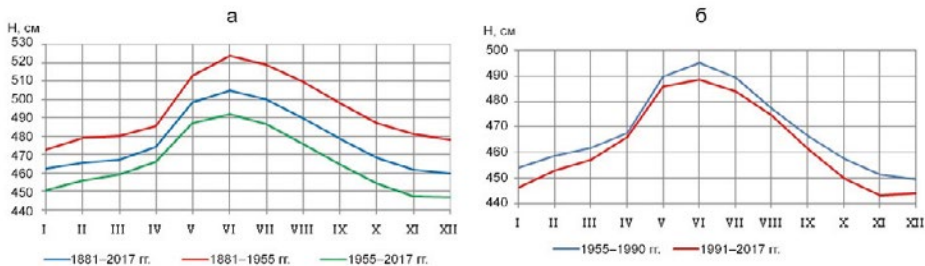


Рис. 6.2.3 – Среднемесячные внутривековые изменения уровня воды оз. Ладожское – о. Ваалам. «0» графика 0.00 м. а) за 1881–2017, 1881–1955, 1955–2017 гг. и б) за 1955–1990, 1991–2017 гг.

В спектрах уровня Ладоги и Онего выделяются долгопериодные составляющие с временными масштабами порядка 30 лет (соответствуют частотам 0,05 1/год) и около 5–11 лет (частоты 0,07–0,08 и 0,16–0,17 1/год). Ранее был продемонстрирован доминирующий вклад внутривековых, порядка 30 лет, колебаний уровня воды крупнейших озер в широком спектре колебаний уровня Ладожского и Онежского озер от нескольких десятков лет до нескольких часов. Показано, что вклад внутривековых колебаний уровня в общую дисперсию в вышесказанных временных масштабах меняется во времени. Непараметрическим методом по среднемесячным и среднегодовым данным были получены оценки нестационарных (частотно-временных и двухчастотных) спектров уровня и ЭВБ [Филатова, Филатов, 1990]. Расчеты сечений нестационарного спектра выполнялись по реализациям продолжительностью 60 лет со сдвигом во времени 8 лет. Доля дисперсии колебаний уровня с временными масштабами около 5–11 лет в общей из-

менчивости составляет для Ладожского оз. порядка 20%. Вклад колебаний с частотой, соответствующей одному году – 12%. Для уровня озер характерна смена относительно короткопериодных (5–7-летних) флуктуаций, преобладающих на первых сечениях нестационарного спектра уровня (во второй половине XIX века), долгопериодными (порядка 30 лет) во второй половине XX – начале XXI века. В работе [Румянцев, Трапезников, 2008] выделена выраженная сезонная циклическая составляющая стока, притока и уровня воды озера на фоне межгодовой изменчивости, что позволило отнести эти процессы к классу периодически коррелированных нестационарных случайных процессов (ПКСП) [Драган и др., 1978]. Взаимный спектральный анализ колебаний уровня Ладожского оз. с суммарным притоком и стоком р. Невы показал, что на низких частотах 0,07–0,08 и 0,16–0,171/год значения ко-спектра на порядок превосходят ку-спектры, при этом когерентность $F(\omega)$ близка к единице, а разность фаз $\Theta(\omega)$ – менее 1 года, т. е. изменения этих процессов происходят синхронно. При анализе взаимной связи колебаний уровня с атмосферными осадками выяснилось, что несмотря на общую низкую взаимную корреляцию на частотах основных максимумов, выделенных по спектрам, связь значимая. Так, например, при частоте 0,03–0,071/год когерентность составляет 0,53. При этом флуктуации уровня озера запаздывают по отношению к колебаниям атмосферных осадков на 1 год. Подобная закономерность получена для статистических связей атмосферных осадков с суммарным притоком и стоком р. Невы.

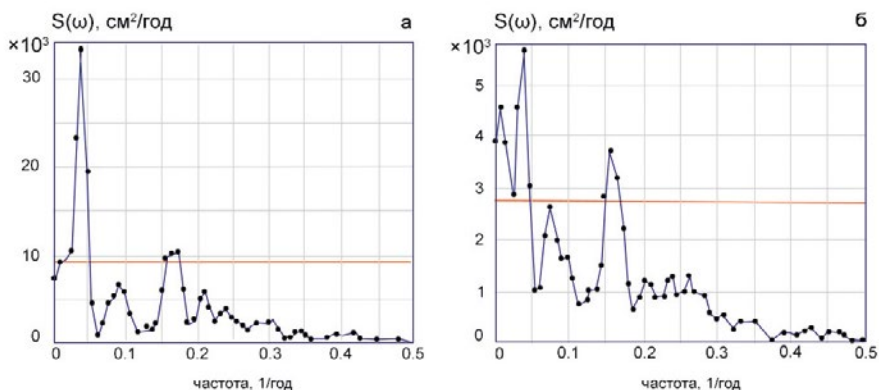


Рис. 6.2.4 – Оценки функций спектральной плотности $S(\omega)$ среднегодовых уровней воды озер: а – Ладожское, б – Онежское, рассчитанные по данным за 1900–2018 гг. Уровень значимости 5% показан красной линией

Далее представлены закономерности изменчивости уровня воды озер Ладожского, Онежского и Саймаа, входящих в систему ВОЕ (рис. 6.2.5, табл. 6.2.1).

На рис. 6.2.5 отмечается синхронность изменений уровня воды всех трех озер до начала регулирования уровня воды озер Саймаа и Онежского. После начала регулирования отмечается рассогласование изменчивости уровневых флуктуаций. Линейный тренд изменения уровня воды Ладоги показывает уменьшение со скоростью 3,5 мм/год, а Саймаа и Онега – повышение.

Колебания уровня воды Ладожского и Онежского озер, по среднемесячным данным, имеют коэффициент взаимной корреляции $|0,51|$, а озер Ладожского и Саймаа – $|0,70|$. Когерентность доминирующих внутривековых долгопериодных колебаний (порядка 30 и нескольких лет) равна $|0,90|$, а разность фаз близка к нулю [Филатова, Филатов, 1990]. Во внутривековых масштабах флуктуации уровня воды озер-водохранилищ – Онежского и Саймаа – имеют более сглаженный характер, чем для Ладожского оз. из-за регулирования режима работ ГЭС. Различия же изменений уровня крупнейших озер Европы определяются особенностями морфометрии, регулированием режима, характером водосборов. В табл. 6.2.1 представлены некоторые статистические характеристики уровня ВОЕ за разные промежутки времени.

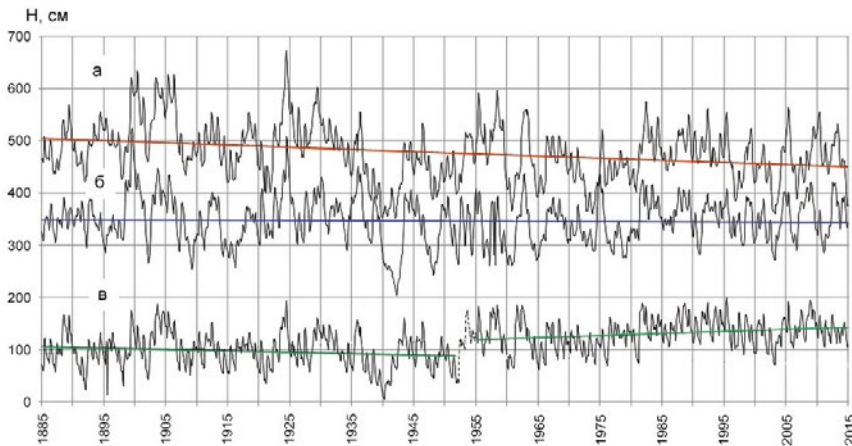


Рис. 6.2.5 – Изменчивость уровня воды озер Ладожского (а), Онежского (б) и Саймаа (в) по среднемесячным данным за 1885–2015 гг.

Амплитуда и дисперсия колебаний уровня Ладожского оз. превосходит таковые для оз. Онежское и Саймаа за весь период измерений и, в особенности, за относительно короткий период после зарегулирования в конце 1950 г. Для Ладоги, Онеги и Саймаа максимальные значения уровня, соответственно, составляли 322, 194 и 321 см, а дисперсия колебаний – 2372, 836 и 1524 см². За период после строительства ГЭС они стали существенно меньше (табл. 6.2.1). Для оз. Онежского и Саймаа в первой половине XX века до зарегулирования дисперсия и амплитуда колебаний уровня была выше, чем для второй половины XX и начала XXI веков, после регулирования режима они уменьшились более чем на 30%. В системе ВОЕ (Ладожское, Онежское, Саймаа) отмечается высокая когерентность многолетних колебаний уровня воды в первой половине XX века, которая во второй половине нарушается регулированием водного режима озер Саймаа и Онежское. Из-за нарушения естественного режима возникают сложности выделения природных и климатических колебаний, что усложняет долгосрочный прогноз уровня воды. Выделить природно-обусловленные составляющие крупномасштабной (многолетней) изменчивости уровня воды в системе ВОЕ можно только для Ладожского оз.

Таблица 6.2.1

Статистические значения среднемесячных (см) и среднегодовых (сг) характеристик уровня воды (см) ВОЕ

№ п/п	Озёра	Период измерений, годы	Характеристики уровня воды, относительно БС				
			Средний	Максимальный	Минимальный	Дисперсия	Макс. амплитуда
1	Ладожское, см.	1859–2015	483	674	352	2883	322
	Ладожское, сг.	1900–2015	475	620	364	2372	246
	Ладожское, сг.	1900–1953	485	620	364	3264	246
	Ладожское, сг.	1954–2015	468	555	377	1531	179
2	Онежское, см.	1881–2015	113	200	6	1229	194
	Онежское, сг.	1900–2015	116	168	26	836	142
	Онежское, сг.	1900–1953	98	158	26	747	132
	Онежское, сг.	1954–2015	132	168	79	401	89
3	Саймаа, см.	1847–2015	348	524	203	1905	321
	Саймаа, сг.	1900–2015	347	457	228	1524	229
	Саймаа, сг.	1900–1953	348	457	228	2215	229
	Саймаа, сг.	1954–2015	345	397	273	957	124

Далее рассмотрены так называемые удаленные связи, основанные на сравнении особенностей изменчивости среднегодовых значений уровня воды озер Ладожского и Онежского с таковыми в системе ВАО для одного и того же периода 1918–2015 г., поскольку только для этого периода есть надежные данные наблюдений уровня воды. Ранее было показано, что характер внутривековой изменчивости уровня воды ВАО и ВОЕ существенно различается [Диагноз..., 2020], а именно – в изменчивости уровня в них не отмечается каких-то общих глобальных тенденций, нет когерентных, с одинаковыми временными масштабами многолетних цикличностей. Временные изменения среднегодовых флуктуаций уровня ВОЕ так же, как и ВАО, показывают высокую степень синхронности колебаний и наличие только для каждой озерной системы доминирующих, присущих только этой системе квазипериодических колебаний. Взаимный статистический анализ колебаний уровня ВАО и ВОЕ свидетельствует об отсутствии синхронности изменений в этих системах. Взаимная корреляция менее |0,50|.

В работах [Румянцев и др., 2001; Румянцев, Трапезников, 2008] рассмотрены колебания уровня воды Ладожского оз. $H(t)$, которые определяются соотношением между приходной частью водного баланса $X(t)$ и регулирующей способностью речного стока $Q(t)$ из него, т. е. р. Невой. Приходная часть включает учтенный речной приток в озеро (обычно от трех основных рек: Волхов, Свирь, Вуокса), а также разность между осадками на зеркало водного объекта и испарением с него, но без учета подземного притока и так называемых трудно учитываемых компонент, обозначенных $N(t)$. Тогда уравнение записывается следующим образом [Румянцев, Трапезников, 2008]:

$$\frac{dH(t)}{dt} = X(t) - Q(t) + N(t). \quad (6.2.1)$$

Там же показано, что если все составляющие ВБ имеют размерность приращения уровня воды, то его уравнение при годовом осреднении данных записывается как:

$$Q(t) = f(H(t)). \quad (6.2.2)$$

Уравнение (6.2.2) указывает на наличие функциональной зависимости речного стока из озера от его уровня. При этом уровень воды и все компоненты ВБ обладают годовой ритмикой. Поэтому ВБ должен рассматриваться и характеризоваться в терминах теории периодически коррелированных случайных процессов (ПКСП) [Драган и др., 1987]. Для того чтобы исключить годовую ритмику исследуемых процессов, в этой работе применяется операция скользящего среднего с интервалом осреднения 1 год. В этом случае уравнение ВБ принимает вид:

$$\frac{dH_i(t)}{dt} = X_i(t) - Q_i(t) + N_i(t) \quad (6.2.3)$$

$$Q_i(t) = f(H_i(t)), \quad i = 1, \dots, 12. \quad (6.2.4)$$

где $H_i(t)$, $X_i(t)$, $Q_i(t)$, $N_i(t)$ – нулевые стационарные компоненты ПКСП, получаемые из $H(t)$, $X(t)$, $Q(t)$, $N(t)$ в результате операции скользящего среднего с интервалом осреднения 1 год.

Обычно ВБ озер характеризуется через среднееголетние нормы ЭВБ и их отклонения от среднееголетних норм [Фролов, 2003]. После ряда преобразований, предложенных в [Румянцев и др., 2001], ВБ сводится к равенству математических ожиданий приходной части и речного стока из него (с учетом или без учета ненаблюдаемых факторов). При этом простота анализа ВБ озер по данным с годовым осреднением достигается за счет потери информации о годовой ритмике ЭВБ.

Оценки математического ожидания уровня вод Ладожского оз., приходной и расходной частей ВБ, были выполнены для разных временных интервалов и периодов осреднения, но несмотря на это, в монографии [Румянцев, Трапезников, 2008] отмечается близость оценок. Имеющиеся расхождения можно объяснить главным образом различными временными интервалами, выбранными для оценки ВБ озера. По данным расчетов в этой работе численные значения среднемесячных норм приходной части водного баланса, уровня воды Ладоги и стока р. Невы, за временной интервал 1932–1958 гг., показано, что максимальные значения приходной части ВБ соответствуют маю, имеется также вторичный осенний максимум в октябре. Уровень воды озера и сток из него имеют достаточно гладкий годовой ход с абсолютным максимумом в июне – июле. При этом уровень воды начинает расти с января, в то время как приход воды в озеро продолжает убывать. Для объяснения этой особенности ВБ авторами рассчитаны регрессионные зависимости стока Невы от уровня воды Ладожского оз. для ледового (январь – март) и безледного (май – ноябрь) сезонов. Как видно из рис. 6.2.7, зимний сток

из озера в 1,5–2 раза меньше летнего. Зимой значения приходной части ВБ в 1,5–2,0 раза меньше, чем в безледный период (рис. 6.2.7).

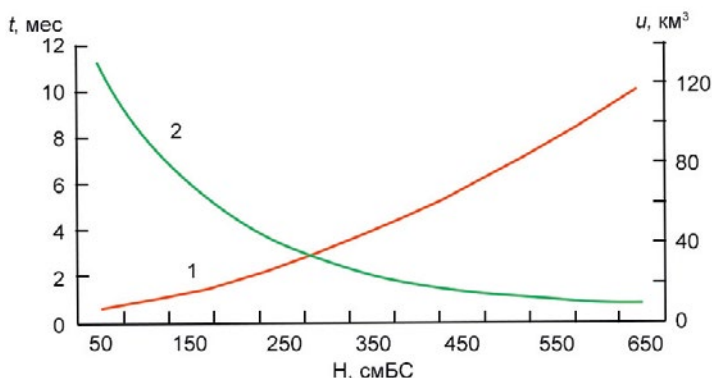


Рис. 6.2.7 – Среднегодовой уровень воды Ладожского оз. в зависимости от годового значения приходной части водного баланса (1) и время расхода 0,5-метрового слоя стока воды за счет стока р. Невы (2) [Румянцев, Трапезников, 2008]

Основы вероятностного моделирования ВБ Ладожского оз. представлены в работе [Румянцев и др., 2001]. Показано, что при статистическом анализе временных рядов уровня озера среднемесячные последовательности хорошо аппроксимируются нормальным распределением, при этом наблюдается высокая внутригодовая внутрирядная коррелированность уровня, коэффициент корреляции между соседними месяцами изменяется от 0,95 до 0,99. Причем эта связь более тесная, чем в диапазоне межгодовой изменчивости. Разработаны несколько вариантов модельного представления уровня Ладожского оз.

Модель передаточной функции с одним входом и одним выходом применяется для исследования механизмов влияния среднегодовых характеристик температуры воздуха и атмосферных осадков на уровень Ладожского оз. Выполненные исследования показывают запаздывающую реакцию озера на изменения температуры воздуха и атмосферных осадков. Уровень воды значимо реагирует на осадки текущего и двух предшествующих лет с максимальным откликом на осадки предшествующего года. «Память» уровня на температуру сохраняется в течение 3–5 лет. В работах [Румянцев и др., 2001; Румянцев, Трапезников, 2008] выполнены расчеты изменения уровня Ладожского оз. для разных сценариев возможного изменения климата. Показано, что существенные изменения уровня связаны с отклонением температуры воздуха от средних многолетних норм в летний (июнь, июль, август) сезон и осадков в мае, июне, августе и октябре. Значительные отклонения уровня могут произойти за счет перераспределения среднемесячных показателей даже без заметных отклонений среднегодовых значений климатических показателей от их среднеемноголетних норм.

Выбор метода расчета и прогноза уровня связан с поставленной задачей и зависит от необходимой заблаговременности, а также от внутренней структуры процесса. В практике гидрометеорологических прогнозов широ-

ко используют методы физико-статистического моделирования [Музылев, Привальский, 1988; Фролов, 2003], авторегрессионные модели [Румянцев и др., 2001], методы теории автоматического регулирования [Сергин, 1972].

В работе [Румянцев, Трапезников, 2008] показано, что для долгосрочного прогнозирования уровня можно ограничиться рассмотрением модели ВБ системы «уровень воды озера – сток р. Невы» с годовыми интервалами осреднения и дискретизации данных. «Временной ход уровня Ладожского озера, построенный по среднегодовым данным за период инструментальных измерений, трактуется авторами как с позиции чередования маловодных и многоводных фаз, так и – нестационарности по математическому ожиданию, поскольку уровень падает за весь период инструментальных измерений в среднем на 36 мм. Таким образом, временной ряд содержит детерминированный наклон, описываемый линейным трендом. В этом случае при значительном падении уровня Ладожского озера при продолжающемся потеплении климата на водосборе могут возникнуть серьезные проблемы. В частности, сток р. Невы из озера будет достаточно часто прекращаться, т.е. озеро может перейти в режим частично бессточного водоема. При падении уровня ниже отметки 4 м БС возникнут существенные проблемы судоходства на р. Неве и по Новолadoжскому каналу».

Для временных рядов изменений уровня воды озера, рассчитанных по среднемесячным данным, применялись вероятностные модели периодически-коррелированных случайных процессов – ПКСП [Драган и др., 1997; Румянцев, Трапезников, 2008]. Предложены также методы прогнозирования, основанные на экстраполяции естественных колебаний уровня больших озер с использованием моделей АРСС [Мякишева, Дьяченко, 2019].

Для долгосрочного прогнозирования уровня воды Ладожского и Онежского озер и стока р. Невы применялись динамико-стохастические модели. В работе [Фролов, 2003] колебания уровня озера описываются компонентой трехмерного марковского процесса. В этой работе, как и в работе [Румянцев, Трапезников, 2008], продемонстрировано регулирующее воздействие колебаний уровня и стока из озера, проявляющееся в увеличении их автокоррелированности и уменьшении коэффициентов вариации и асимметрии стока р. Невы.

В работе [Гордеева, Малинин, 2006] предлагается физико-статистический метод долгосрочного прогноза стока Невы и годового уровня Ладожского оз. Авторы рассматривают сток Невы и колебания уровня Ладоги в единой гидрологической системе. Идея подхода заключается в том, что вначале определяются физические связи речного стока с определяющими факторами, к которым относятся запасы влаги в снежном покрове перед началом снеготаяния, осеннее увлажнение почвы и летнее увлажнение в апреле – сентябре. Далее на основе многомерного регрессионного анализа предлагается прогностическая модель, заблаговременность которой зависит от инерционности воздействующих на изучаемый процесс факторов, которая для стока Невы составляет около 9 месяцев, как считают авторы. Принимается, что временные реализации годового стока Невы достаточно хорошо описываются моделью в виде простой цепи Маркова, что показывает необходимость учета более длительной предыстории стокоформирующих факторов.

На формирование стока Невы также оказывают влияние колебания уровня Ладожского оз., что обстоятельно показано в [Румянцев, Трапезников, 2008]. Стокоформирующие факторы рассматриваются здесь как «внутренние», а условно «внешними» являются горизонтальный перенос атмосферной влаги, циклоническая активность атмосферы, эффективное испарение над Северной Атлантикой. Учитываются осадки за холодный период, при этом заблаговременность прогноза стока составляет около 9 месяцев. Рассмотренный выше физико-статистический метод в полной мере применим и к долгосрочному прогнозу колебаний годового уровня Ладожского оз.

Один из известных подходов к проблеме прогнозирования гидрологического режима (уровня, стока рек, температуры воды, ледовитости) озер – это использование таких предикторов, как индексы атмосферной циркуляции и характеристики изменчивости термохалинной циркуляции океана. Это индексы Североатлантического колебания (САК или NAO), Атлантической мультитидакдадной осцилляции (АМО), интенсивности Атлантической термохалинной циркуляции (АТХЦ), EastAtlantic Pattern (EA), Scandinavia Pattern (SCA). Изменчивость интенсивности АТХЦ интерпретируется через NAO и АМО и использовалась для того, чтобы получить физически более корректное объяснение изменений уровня озер Ладожского и Онежского и обосновать их прогноз. Влияние Атлантики на изменение ВВ и уровня озер, осуществляется в конечном итоге за счет оценки переноса тепла и влаги с акватории Северной Атлантики в европейскую часть России [Володин и др., 2013]. Изменчивость результирующего потока тепла между Северной Атлантикой и атмосферой, так же, как и Атлантической термохалинной циркуляции (АТХЦ), характеризуется значительными долгопериодными колебаниями [Панин и др., 2014]. По его данным, в 1960–1990 гг. происходило увеличение интенсивности АТХЦ, а с 1990-х гг. заметно падение [Володин и др., 2013]. Согласованность в тенденциях хода уровня озер с индексами NAO, EA, SCA и наблюдаемыми значениями АМО свидетельствует о непосредственном влиянии последних на вариации климата Евразии, а соответственно, и на ход уровня водоемов.

Индексы атмосферной и океанской циркуляции в Северной Атлантике могут быть рассмотрены в качестве предикторов для прогнозирования уровня режима озер на ближайшую перспективу. В работе [Догановский и др., 2013] рассматриваются особенности распределения серий лет повышенного и пониженного увлажнения во времени и в пространстве на территории лесной зоны Евразии. В качестве индикатора режима увлажнения выбраны многолетние ряды уровней воды озер. Выявлены наиболее значимые 30-летние флуктуации. В качестве вынуждающих факторов выбраны индексы атмосферной циркуляции.

В работе [Выручалкина и др., 2016] оценены связи уровня воды Ладожского оз. с индексами NAO, АМО и АТХЦ. Между колебаниями уровня воды и циркуляционными индексами нет точной согласованности в изменчивости, но наблюдаются периоды синхронных колебаний, что показано по данным взаимнокорреляционного анализа. Результаты комплексного анализа позволили рассматривать используемые здесь индексы атмосферной и океанской циркуляций в качестве предикторов для долгосрочного прогнозирования уровня режима Ладожского и Онежского озер.

В работе [Панин и др., 2015] показано, что транспорт влаги (ТВ), выносимой с Северной Атлантики на территорию Европы, хорошо согласуется с изменениями термохалинной циркуляции океана и индексами атмосферной циркуляции. По данным длительных измерений были отмечены определенные долгопериодные компоненты в изменениях климата с временными масштабами 30–60 лет, выделялась также квазидвухлетняя цикличность [Володин, 2016]. Природа этих колебаний климата изучена недостаточно хорошо, проявляются они асинхронно в разных регионах по-разному [Монин, Сонечкин, 2005; Володин, 2016]. Выявленные климатические флуктуации [Мохов и др., 2013] представляют собой осциллятор, при котором климатическая система совершает колебания, показатели которых циклически повторяются во времени с изменением амплитуды, временного масштаба и взаимодействий. Эти климатические осцилляторы порождают сложную изменчивость климата на фоне тренда, вызванного антропогенными причинами изменений климата.

В бассейне Ладожского и Онежского озер значения поверхностного баланса влаги в слоях от поверхности суши до 2200 м и 2200–10400 м на перспективу до 2085 г. имеют разные тенденции изменения. Так, для поверхностного баланса влаги в слое 2200–10400 м ярко выражены периоды роста и спада с общим отрицательным трендом до 2085 г. Разработан комбинированный сценарий климатических изменений, базирующийся на композиции «парникового» и «циклических» эффектов. Этот подход позволяет описывать не только рост температуры воздуха, вызванный эмиссией парниковых газов, но и известную по данным наблюдений изменчивость климата с временными масштабами в несколько десятков (порядка 60) лет. Результаты расчетов показывают возможное сокращение транспорта влаги и уменьшение атмосферных осадков на европейской части России в ближайшие 15–20 лет, из-за чего с временным сдвигом в несколько лет будет продолжаться падение уровня воды Каспия, а также Ладожского оз. Режим уровня Онежского оз. регулируется работой ГЭС, и здесь не так заметно влияние возможных изменений климата. Примерно с 2035 до 2070 г. транспорт влаги из Атлантики увеличится, что приведет к росту осадков и повышению уровня этих водоемов.

Авторы благодарят А. Ф. Балаганского за помощь при подготовке данных.

Глава 7. Термодинамические особенности Ладожского озера в связи с климатическими изменениями

Согласно оценкам состояния водных экосистем на пороге тысячелетия [IPCC, 2007] внутренние воды являются одними из наиболее подверженных угрозе изменения климата и роста населения объектов. В последние годы интерес к процессам изменения климата, проблемам исследования и контроля за состоянием окружающей среды и последствиям антропогенного влияния на крупные озера, водные объекты замедленного водообмена растет и требует комплексного рассмотрения происходящих процессов [Magnuson et al., 1998; George, 2010; Филатов, 2013].

7.1 Реакция димиктических озер на климатические изменения

Крупные озера мира в значительной степени оказывают влияние на окружающую территорию. Сложный характер переноса и трансформации энергии в озере, а также процессы взаимодействия поверхности озера и атмосферы приводят к аномалиям погоды и формированию регионального климата. Озера играют ключевую роль в качестве индикаторов, интеграторов и регуляторов климатических изменений [Williamson et al., 2009]. В настоящее время среднесезонное распределение гидрологических и гидрофизических характеристик в крупных озерах Земли достаточно хорошо изучено. Наиболее актуальной является проблема оценки реакции озера на разномасштабные климатические вариации, связанные с внутригодовыми и межгодовыми термическими изменениями [Филатов и др., 2006; Филатов и др., 2014; O'Reilly et al., 2015], что позволяет обнаруживать как постепенные, так и резкие изменения его тепловых характеристик, поскольку с помощью этой информации можно оценить вероятный отклик озера на будущие климатические воздействия. Основные результаты исследований термического состояния димиктических озер на изменения климата приводятся в этом разделе с проецированием выводов на Ладожское оз., которое расположено в умеренной климатической зоне, что определяет его димиктический статус, ледовый режим и четко выраженную последовательность термических структур в течение года [Тихомиров, 1982; Бояринов, Петров, 1991].

Глубины Ладожского оз. изменяются от несколько метров на мелководье до 200 и более метров, причем районы с разными глубинами различаются как площадями, так и объемами. Эти районы по-разному реагируют на приход тепла и его распространение внутри водной толщи. Более глубокие районы озера интегрируют эффекты метеорологического воздействия в течение более длительных периодов времени в отличие от мелководных. Таким образом, термическая реакция различных районов Ладожского оз. на разномасштабные потоки тепла во многом определяется распределением глубин [Науменко и др., 2000; Науменко, Каретников, 2002]. Среднегодовая

температура водной массы озера составляет 3,8 °С, а среднегодовая температура поверхности озера 5,5 °С, при среднегодовой амплитуде температуры поверхности ~17 °С. Среднегодовая температура воздуха за период 1979–2018 гг. по м/с Сортавала равна 3,9 °С при среднегодовой амплитуде среднемесячных температур воздуха ~25,5 °С. Важным фактором, определяющим распределение температуры воды по вертикали в течение года, является конвективное перемешивание, которое формируется при возникновении гидростатической неустойчивости вследствие увеличения плотности вышележащих слоёв. Аномалия плотности пресной воды при температуре 3,98 °С приводит к возникновению весенней и осенней термических фронтальных зон (термобара). Главной особенностью этих зон является разделение водной толщи на две горизонтальные области: устойчиво стратифицированную и квазиизотермическую, где идет процесс свободной конвекции. В период существования весенней фронтальной зоны прибрежная стратифицированная область имеет температуры воды больше температуры наибольшей плотности в отличие от центральноозерной толщи, температуры которой ниже 4 °С. В этот период характерны большие горизонтальные градиенты температуры поверхности воды и воздуха [Науменко, 1989; Науменко и др., 2012]. В осенней фронтальной зоне горизонтальные градиенты значительно меньше, чем в весенней, но и весной, и осенью главным индикатором фронта на поверхности воды является 4-градусная изотерма. Процесс конвективного перемешивания важен для понимания возникновения и существования в озере областей с различной биологической продуктивностью. Формирование верхнего однородного слоя (эпилимниона), его толщины и пространственное распределение зависит от конвективного перемешивания. Конвекция играет первостепенную роль в заглублении и разрушении термоклина (металимниона) в осенний период.

Ежегодно Ладожское оз. претерпевает два периода полного перемешивания: осенью перед образованием льда и весной после начала таяния льда. В эти периоды происходит обмен различными субстанциями (кислородом, биогенными элементами) от поверхности до дна. После этого весной возникает устойчивая плотностная стратификация в прибрежных районах (с температурами выше 4 °С) и весенний термический бар, осенью – аналогичная ситуация, но прибрежные районы имеют температуру ниже 4 °С. Весной районы Ладожского оз. с различными морфометрическими характеристиками прогреваются с различными скоростями, что определяет скорость продвижения термобара и сроки возникновения устойчивой термической стратификации. Полная первичная стратификация всего озера наступает в период исчезновения термической фронтальной зоны на поверхности озера.

Сроки наступления стратификации в различных районах озера являются важным индикатором климатических изменений. В 1990 г. на основе различных сценариев потепления климата для озера Мичиган с использованием одномерной модели было продемонстрировано, что следует ожидать: 1) увеличение температуры поверхности озера на протяжении всего года, а придонные температуры воды могут быть ниже по сравнению с климатическими значениями; 2) теплосодержание водной толщи будет также увеличиваться, особенно в зимние месяцы; 3) верхний квазиоднородный слой

и термоклин будут находиться ближе к поверхности летом, а вертикальные градиенты температуры будут больше; 4) в связи с потеплением зим полное перемешивание может происходить не каждую зиму [McCormick, 1990]. В настоящее время во многих димиктических озерах мира наблюдаются предсказанные изменения, приведенные в указанной статье.

Сдвиги в сроках начала и конца периода стратификации обнаружены в озерах Великобритании и Ирландии [George et al., 2007; Livingstone, 2003]. Указанные сдвиги усиливают удержание растворенного кислорода, питательных веществ, частиц и неподвижных организмов в определенных слоях озера, что приводит к воздействиям на экосистемы озер [O'Reilly et al., 2003]. Продолжительность термической стратификации и период вертикального перемешивания имеют решающее значение для внутренних химических и биологических процессов в глубоких озерах умеренной климатической зоны. Для оз. Верхнего выявлено значимое влияние ранней весны на последующий период нагревания озера [Austin, Allen, 2011]. Отмечается, что сдвиг в сроках осеннего окончания периода стратификации был менее изменчивым, чем сдвиг в сроках весеннего его начала, на что было указано в статье Мак-Кормика [McCormick, 1990]. В настоящее время этот эффект наблюдается и в Ладожском оз. Повышение летних температур воздуха в термически стратифицированных озерах приводит к повышению температуры поверхности и температуры верхнего квазиоднородного слоя (гиполимниона) [Piccolroaz et al., 2015]. Потепление климата может привести к непосредственному изменению в вертикальной термической структуре озера, а именно в величинах вертикальных градиентов температуры, глубине термоклина, различиям между температурами эпи- и гиполимниона [Carpenter et al., 1992; King et al., 1997]. Следует ожидать увеличения гидро-статической устойчивости при слабых ветрах [Stefan et al., 1998].

На основе ретроспективного анализа для Ладожского оз. выявляются существенные различия между вертикальной структурой температуры воды в теплый и холодный год [Науменко, Гузиватый, 2010]. Увеличение температуры поверхности воды при прочих равных условиях приводит к увеличению вертикальных градиентов температур в слое скачка и, следовательно, устойчивости водной толщи в теплый год. Ярко выраженные изменения температуры поверхности воды и эпилимниона имеют место в поверхностном слое, глубины термоклина становятся меньше тогда, как на глубине ниже слоя скачка (50 м) температура воды практически не реагирует на изменения поверхностной температуры. Это усиливает блокирующую роль слоя скачка и затрудняет обмен с нижележащими слоями.

При прочих равных условиях в теплый год осенью в период охлаждения поверхности воды может уменьшаться интенсивность свободной конвекции и, следовательно, в свою очередь, увеличиваться период стратификации. В холодный год вертикальные градиенты температуры значительно меньше, особенно на мелководных станциях в прибрежной зоне озера. Вертикальный обмен теплом, количеством движения и веществом будет значительно интенсивнее, чем в теплый год. Особенно это существенно осенью, когда во время свободной конвекции температура поверхности воды достигает примерно $5,9 \pm 0,2$ °C. Она выравнивается по глубине от поверхности до дна.

Температура придонных вод достигает своего максимума. Это означает, что именно в это время вертикальная устойчивость водной толщи позволяет быстро опуститься водам с поверхности до придонных горизонтов. Следовательно, в экстремально холодный год процессы свободной конвекции в осенний период могут начинаться раньше и будут способствовать обмену субстанциями между поверхностью и придонными слоями. При усилении ветрового воздействия повышение температуры воздуха может увеличить общее теплосодержание стратифицированного озера за счет углубления эпилимниона [Ye et al., 2019]. В противном случае температура гипolimниона будет в первую очередь определяться вертикальными градиентами температуры в термоклине и может на достаточно больших глубинах не реагировать на изменения температуры воздуха.

Одним из главных факторов, влияющих на тепловые характеристики димиктических озер, является их зимний ледяной режим. На поверхности Ладожского оз. ежегодно появляются ледовые образования и возникает так называемая обратная вертикальная стратификация, гидростатически устойчивая, но с температурами воды около 0 °C у поверхности и более высокими температурами у дна (не более 4 °C). В этот период возможно возникновение «каскадинга», горизонтальных конвективных потоков, связанных с плотностными различиями и ветровым воздействием, приводящим к понижениям придонной температуры воды в глубоководных районах озера [Fer et al., 2002; Wüest et al., 2005; Чубаренко, 2010].

В димиктических озерах более теплые зимы, как правило, приводят к более короткому периоду ледяного покрова, озера замерзают позже, а таяние льда начинается раньше, чем в более холодные зимы. Это приводит к полному вертикальному перемешиванию раньше весной и позже осенью. Кроме того, более раннее таяние льда на озерах может привести к более раннему появлению фитопланктона, весеннее «цветение» которого было обнаружено, например, в оз. Эркен в Швеции [Weyhenmeyer et al., 1999], а также в Ладожском озере [Поздняков, Филатов, 2021]. Если более позднему формированию ледового покрова предшествует период более длительного осеннего перемешивания, это может охладить всю толщу воды в глубоких озерах более эффективно, чем при более коротком осеннем перемешивании, и привести к лучшему насыщению кислородом гипolimниона. Для оз. Констанс продемонстрировано комплексное воздействие зимнего потепления на химико-биологическое состояние экосистемы [Straile et al., 2003].

Рассмотренные особенности реакции термического состояния димиктических озер на современные изменения климата безусловно должны проявляться в Ладожском оз., при этом наибольшему климатическому воздействию будут подвергаться мелководные районы [Науменко, Гузиватый, 2010]. Повышение летних температур поверхности воды будет приводить к усилению вертикальных температурных градиентов в термоклине Ладожского оз., и более теплый климат продлит вегетационный период водорослей в озере.

В крупном озере в различные сезоны распределение по акватории значений температуры может иметь значительные пространственные градиенты, что влияет на скорости развития организмов. Даже относительно

небольшие изменения тепловых характеристик озера, например в их термической стратификации, могут вызывать серьезные сдвиги в популяциях фитопланктона, бактериопланктона и зоопланктона, а также изменять скорость метаболизма [Weyhenmeyer et al., 1999; Jasser, Arvola, 2003]. Выявлены изменения биологических сообществ в Онежском оз. [Filatov et al., 2018]. Это связано с тем, что организмы часто приспособлены к определенному узкому диапазону температур и чувствительны к вариациям температуры окружающей среды. Анализ реакции димиктических озёр на климатические изменения указывает, что при сохранении климатических тенденций следует ожидать изменения теплосодержания [Vanderkelen et al., 2020] и других термогидродинамических параметров Ладожского оз., причем эти изменения будут активно воздействовать на экосистему озера [Scheffer et al., 2001].

7.2 Многолетние тренды температуры воздуха

Современные климатические изменения на северо-западе европейской части РФ проанализированы в работах карельских учёных [Крупнейшие озёра..., 2015; Филатов и др., 2006]. Было показано, что в районе Онежского озера изменения средней годовой температуры для всех пунктов наблюдения были синхронны, а изменения в температурном режиме Карелии привели к смещению дат наступления климатических периодов года. Для территории России В.М. Мирвис [Мирвис, 2002] показала, что наиболее статистически значимым за последнее столетие является повышение температуры воздуха весной, а также в первой половине зимы, а также было продемонстрировано изменение продолжительности периодов вегетации в XX веке [Малинин, Гурьянов, 2015]. Оценка сезонных особенностей изменения климата в Северо-Европейском регионе выполнена в работах [Крышнякова, Малинин, 2009; Панин и др., 2009; Ульянец и др., 2010].

Детальный анализ климатических изменений температурного режима севера Ладожского оз. был проведен по данным метеорологической станции Сортавала, расположенной на северном побережье озера на основе последовательного статистического анализа трендов от годового периода осреднения до выявления трендов дат начала и конца периодов положительных и отрицательных температур воздуха в течение года, а также трендов среднемесячных значений температуры и её экстремумов [Науменко, Каретников, 2017].

Для характеристики температурного режима северной прибрежной части Ладожского оз. был подготовлен временной ряд минимальной, средней, максимальной ежедневных температур воздуха на за период с 1945 по 2018 г., который затем был разделен на две части: 1945–1980 гг. и 1979–2018 гг. Статистически значимые различия между исследуемыми периодами свидетельствуют об изменении внешних воздействий на экосистему Ладожского оз. На рис. 7.2.1 приведена разность среднесуточных значений температур воздуха между вторым и первым периодом. Жирной линией показано скользящее тридцатидневное среднее. Очевидно, что второй период теплее, чем первый, во все месяцы года, особенно в зимние.

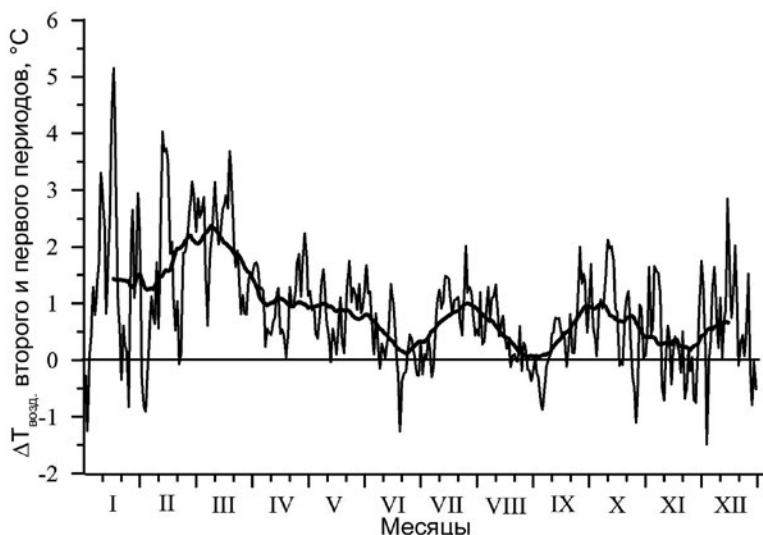


Рис. 7.2.1 – Разность среднесуточных значений температуры воздуха по м/с Сортавала между периодами 1945–1980 гг. и 1979–2018 гг. и скользящее тридцатидневное среднее

Статистический анализ многолетних изменений температуры воздуха выполнялся на основе анализа «вложенных» периодов осреднения и проводился в несколько этапов. Предварительно была выполнена проверка ряда на однородность по среднему и дисперсии при помощи критериев Стьюдента, Фишера, Левина и теста Брауна – Форсайта. Статистическая значимость линейных трендов определена при 5%-м уровне значимости с использованием критерия Стьюдента.

На первом этапе анализировались временные изменения среднегодовой температуры воздуха. Значимый положительный линейный тренд среднегодовых температур воздуха $T_{\text{год}}$ за весь исследуемый период с 1945 по 2018 г. равен $0,03 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Однако ряд неоднороден. Среднегодовая температура первой половины ряда ($2,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$) меньше, чем соответствующая температура второго ряда ($3,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$), на один градус. Сравнение среднегодовой температуры воздуха по м/с Сортавала за тридцатилетний период с 1891 по 1920 г. ($2,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$) [Малинин, 2008] с указанными значениями свидетельствует, что температурный режим в конце XIX – начале XX века на Ладожском оз. был суrowее, чем в конце XX – начале XXI века.

В первый период (1945–1980 гг.) тренд среднегодовых температур незначим, за второй период (1979–2018 гг.) значим, его величина в два раза больше по сравнению со средним за весь период наблюдений и составляет более 30% общей дисперсии процесса (рис. 7.2.2). Закономерно коэффициент вариации уменьшается во второй период в связи с увеличением среднегодовой температуры воздуха. Среднегодовая температура воздуха по м/с Сортавала, начиная с 2013 года, всегда превышала $4,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, достигнув $4,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в 2018 г., что на один градус больше средней за период 1979–2018 гг. На рис. 7.2.2 показаны временные изменения средней положительной за год $T_{\text{пол}}$ и средней отрицательной за год $T_{\text{отр}}$ температуры воздуха за исследу-

емый период. Обращает на себя внимание, что амплитуда отрицательных температур и степень их изменчивости значительно больше, чем положительных температур. Этот факт косвенно подтверждается в справочнике по климату СССР [Научно..., 1988], где указывается, что наибольшие значения среднеквадратического отклонения за декаду отмечаются в январе – феврале (7,5–8,2 °C) в период минимальных температур, наименьшее – в июле (2,6–3,2 °C) в период максимальных температур.

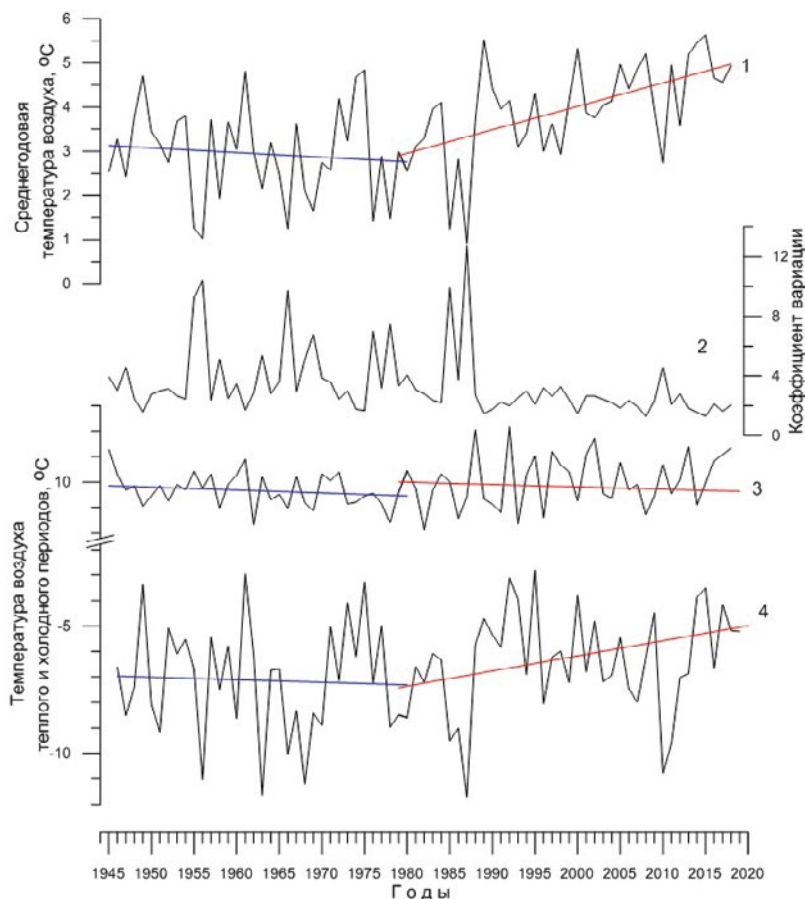


Рис. 7.2.2 – Изменения среднегодовой температуры воздуха $T_{\text{год}}$ (1), коэффициента вариации $T_{\text{год}}$ (2), средней положительной (3) и средней отрицательной (4) температуры воздуха по м/с Сортавала

Средние продолжительности периода с отрицательными температурами, так же, как и периода с положительными температурами, для двух половин ряда значимо отличаются друг от друга, что указывает на неоднородность всего ряда. Выявлен значимый тренд уменьшения периода отрицательных температур и, соответственно, увеличения продолжительности периода положительных температур воздуха со скоростью около 1 суток/год с 1979 по 2015 г., но с небольшим коэффициентом детерминации (рис. 7.2.3,

табл. 7.2.1). Значимых различий ни в дате перехода через 0, ни в средней температуре для первого и второго периодов нет. Во второй половине ряда начало устойчивого перехода через 0 °С в сторону положительных температур происходит раньше, чем в первой половине, на 8 дней: в конце марта, а не в первой декаде апреля.

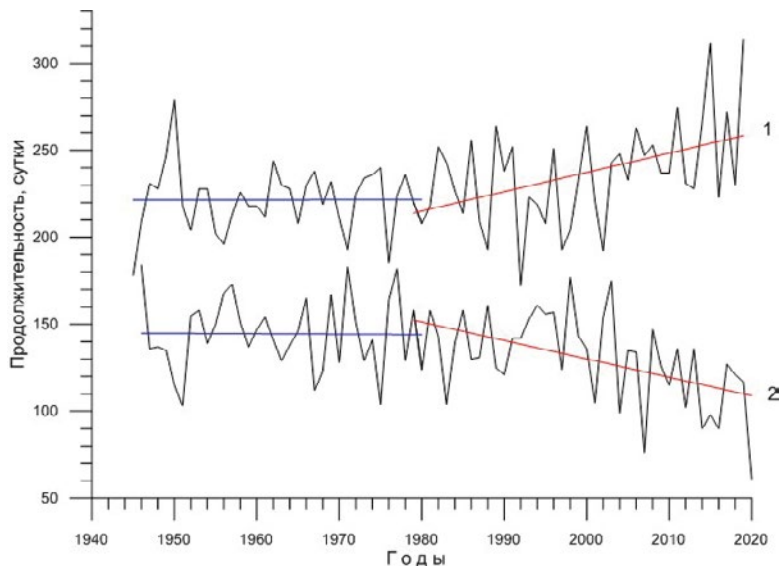


Рис. 7.2.3 – Изменение продолжительности периода положительных (1) и отрицательных (2) температур воздуха по м/с Сортавала

Таблица 7.2.1

Средние значения и характеристики линейных трендов параметров, характеризующих периоды отрицательных (-) и положительных (+) температур воздуха по м/с Сортавала*

Периоды	1945–1980 гг.	1979–2015 гг.			1945–2015 гг.	
Характеристики	Среднее	Среднее	Тренд	R ²	Тренд	R ²
Дата перехода к отрицат. темп.	12.11	17.11	0.70	14.8	0.20	5.7
Средняя отрицат. температура, °С	-7.1	-6.4	–	–	–	–
Продолжительность периода (-), сутки	145	133	-0.93	16.7	-0.39	11.3
Дата перехода к полож. темп.	07.04	31.03	–	–	-0.20	8.4
Средняя полож. температура, °С	9.7	10.0	–	–	–	–
Продолжительность периода (+), сутки	220	232	1.0	16.3	0.40	11.5

*Жирный шрифт в таблице указывает на значимые различия по среднему и дисперсии

В период 1945–1980 гг. нет значимых трендов во временных рядах ни по одной из рассматриваемых характеристик. Однако в период 1979–2015 гг. обнаруживается положительный тренд в датах перехода к отри-

цательным значениям. Продолжительность периода устойчивых положительных температур увеличилась, но средняя температура практически не изменилась. Устойчивый переход температуры воздуха через 0°C к отрицательным значениям происходит во второй декаде ноября и нет значимого временного сдвига между первым и вторым периодами.

Следующий этап исследования межгодовой изменчивости температуры воздуха заключался в анализе среднемесячных трендов. Тренды, определенные по среднемесячным значениям, для всего периода с 1945 по 2015 г. значимы для трех весенних месяцев (март, апрель, май). Наибольшая величина тренда отмечалась для марта и равна $0,059^{\circ}\text{C}/\text{год}$. В первой половине исследуемого ряда (с 1945 по 1980 г.) значимые тренды отсутствовали. На рис. 7.2.4 и 7.2.5 показаны только значимые тренды, которые имели место во второй период (1979–2018 гг.) в ноябре – декабре и были наибольшими ($0,08$ – $0,1^{\circ}\text{C}/\text{год}$) по сравнению со значимыми трендами мая, июля, августа и сентября ($0,04$ – $0,06^{\circ}\text{C}/\text{год}$). Наибольший коэффициент детерминации отмечен в августе и сентябре (25%), для остальных трендов он составлял 10%.

Для весенних месяцев (март, апрель, май), а также июля ряды были неоднородны, обнаружены значимые различия между средними и дисперсиями, что указывает на скачкообразное изменение температур воздуха во второй период (1979–2018 гг.). На врезках рис. 7.2.4 и 7.2.5 показаны внутригодовые изменения среднегодовых температур воздуха для двух периодов, месяцы со значимыми различиями средних обозначены треугольниками.

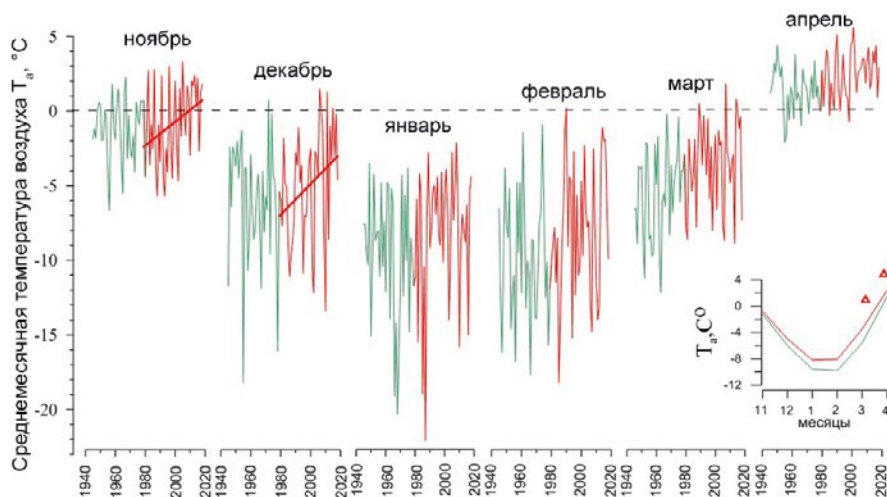


Рис. 7.2.4 – Изменения среднемесячных температур воздуха и их значимые тренды с ноября по апрель для двух периодов: 1) с 1945 по 1980 г. (зеленая линия) и 2) 1979–2018 гг. (красная линия)

Неоднородность среднемесячных температур для весенних месяцев является важной особенностью временных рядов, указывающей на произошедшую перестройку во второй половине исследуемого периода с тенденцией на увеличение весенних температур воздуха на севере Ладожского оз.

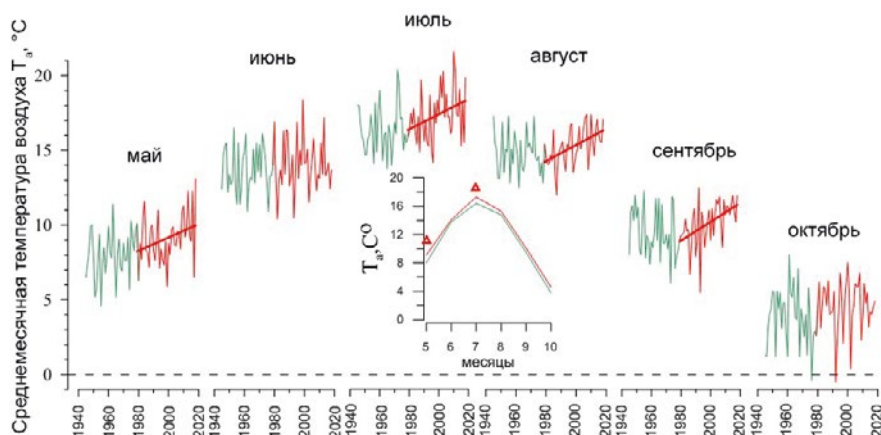


Рис. 7.2.5 – Изменения среднемесячных температур воздуха и их значимые тренды с мая по октябрь для двух периодов: 1) 1945–1980 гг. и 2) 1979–2018 гг.

Для двух частей исследуемого периода рассчитаны коэффициенты вариации среднемесячных температур, представленные на рис. 7.2.6. Однако за период 1979–2015 гг. весной возникновение максимума происходит на месяц раньше по сравнению с первым периодом. Это означает, что наибольшие изменения в настоящее время происходят в марте.

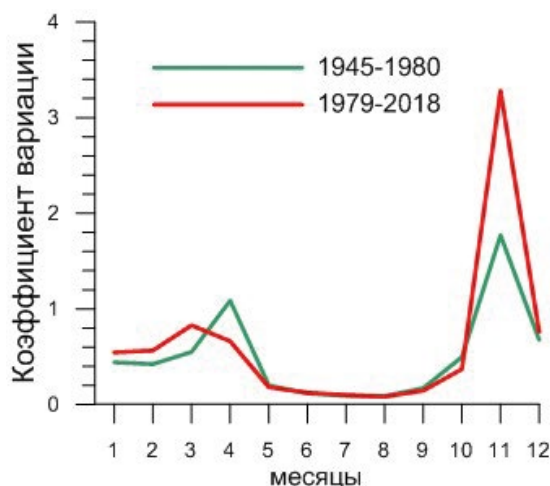


Рис. 7.2.6 – Временной ход коэффициента вариации среднемесячных температур для двух периодов

Следующий этап анализа трендов с помощью анализа «вложенных» периодов осреднения был направлен на определение трендов экстремумов, для этого были подготовлены ряды минимальных и максимальных среднесуточные температур воздуха для двух исследуемых периодов. Значимых трендов не было обнаружено ни для максимальных, ни для максимальных температур. Проверка на однородность показала, что кроме двух весенних

месяцев (март и апрель), ряды однородны. В марте и апреле существуют значимые различия в средних и дисперсиях, так, во второй период средняя минимальная температура воздуха марта по сравнению с предыдущим периодом поднялась на $5,2^{\circ}\text{C}$ с $-16,6$ до $-11,4^{\circ}\text{C}$, в апреле – на $1,7^{\circ}\text{C}$ с $-5,1$ до $-3,4^{\circ}\text{C}$. Анализ изменений максимальных среднесуточных температур воздуха за каждый месяц выявил, что только в январе и апреле ряды неоднородны и, следовательно, средние для этих месяцев отличаются значимо за оба исследуемых периода, однако эти изменения составляют не более одного градуса для января и примерно равны аналогичным изменениям минимальных температур воздуха.

Статистический анализ изменений температуры воздуха в северной части Ладожского оз. (м/с Сортавала) позволил детально проанализировать климатические изменения, определить изменения трендов для каждого месяца года за период с 1945 по 2018 г., а также для двух периодов – до 1980 г. и после 1980 г. В первый период практически не было значимых трендов для разных периодов осреднения. Во второй период продолжительность устойчивых положительных температур увеличилась примерно на 12 суток, но средняя температура этого периода практически не изменилась. Температуры воздуха теплого периода подвержены незначительным изменениям. Годовая амплитуда среднемесячной температуры воздуха составляет $\sim 28,5^{\circ}\text{C}$ и не различается значимо между исследуемыми периодами.

С 1979 по 2015 г. преобладают положительные тренды температуры воздуха с ярко выраженным потеплением в холодное полугодие, что соответствует выводам статьи [O'Reilly et al., 2015]. Было подтверждено, что значимые зимние тренды температуры воздуха превышают летне-осенние. Значимые различия (неоднородность по среднему и дисперсии) указывают на произошедшее повышение температуры воздуха в марте, апреле, мае, а также в июле, начиная с 1980 г., по сравнению с предыдущем периодом (1945–1980 гг.). В эти месяцы отмечалось не постепенное (монотонное) увеличение температуры воздуха на севере Ладожского оз., а достаточно резкое (скачкообразное) с 1980-х гг. по наше время, что послужило основной причиной нарушения однородности рядов температуры воздуха. Увеличение температуры очень неравномерно по сезонам и не позволяет анализировать межгодовые колебания в рамках стационарности процесса за 73-летний период с 1945 по 2018 г.

7.3 Радиационный баланс поверхности Ладожского озера

Ладожское оз. оказывает значительное влияние на атмосферные процессы в северо-западном регионе России. Озеро накапливает тепло в летнее время и отдает его в атмосферу в течение зимнего периода. Важной характеристикой термодинамического режима является радиационный баланс, характеризующий поток тепла, поступающий в озеро. Пространственно-временная изменчивость составляющих радиационного баланса поверхности Ладожского оз. определяется долготой и широтой места, процессами взаимодействия приводного слоя воздуха и поверхностных вод озера, метеорологическими характеристиками и распределением глубин. Последние масштабные исследования актинометрических параметров в Ладоге про-

водились в 1950–1970 гг. Смирновой и Кирилловой [Тепловой режим..., 1968; Кириллова, 1970]. На основе прямых измерений были составлены таблицы для определения элементов радиационного баланса для шести больших районов, к сожалению, не связанных ни с широтным распределением, ни с пространственным распределением глубин озера.

Основной задачей настоящего раздела является оценка прихода тепла на всю акваторию Ладожского оз. Расчетная область разделена на 72 квадрата (20' по долготе 10' по широте), для каждого из которых имелись климатические данные, выбранные из базы данных [Гузиватый и др., 1998]. На основе расширенной формулы притока тепла за счет лучистой энергии [Schertzer, Taylor, 2009] создана вычислительная схема для оценки радиационного баланса и его компонент для акватории Ладожского оз. для периода открытой воды. В данном исследовании приток тепла за счет лучистой энергии рассчитывался как алгебраическая сумма пяти компонент:

$$Q^* = Q_s - Q_r + Q_a - Q_{ar} - Q_{bs}, \quad 7.3.1$$

где Q^* – суммарный приток радиации; Q_s – приходящее глобальное солнечное излучение; Q_r – отраженное глобальное солнечное излучение; Q_a – приходящее длинноволновое излучение; Q_{ar} – отраженное длинноволновое; Q_{bs} – излученное длинноволновая радиация. Расчет составляющих радиационного баланса производился по методу BREB [Harbeck, 1962] – на основе расширенной формулы суммарного притока радиации [Schertzer, Taylor, 2009].

Для расчета сезонного хода радиационного баланса и его компонент использовались данные наблюдений многолетних судовых экспедиций с 1956 г. Сезонный ход среднесуточной температуры поверхности воды и воздуха был аппроксимирован в виде функции времени. Для аппроксимации распределения среднесуточной температуры за исследуемый период (с 15 мая по 1 ноября) использовались уравнения регрессии нелинейного вида [Науменко, Каретников, 2002]. В модели были приняты некоторые допущения и ограничения в исходных данных. Не учитывается изменение облачности во времени, задается либо 10%-е покрытие облаками, либо полное отсутствие облачности. Распределение амплитуды среднесуточной температуры воды рассчитывалось на основании климатического значения стандартного отклонения T_w для каждого месяца. Альбедо задано постоянным и равным 10%. Кроме того, для расчетов использовались данные наблюдений лишь 37 квадратов, распределенных неравномерно, с достаточной длиной выборки данных наблюдений для составления уравнений регрессии.

По результатам вычислений получены ежедневные поля пространственного распределения климатических значений притока тепла на поверхности Ладожского оз. в период открытой воды (с 15 мая по 1 ноября). Рассчитана временная изменчивость средней по всему озеру величины притока тепла и определены диапазоны, в пределах которой она может варьироваться в рассматриваемые периоды времени. Определен климатический временной ход пространственного распределения притока тепла для поверхности озера, а также средние по всему озеру величины притока тепла и их диапа-

зоны с мая по ноябрь. В середине мая поле Q достаточно однородно, наблюдаются повышенные значения притока тепла вдоль берегов ($2\text{--}4 \text{ Мдж/м}^2\text{д}$) по сравнению с центральной частью озера ($8\text{--}10 \text{ Мдж/м}^2\text{д}$). К началу июля происходит прогрев озера, и максимальная величина чистого излучения достигает $16 \text{ Мдж/м}^2\text{д}$, в центральном районе формируется выраженный градиент характеристики: Q уменьшается с северо-запада на юго-восток. В начале августа область наибольшего притока тепла смещается к центру акватории, где Q достигает $10 \text{ Мдж/м}^2\text{д}$. В направлении к южному берегу его величина значительно уменьшается (вплоть до $2 \text{ Мдж/м}^2\text{д}$). В июле приток тепла максимален за весь рассматриваемый период, далее его значения начинают уменьшаться на всей исследуемой акватории. В августе поле становится более однородным, сглаживается градиент величины от центра к берегам. В северной части озера у берега Q уменьшился до $6 \text{ Мдж/м}^2\text{д}$, а у южного берега, увеличивается до $4 \text{ Мдж/м}^2\text{д}$. К началу сентября распределение притока тепла на акватории Ладоги снова становится практически однородным, его величина составляет около $2 \text{ Мдж/м}^2\text{д}$. У западного и юго-восточного берегов значения Q несколько выше: до $4 \text{ Мдж/м}^2\text{д}$. С начала октября и до ноября поле радиационного баланса на Ладожском оз. однородно и уменьшается от $2 \text{ Мдж/м}^2\text{д}$ в октябре вплоть до нуля к 1 ноября.

На рис. 7.3.1, а, представлена диаграмма временной изменчивости радиационного баланса с 15 мая по 1 ноября. С мая по июль средние значения Q увеличиваются; вместе с тем наблюдается увеличение размаха вариации Q вплоть до $16 \text{ Мдж/м}^2\text{д}$. Показано, что в период существования весеннего фронтального раздела существуют значительные различия притока тепла. В июле отмечается наибольшая пространственная неоднородность Q по акватории Ладожского оз., что определяется сочетанием различных величин приходящей радиации и температурами поверхности воды. С июля по ноябрь средние значения притока тепла плавно уменьшаются (с $18 \text{ Мдж/м}^2\text{д}$ до $1 \text{ Мдж/м}^2\text{д}$).

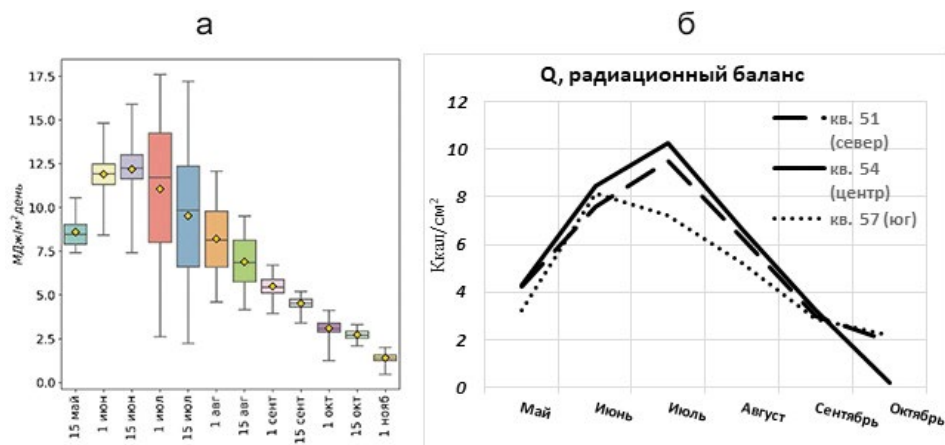


Рис. 7.3.1 – Диаграмма временной изменчивости климатического радиационного баланса с 15 мая по 1 ноября (а) по всей акватории Ладожского оз. Временной ход рассчитанных климатических значений радиационного баланса (б)

На рис. 7.3.1, б, представлен временной ход рассчитанных значений радиационного баланса в северной, центральной и южной части Ладожского оз. С середины мая по июнь отмечается синхронное увеличение значений Q (с 3 до 8 ккал/м²), в июле рост величины в северной и центральной части озера продолжается (до 10 ккал/м²), и Q здесь достигает максимального значения, однако в южной части акватории значение радиационного баланса уменьшается. Далее Q снижается по всей исследуемой области. В целом за исследуемый период (за исключением октября) наибольшая величина Q характерна для центральной части акватории (10,2 ккал/м²), а наименьшая – для южной, при этом максимальное расхождение между центральным и южным регионами отмечается в июле. Следует подчеркнуть, что в октябре значение радиационного баланса в северной и южной частях озера оказывается выше, чем в центральной.

Созданная вычислительная схема компонент радиационного баланса позволяет оценить величины приходящего тепла для Ладожского оз. в период открытой воды по всей акватории на основе климатических данных. Проведен расчет пространственно-временной изменчивости составляющих радиационного баланса. Показана пространственная неоднородность прихода тепла, причем выявлены пространственные различия прихода тепла в прибрежные районы от глубоководных (рис. 7.3.2).

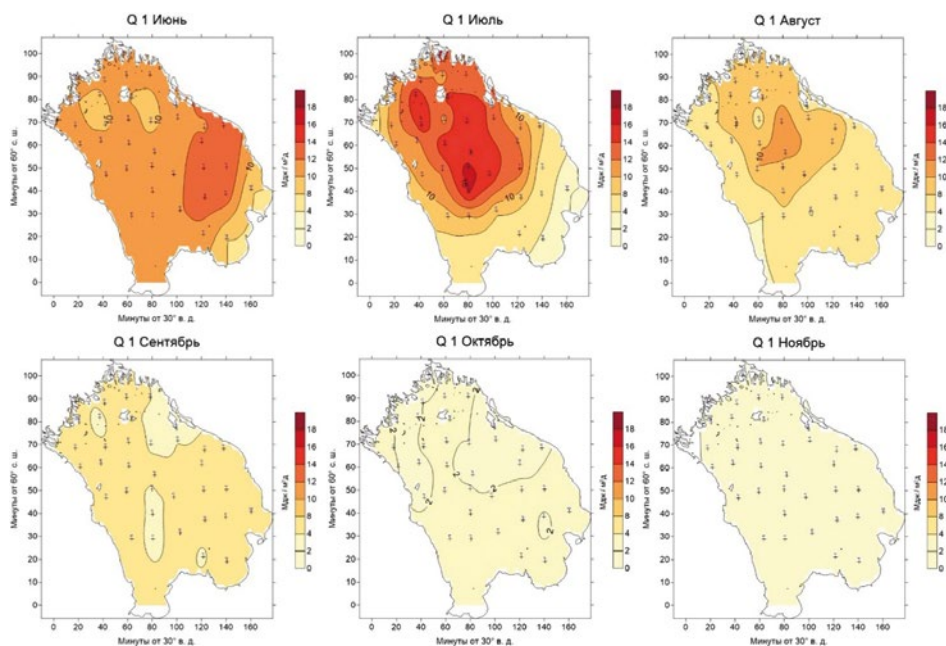


Рис. 7.3.2 – Пространственное распределение климатических значений притока тепла на поверхности Ладожского оз. в период открытой воды (с 1 июня по 1 ноября)

Полученные результаты могут быть использованы в качестве исходных данных для трехмерного термогидродинамического моделирования Ладожского оз., а также служить реперными величинами для исследований кли-

матических изменений. Разработанная схема будет улучшаться внедрением реальных значений количества и типа облачности, альбеда, суточной разности температуры воды, характерных для Ладожского оз.

7.4 Климатические соотношения между температурой воздуха и температурами воды различных лимнических районов Ладожского озера

Климатические изменения проявляются прежде всего в изменениях температуры воздуха. Отмечается, что температура воздуха является основным фактором изменения температуры поверхности озер мира. Оценки показывают, что температура поверхности воды озёр может повыситься на 70–85% от увеличения температуры воздуха [Schmid et al., 2014]. Модельные расчеты для Великих американских озер демонстрируют, что суммарный эффект изменений температуры воздуха и приходящей радиации на температуру поверхности воды в июле составляет от 49,3 до 57,7% [Zhong et al., 2016]. Для оз. Онтарио за 1970–2009 гг. температура воздуха росла быстрее, чем температура поверхности воды зимой и осенью, а весной и летом температура воды увеличивалась с большей скоростью по сравнению с температурой воздуха. Продолжительность летнего стратифицированного сезона увеличилась на 12 дней с начала 1970-х гг. из-за повышения температуры воды. Снижение скорости приземного ветра над оз. Онтарио привело к уменьшению толщины эпимлимниона и усилению летней термической стратификации, что способствовало повышению температуры поверхности воды летом быстрее, чем температуры воздуха [Huang et al., 2012].

Для оценки влияния изменения температуры воздуха приводного слоя воздуха на температуры воды Ладожского оз. были рассмотрены и оценены возможные связи между ними. Были построены графики взаимосвязи температуры воздуха и температуры поверхности воды, а также температуры всей водной толщи для каждой лимнической зоны. Впервые при исследовании годового цикла температур воды Ладожского оз. периодом осреднения была одна декада, это позволило получить наиболее детальную картину изменчивости. Для этого были использованы данные почти за столетний период из базы данных, включающей в настоящее время более 300 000 измерений гидрометеорологических параметров [Гузиватый и др., 1998]. Графики, приведенные на рис. 7.4.1, и демонстрируют наличие двух ветвей: нижней (восходящей), характеризующей период нагревания, и верхней (нисходящей), характеризующей период охлаждения. При одних и тех же температурах воздуха процесс нагревания поверхности воды (или температуры воды всей водной толщи) отличается от процесса охлаждения. Весной вначале поверхность воды нагревается слабо, а летом скорость ее нагрева увеличивается. При летнее-осеннем выхолаживании водной толщи имеет место медленное остывание водной поверхности тогда, как в предзимнее время происходит ускорение уменьшения температуры поверхности значения. Зависимость изменения температуры поверхности воды от температуры воздуха не линейна. Наблюдается явление температурного гистерезиса [Пилипенко, 2019; Pilipenko, Naumenko, 2019; Эдельштейн, 2020]. Из рис. 7.4.1

с очевидностью выявляется тесная связь между температурами воды и температурой воздуха, однако характер связей для каждой из лимнических зон различен. Для прибрежной мелководной зоны соотношения между температурой воздуха и температурой поверхности воды (водной толщи) очень похожи друг на друга, с увеличением глубины зон различия начинают увеличиваться. Наибольшие различия наблюдаются для зоны с глубинами, превышающими 140 м.

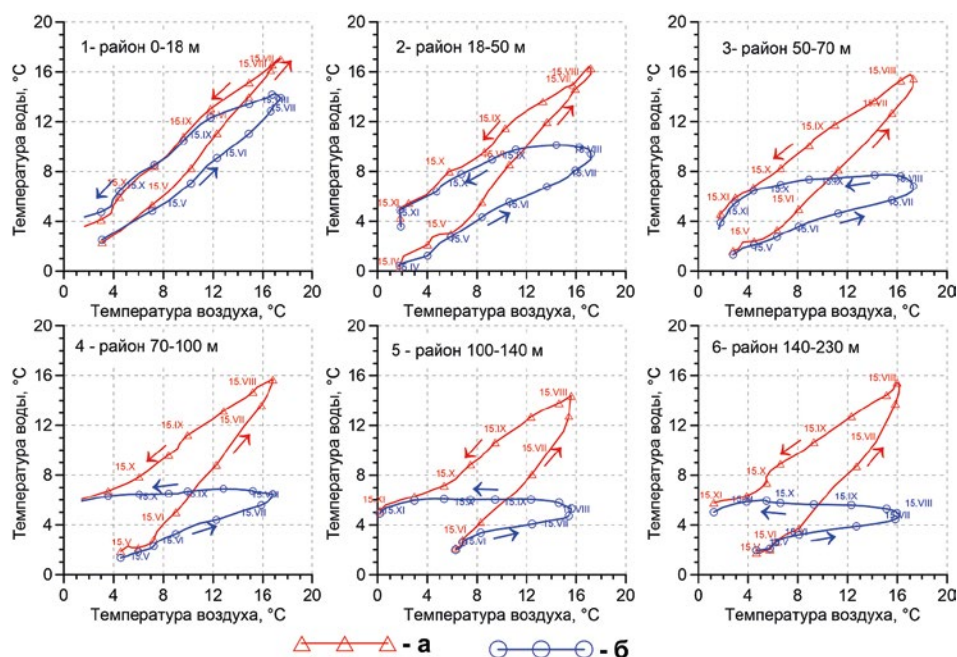


Рис. 7.4.1 – Зависимость между температурой воздуха и температурой поверхности воды (а), температурой воздуха и водной толщи (б) для районов с различными глубинами дна

Темпы роста температуры воды в период нагревания характеризует восходящая ветвь. Очевидно, что скорость роста температуры как поверхности воды, так и водной толщи наибольшая у мелководного прибрежного района с глубинами до 18 м. Мелководный район – самый мобильный с точки зрения изменений температуры воды район. Максимальные среднедекадные температура воздуха и температура поверхности воды (около 17 °C) достигаются практически одновременно в период с 19 по 29 июля. В период охлаждения скорость уменьшения температуры меньше, чем в период роста. С увеличением глубины лимнической зоны дата максимума сдвигается на более поздние даты. Так, в самой глубоководной зоне с глубинами более 140 м максимум температур воды и воздуха возникает в период с 29 июля по 7 августа.

Оценка корреляционных связей для каждой из двух ветвей (нисходящей и восходящей) между температурой воздуха и температурами поверхности воды и водной толщи каждой лимнической зоны показала, что существу-

ют устойчивые значимые связи между ними (коэффициент детерминации превышает 0,9). Это позволило оценить скорости изменения температуры поверхности воды в зависимости от температуры приводного воздуха. Обнаружена зависимость скорости роста (уменьшения) температуры поверхности воды от температуры воздуха. Для мелководного района с глубинами до 18 м с увеличением температуры воздуха на один градус скорость роста температуры воды в диапазоне 4–5 °С составляет 0,8–0,9 градуса, в диапазоне 14–15 °С повышается до 1,1–1,2 градуса. Скорости роста интегральной температуры воды для этой зоны в тех же диапазонах температур равняются 0,5 и 0,8 градуса соответственно. Максимальные скорости охлаждения для мелководного района не превышают 0,7–0,9 градуса на градус температуры воздуха. В силу огромной тепловой инерции температура поверхности воды самого глубоководного района Ладожского оз. при охлаждении уменьшается менее, чем на 0,8 градуса при уменьшении температуры воздуха на градус.

Анализ пространственного распределения температуры поверхности воды всего озера позволил определить четыре важные даты, которые могут служить климатическими нормами:

1) период, когда температура поверхности Ладожского оз. достигает максимума – 29.07–08.08 с температурой воды $16,1 \pm 0,1$ °С и температурой воздуха $16,9$ °С;

2) период максимального теплосодержания всей водной массы озера – 02–12.09 с температурой воды $12,8 \pm 0,1$ °С и температурой воздуха $12,0$ °С;

3) период со 2 по 12 октября, когда поверхность всего озера имеет одинаковую температуру воды $8,8 \pm 0,1$ °С, при средних климатических условиях при отсутствии апвеллингов. В этот период средняя взвешенная температура воздуха над акваторией Ладожского оз. составляет $7,4$ °С;

4) период, когда вся водная масса озера имеет среднюю одинаковую температуру по вертикали, $5,8 \pm 0,2$ °С при средней температуре приводного воздуха $2,9$ °С. Это происходит с 27 октября по 6 ноября при средних климатических условиях. В табл. 7.4.1 приведены климатические параметры, характеризующие различные этапы термического состояния озера, в том числе связанные с весенней фронтальной зоной (ТБ), о которой речь пойдет в следующем разделе.

Можно утверждать, что сезонный характер связей между температурой воздуха приводного слоя и температурами воды в Ладожском оз. может быть представлен корреляционными соотношениями, которые позволяют оценить степень изменения температуры воды при изменении температуры воздуха. Как следует из предыдущего раздела (рис. 7.2.4 и 7.2.5), в мае, июле, августе и сентябре существуют значимые тренды роста температуры воздуха, следствием чего должно явиться повышение температуры поверхности воды и всей водной толщи озера. Сравнение скоростей роста среднемесячных температуры воздуха и температуры поверхности воды Ладожского оз. указывает на преобладание больших по сравнению с температурами воды скоростями роста температуры воздуха в ноябре – декабре. В летние месяцы эти скорости примерно равны друг другу и составляют 0,05–0,07 °С/год [Науменко и др., 2006].

Таблица 7.4.1

**Даты и температуры поверхности воды и воздуха (климатические нормы)
для различных этапов термического состояния Ладожского оз.***

	Дата	$S_{\text{изо}}$	$S_{\text{стр}}$	$Tw_{\text{изо}}$	$Tw_{\text{мин}}$	$Tw_{\text{стр}}$	$Tw_{\text{озера}}$	$Ta_{\text{изо}}$	$Ta_{\text{стр}}$	$Ta_{\text{озера}}$
Возникновение ТБ	26.04	1	0	2	< 1,0	—	2	2	—	2
50% акватории ТБ	31.05	0,5	0,5	2,7	2,0	7,3	4,9	6,3	10,1	8,2
Исчезновение ТБ	10.07	0	1	—	—	12,6	12,6	—	15,0	15,0
Макс темп. поверх.	29.07–08.08	—	—	—	—	—	16,1±0,1	—	—	16,9
Максимальное. теплосодержание	02–12.09	—	—	—	—	—	12,8±0,1	—	—	12,0
Одинаковая темп. поверхности	02–12.10	—	—	—	—	—	8,8 ±0,1	—	—	7,4
Одинаковая температура по вертикали	27.10–6.11	—	—	—	—	—	5,8 ± 0,2	—	—	2,9

*Обозначения: $S_{\text{изо}}$ и $S_{\text{стр}}$ — площади изотермической (доли единицы от общей акватории Ладожского оз.) и стратифицированной области соответственно,
 $Tw_{\text{изо}}$, $Tw_{\text{стр}}$ и $Tw_{\text{озера}}$ — температура поверхности воды изотермической, стратифицированной области и всего озера соответственно.
 $Tw_{\text{мин}}$ — минимальная температура поверхности изотермической области,
 $Ta_{\text{изо}}$, $Ta_{\text{стр}}$ и $Ta_{\text{озера}}$ — температуры воздуха в приводном слое в изотермической, стратифицированной области и всего озера соответственно.

7.5 Особенности климатических соотношений температуры поверхности воды и приводного слоя воздуха в период существования весенней фронтальной зоны

Одна из характерных особенностей термогидродинамики димиктического Ладожского оз. заключается в том, что после таяния льда в весенний период в нем интенсифицируется свободная конвекция, связанная с аномалией плотности пресной воды при температуре 3,98 °С и влияющая на процессы горизонтального и вертикального обмена теплом и массой в водной толще [Филатов, 2019; Бояринов, Петров, 1991]. В годовом термическом цикле Ладожского оз. существуют характерные этапы сезонной изменчивости, например, даты полного замерзания озера, минимального теплосодержания или возникновения устойчивой стратификации, которые могут быть использованы в качестве климатических реперных величин. В связи с неравномерным распределением глубин мелководная часть озера прогревается быстрее районов с большими глубинами, что приводит к ежегодному появлению, развитию и диссипации весенней фронтальной зоны (термобара), которая разделяет устойчиво стратифицированные прибрежные воды от вод глубоководной части озера, где процессы конвективного перемешивания продолжаются [Тихомиров, 1982]. Основным проявлением фронтального раздела на поверхности воды является наличие больших горизонтальных градиентов температуры воды, превышающих средние по озеру в десятки раз, в области 4-градусной изотермы [Науменко, 1989]. Термобар в Ладожском оз. существует в среднем более двух месяцев — с начала мая до начала

июля. Фронтальная зона перемещается в направлении увеличения глубин озера. Эволюция термической фронтальной зоны в крупном димиктическом озере – это возникновение и продвижение вертикальной плотностной стратификации от берегов вглубь озера. Дата исчезновения на поверхности 4-градусной изотермы является датой возникновения первоначальной стратификации всего озера и имеет важное значение как для гидрофизических, так и для гидробиологических процессов, для оценки абиотической составляющей экологического состояния в озере [Rodgers, 1987; Moll et al., 1993; Malm et al., 1994]. Эта дата является климатической характерной величиной (репером) при изучении межгодовых изменений термического состояния крупных димиктических озер.

Определены следующие основные цели исследования, результаты которого представлены в настоящем разделе:

- установление климатических количественных соотношений между температурами поверхности воды (ТПВ), приводного воздуха (на высоте 2 м), площадями стратифицированной (ТПВ > 4 °С и изотермической области (ТПВ < 4 °С в Ладожском оз. в период существования весенней фронтальной зоны,

- оценка климатических величин (норм) температуры поверхности воды и приводного воздуха и даты их возникновения в период существования весенней термической зоны на Ладожском оз., относительно которых следует оценивать межгодовые и климатические вариации.

На основе эмпирических моделей горизонтального распределения температуры поверхности воды и компьютерной батиметрической модели Ладожского оз. создана схема среднемноголетнего положения весенней фронтальной зоны в Ладожском оз. (рис. 7.5.1, а) [Ладожское..., 2002].

Эта схема была использована для установления статистических связей между параметрами температуры поверхности воды, приводного воздуха, площадями стратифицированной и изотермической зон. Для этого были сформированы цифровые массивы среднемноголетних (фоновых) ежесуточных пространственных распределений ТПВ и воздуха в узлах равномерной сетки на акватории Ладожского оз. с дискретностью пять суток, начиная с 15 мая до 15 июля. Пространственный шаг эквидистантной сетки был 5 км, что соответствует 711 точкам на акватории озера. Регрессионный анализ использован для выявления оптимального вида регрессии, оценки коэффициентов детерминации и их значимости для климатических (среднемноголетних) условий в Ладожском оз. При уровне значимости 5% все рассчитанные коэффициенты детерминации по F-критерию оказались достоверными.

На рис. 7.5.1, б, показаны примеры распределения температуры поверхности воды и приводного воздуха в зависимости от распределения глубины дна Ладожского оз. на начало и середину месяцев для периода, когда существует термобар. Очевидно, что температура воды в глубоководной области озера изменяется от 1,5 до 4 °С, именно в этой области идет процесс свободной конвекции, причем площадь этой области в процессе весеннего нагревания со временем уменьшается. Было показано, что при изменении уклона дна скорость движения термического бара изменяется [Науменко,

Каретников, 1998; Науменко и др., 2012], что выражается в неравномерном распределении изохрон на рис. 7.5.1а. Исчезновение термобара происходит в первой декаде июля, это указывает на дату возникновения полной первоначальной стратификации озера [Rodgers, 1987]. Пространственное распределение температуры поверхности воды, так же, как и температуры приводного воздуха, соответствует распределению глубин озера [Науменко, Каретников, 2002; Блохина, Селин, 2019], однако разности температуры воздуха и ТПВ $\Delta T = T_a - T_w$ существенно отличаются в областях с температурой поверхности воды больше и меньше 4°C (рис. 7.5.1, б), что, несомненно, отразится в направленности и интенсивности потоков тепла на границе раздела вода – воздух.

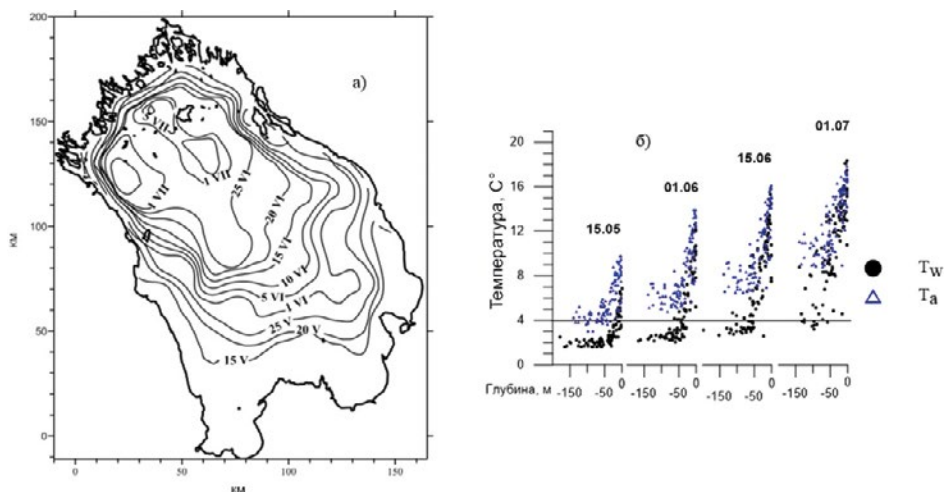


Рис. 7.5.1 – Среднее многолетнее пространственно-временное положение весенней фронтальной зоны (а) и соответствующие распределения температуры поверхности воды (●) и воздуха (Δ) в зависимости от глубины места (б) в Ладожском оз. Показаны только каждая седьмая из 710 точек

Средняя климатическая дата возникновения четырехградусной изотермы у берега – 26 апреля. Принимается, что на эту дату все Ладожское оз. занято квазиизотермической областью и акватория озера имеет температуру поверхности ниже 4°C . Вместе с движением фронтальной зоны изменяется соотношение площадей стратифицированной и квазиизотермической областей. Кривая изменения во времени площади изотермической области $S_{\text{изо}}$ (кривая на рис. 7.5.2, а) (доли единицы от общей акватории Ладожского оз.) соответствует зависимости $S_{\text{изо}} = 0,924 - 0,0152 \cdot D + 2,811 \cdot 10^{-5} \cdot D^2$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,994$. Дата ($D = 0$) отсчитывается от 1 мая. Это нелинейное уравнение позволяет вычислить площадь акватории изотермической области, где идет процесс свободной конвекции, для средних климатических условий (рис. 7.5.2, а) на любую дату в период существования термической фронтальной зоны. Например, в конце мая озеро разделено фронтом практически на равные части, что можно видеть на рис. 7.5.1, а. В первой декаде июля изотермическая зона исчезает.

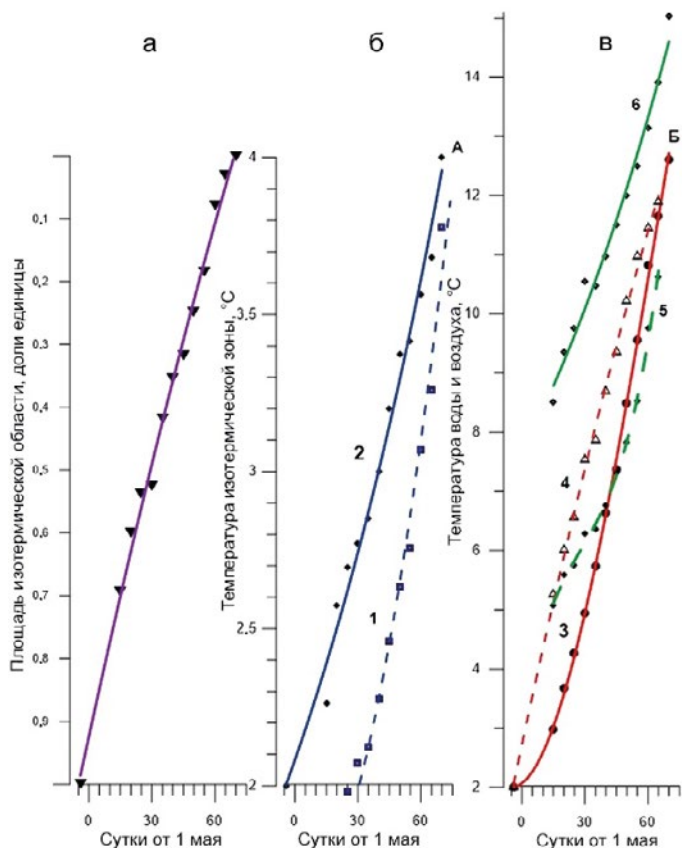


Рис. 7.5.2 – Климатические зависимости между площадью изотермической области ($T_{\text{пов.}} < 4^{\circ}\text{C}$), температурами поверхности воды, приводного воздуха в период существования весенней фронтальной зоны: а) временная зависимость изменения площади изотермической области ($T_{\text{пов.}} < 4^{\circ}\text{C}$); б) 1 – временной ход минимальной температуры воды $T_{w_{\text{мин}}}$; 2 – временной ход средней температуры поверхности изотермической зоны $T_{w_{\text{изо}}}$; в) 3 – временной ход температуры поверхности всего озера $T_{w_{\text{озера}}}$; 4 – временной ход температуры поверхности стратифицированной области $T_{w_{\text{стр}}}$; 5 – временной ход температуры воздуха над изотермической областью $T_{a_{\text{изо}}}$; 6 – временной ход температуры воздуха над стратифицированной областью $T_{a_{\text{стр}}}$

Весенняя минимальная температура поверхности воды в глубоководной части озера в период возникновения термической фронтальной зоны является своеобразным индикатором («памятью») зимнего состояния озера и значением, с которого начинается прогрев после таяния льда и которое во многом определяет дату исчезновения фронта. Весенняя термическая фронтальная зона существует до тех пор, пока минимальная температура поверхности воды в глубоководной изотермической области не достигнет 4°C . Эта важная дата является климатическим репером и указывает время наступления первоначальной полной стратификации Ладожского оз., относительно которого следует вычислять отклонения, связанные с кон-

клетным годом. Кривая 1 на рис. 7.5.2, б, демонстрирует изменения минимальной температуры воды $T_{w_{\min}}$ с начала июня по первую декаду июля. Аппроксимация временного хода этой температуры полиномом третьей степени даёт практически функциональную зависимость.

$$T_{w_{\min}} = 0,55 + 0,095 \cdot D - 0,002 \cdot D^2 + 1,9 \cdot 10^{-5} \cdot D^3, R^2 = 0,994. \quad (7.5.1)$$

Важной особенностью зависимости (7.5.1) является дата исчезновения температуры 4 °С на поверхности Ладожского оз., которая указывает на прекращение процесса свободной конвекции и формирование устойчивой плотностной стратификации (средняя многолетняя дата – 10 июля). Эту же дату подтверждает ход изменения средней температуры поверхности изотермической зоны $\bar{T}_{w_{\text{изо}}}$ (кривая 2, рис. 7.5.2, б).

$$\bar{T}_{w_{\text{изо}}} = \exp(0,0092 \cdot D) \cdot 2,08, R^2 = 0,986. \quad (7.5.2)$$

Полученные зависимости (7.5.1) и (7.5.2) свидетельствуют, что скорости изменения $T_{w_{\min}}$ и $\bar{T}_{w_{\text{изо}}}$ отличаются друг от друга, особенно на начальном этапе существования фронта, но при пересечении в точке А при температуре наибольшей плотности характеризуют одну и ту же дату – дату исчезновения фронта на поверхности озера, что фактически указывает на возникновение первоначальной полной стратификации Ладожского оз.

Имеющиеся данные и обусловленность соотношений между приходом и расходом энергии на поверхности Ладожского оз. позволяют построить зависимости изменения температуры поверхности воды всего озера с момента образования до исчезновения термического фронта на поверхности

$$\bar{T}_{w_{\text{озера}}} = 2,07 + 0,026 \cdot D + 0,0027 \cdot D^2 - 1,31 \cdot 10^{-5} \cdot D^3, R^2 = 0,999. \quad (7.5.3)$$

и температуры поверхности стратифицированной области:

$$\bar{T}_{w_{\text{стр}}} = 2,72 + 0,166 \cdot D - 3,6 \cdot 10^{-4} \cdot D^2, R^2 = 0,998. \quad (7.5.4)$$

В начальный момент в период весенней гомотермии (26 апреля) температура изотермической области ($T_{w_{\text{изо}}}$ – кривая 2) равняется температуре поверхности всего озера ($T_{w_{\text{озера}}}$ – кривая 3), и поверхность стратифицированной области, которая начинает только формироваться, имеет эту же температуру ($T_{w_{\text{стр}}}$) – 2 °С. С указанной даты площадь изотермической области, занимающей всю акваторию озера, начинает уменьшаться (кривая на рис. 7.5.2, а).

Аппроксимация временного хода средней температуры воздуха в приводном слое в изотермической $T_{a_{\text{изо}}}$ (кривая 5, рис. 7.5.2, в) и стратифицированной $T_{a_{\text{стр}}}$ областях (кривая 6, рис. 7.5.2, в) и позволила оценить ее изменения для обеих областей:

$$T_{a_{\text{изо}}} = 3,196 + 0,18 \cdot D - 0,004 \cdot D^2 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot D^3, R^2 = 0,996, \quad (7.5.5)$$

$$T_{астр} = \exp(0,0089 \cdot D) \cdot 7,723, R^2 = 0,983. \quad (7.5.6)$$

С использованием спутниковой инфракрасной информации (например, с пространственным разрешением ~ 1 км (NOAA) или ~ 100 м Landsat-8 (TIRS)) нетрудно оценить площадь Ладожского оз. с температурами ниже 4°C на заданную дату. Далее, применяя эмпирические зависимости между температурой поверхности всего озера $T_{w_{озера}}$ (7.5.7), температурой стратифицированной области $T_{w_{стр}}$ (7.5.8) и температурой изотермической области $T_{w_{изо}}$ (7.5.9) и площадью изотермической области $S_{изо}$ ($T_w < 4^\circ\text{C}$), можно оценить искомые температуры на любую дату периода существования весенней термической зоны (рис. 7.5.3), которые необходимы как для описания влияния абиотических факторов на экосистему озера, так и для верификации термогидродинамических моделей.

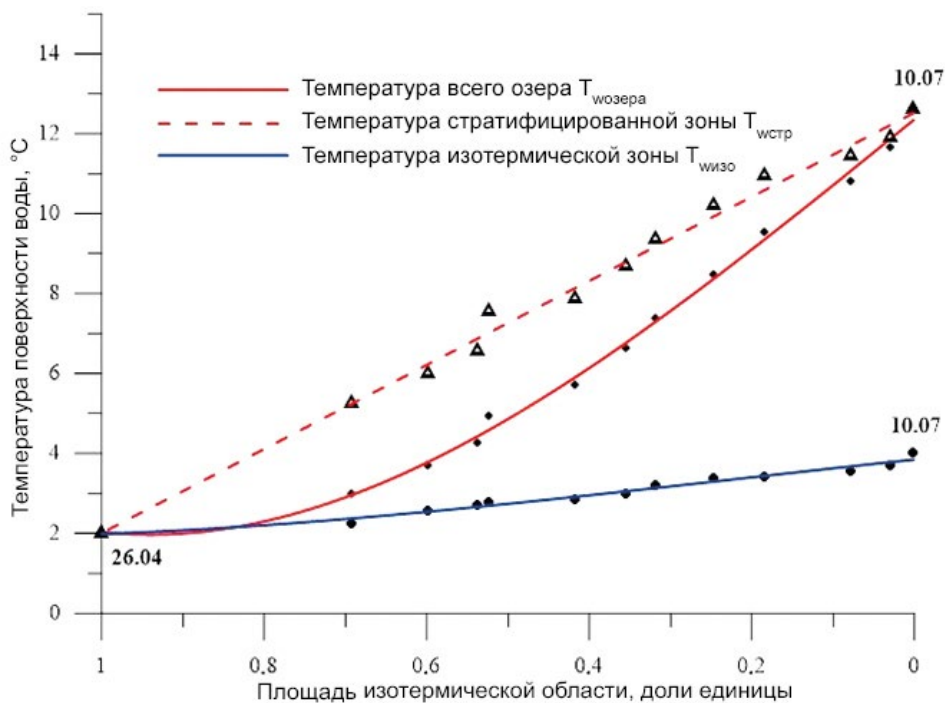


Рис. 7.5.3 – Изменения температуры поверхности Ладожского оз. в зависимости от площади изотермической области

$$T_{w_{озера}} = 12,3595961 - 16,48695024 \cdot S_{изо} - 0,1991046665 \cdot S_{изо}^2 + 6,359025318 \cdot S_{изо}^3, R^2 = 0,99592, \quad (7.5.7)$$

$$T_{w_{стр}} = -10,52170791 \cdot S_{изо} + 12,52732086, R^2 = 0,99135, \quad (7.5.8)$$

$$\bar{T}_{w_{\text{изо}}} = 3,846749088 - 2,132783331 \cdot S_{\text{изо}} - 0,5996176178 \cdot S_{\text{изо}}^2 + 0,08703726442 \cdot S_{\text{изо}}^3, R^2 = 0,978814. \quad (7.5.9)$$

Эти зависимости (7.5.7–9) устанавливают климатические соотношения между площадями и температурами поверхности воды. Зависимость (7.5.9) указывает, что увеличение средней температуры поверхности изотермической области с 26 апреля по 31 мая на 0,7 °С уменьшает её площадь приблизительно на 50%. Исчезновение 4 °С на поверхности, т.е. возникновение полной первоначальной стратификации Ладожского оз., имеет место при нагревании изотермической области с 31 мая по 10 июля ещё на 1,3 °С. На рис. 7.5.3 10 июля исчезает изотермическая область с температурой поверхности меньше 4 °С.

Увеличение средней температуры поверхности стратифицированной области на один градус увеличивает площадь этой области лишь на 9–10%. Как показывает рис. 7.5.2, в, в точке Б при равенстве средней температуры поверхности всего озера (кривая 3) и средней температуры стратифицированной области (кривая 4) 12,6 °С четырехградусная изотерма исчезает с поверхности озера. Эта температура практически соответствует одной и той же горизонтальной координате точек А и Б, что указывает на возникновение полной первоначальной стратификации озера.

Когда акватория озера разделена фронтальным разделом на две равные части, средняя температура воздуха стратифицированной области равняется ~10,1 °С, а изотермической области ~6,3 °С (табл. 7.4.1). В первой декаде июля заканчивается свободная конвекция в глубоководной части озера, температура воздуха приводного слоя стратифицированной и изотермической областей практически сравниваются и достигают ~15 °С. Скорость увеличения температуры поверхности воды стратифицированной зоны $T_{w_{\text{стр}}}$ значительно больше скорости нагревания изотермической области $T_{w_{\text{изо}}}$ (кривые 2 и 4 на рис. 7.5.2), что приводит наряду с изменениями температуры приводного воздуха к различиям в ΔT в мелководной и глубоководной частях озера. Указанные температуры воздуха и воды являются климатической нормой (репером) при изучении климатических вариаций температуры поверхности воды Ладожского оз. в период существования весенней термической зоны. Среднеклиматическая продолжительность весенней фронтальной зоны в Ладожском оз. составляет 75 суток. Рассмотренная схема изменений во времени температуры воды (рис. 7.5.2 и рис. 7.5.3) указывает на достаточно устойчивое соотношение (коэффициенты детерминации более 0,9) между температурами стратифицированной и изотермической областей и их площадями в Ладожском оз.

На рис. 7.5.4, а, приведены температуры поверхности воды с мая по июль в глубоководной части Ладожского оз. за несколько лет, более 270 измерений. При переходе температуры через 4 °С очевидно резкое возрастание температуры поверхности, когда вертикальная термическая стратификация водной толщи становится устойчивой.

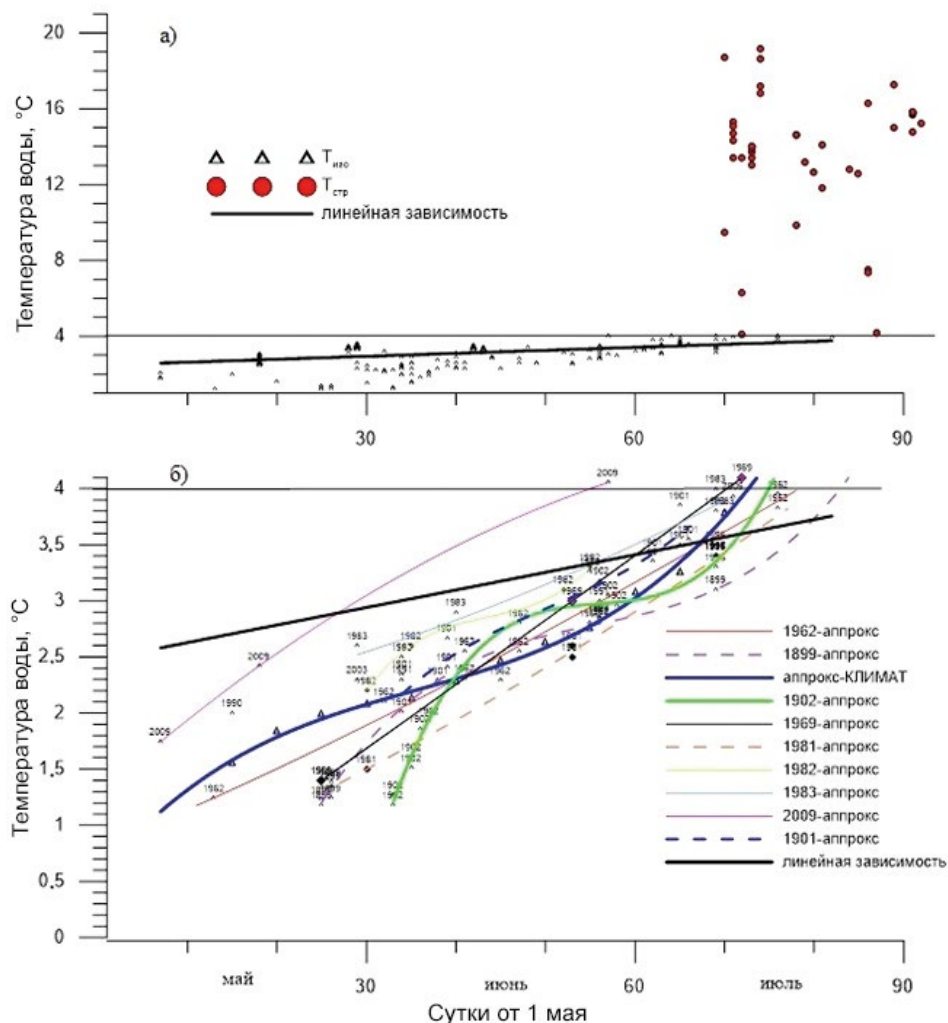


Рис. 7.5.4 – Изменения температуры поверхности воды (ТПВ) в глубоководной части Ладожского оз. на основе данных за 9 лет (а), аппроксимированные полиномиально временные изменения ТПВ для каждого из девяти лет, линейная и полиномиальная регрессия, построенные по всем данным в изотермической области ($T_{\text{пов}} < 4^\circ\text{C}$) в озере (б). Точки пересечения кривых с горизонтальной прямой (4°C) указывают на дату исчезновения фронта на поверхности озера

Используя все доступные данные о ТПВ в диапазоне от минимальной $1,5^\circ\text{C}$ температуры до 4°C , уравнение линейной регрессии даёт оценку скорости роста температуры поверхности в изотермической зоне ($0,015^\circ\text{C}/\text{сутки}$) при небольшой величине объясненной дисперсии (16%). Очевидно, что использование линейного тренда не дает убедительную оценку изменений минимальной температуры воды. Следуя структуре формулы (7.5.1), были аппроксимированы данные для каждого из девяти лет, наиболее обеспеченными майскими измерениями ТПВ (1899, 1902, 1962, 1969, 1981, 1982,

1983, 1989, 2009-й) и показаны возможные временные изменения минимальной температуры поверхности воды, а также «климатическая» кривая, соответствующая зависимости (7.5.1) (рис. 7.5.4, б). Временные вариации даты исчезновения на поверхности воды 4 °С изотермы составляют от одной до четырех недель, это связано с различиями год от года минимальной температуры поверхности озера в глубоководной части озера, ветровой ситуацией, облачностью и, следовательно, интенсивностью прихода тепла в Ладожское оз. Свободный член полинома (7.5.1) характеризует начальное состояние озера, которое «помнит» зимнее состояние озера, т. е. минимальную температуру поверхности озера перед интенсивным весенним прогревом, а коэффициенты полиномиальной регрессии характеризуют скорость изменения температуры в период весеннего нагревания более детально по сравнению с линейной зависимостью. Минимальная температура воды в глубоководной части озера около 1,4–2 °С может держаться до конца мая – начала июня, как это было в 1981 г. Однако весной 2009 г. уже в первой декаде мая температура превышала 1,7 °С (рис. 7.5.4, б), что несомненно повлияло на дату исчезновения 4-градусной изотермы на поверхности озера, что главным образом определяется зимними условиями, т. е. продолжительностью ледового покрытия и степенью ветрового перемешивания после вскрытия озера. Таким образом, возможны существенные отклонения от среднего многолетнего положения фронтального раздела и даты его исчезновения на поверхности воды.

На основе средних многолетних ежедневных распределений температуры поверхности воды Ладожского оз. построены эмпирические зависимости, позволяющие с высокими коэффициентами детерминации установить соотношения между температурой воды, приводного воздуха и площадями стратифицированной и изотермической областями в период существования весенней термической зоны. Полученные эмпирические зависимости (7.5.1–7.5.9) нелинейны и устойчивы в годовом цикле, а отклонения от них могут характеризовать межгодовые и климатические вариации [Fichota et al., 2019; Ullman et al., 1998]. Эти соотношения дают возможность оценить величины, которые могут служить климатическими нормами (реперами) при анализе межгодовой изменчивости термических процессов в период существования весенней фронтальной зоны в Ладожском оз. (табл. 7.4.1).

Зимний режим Ладожского оз. и неравномерность прихода тепла на поверхность озера имеют принципиальное значение для оценки положения фронта в крупном озере. Нелинейное (полиномиальное) изменение температуры поверхности изотермической области в период существования термического фронта (рис. 7.5.4, б) подчеркивает физический смысл изменений, определяемых зимними условиями на начальном этапе, неравномерностью прихода тепла на поверхности в период развития фронтальной зоны и синоптическими условиями, особенно ветровой ситуацией на этапах диссипации фронта [Блохина, 2018; Mason et al., 2016]. В двадцать первом веке исчезновение 4-градусной изотермы на поверхности Ладожского оз. происходит на две-три недели раньше климатической нормы при резком уменьшении ледового покрытия в зимний период.

7.6 Установление связей между характеристиками весенней термической зоны и внешними воздействиями

Как обсуждалось в предыдущем разделе, за последние десятилетия в Ладожском оз. наблюдаются отклонения различных характеристик весенней фронтальной зоны от среднеклиматического распределения. На рис. 7.6.1 приведены межгодовые изменения дат исчезновения 4-градусной изотермы с поверхности озера за последние 40 лет с отрицательным линейным трендом ($0,7$ сут./год) и статистически значимым (95%) коэффициентом детерминации $0,49$. В настоящее время исчезновения термобара происходит чаще всего во второй половине июня, что на две-три недели раньше климатической нормы. Обнаружено более раннее возникновение фронтальной зоны в прибрежной части озера по сравнению с климатической нормой – 26 апреля.

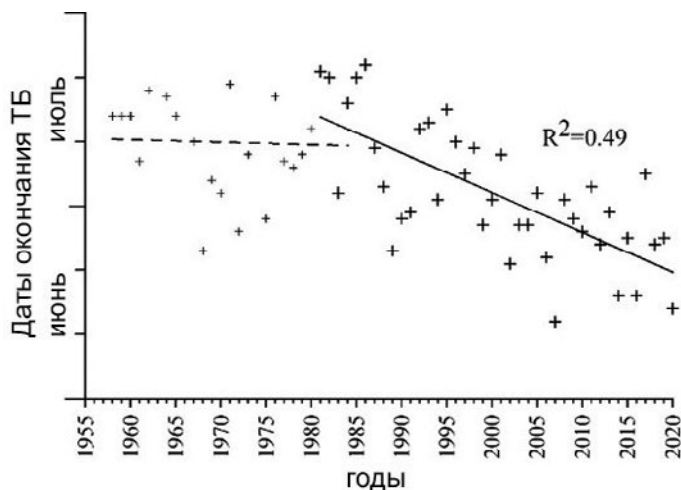


Рис. 7.6.1 – Межгодовая изменчивость дат окончания термобара

А. И. Тихомиров [Тихомиров, 1982] указывал на возможное влияние зимних условий на процесс весеннего прогревания озера, утверждая, что после зимы с полным и длительным ледоставом теплозапас озера к моменту его весеннего нагревания будет выше, чем после зим с коротким и неполным ледоставом. В первом случае продолжительность существования весеннего термического фронта будет меньше среднеклиматической. По данным за последние сорок лет даты начала термобара и продолжительности его существования в озере были соотнесены с характеристикой суровости ледового состояния, относительным индексом ледовитости (RICI) Ладожского оз. (рис. 7.6.2).

Действительно, интегральная величина RICI, характеризующая зимнее состояние озера, на 71% определяет дату возникновения весенней фронтальной зоны в прибрежной части Ладожского оз. Меньшее влияние оказывают другие параметры ледового режима. При средних многолетних ледовых условиях ($RICI=1$) возникновение 4-градусной изотермы в прибрежной

части фиксируется 3 мая. Рис. 7.6.2 указывает, что возникновение фронтальной зоны может быть на две недели раньше среднеклиматических величин при малых $RICI < 0,3$. В табл. 7.6.1 представлены значимые коэффициенты детерминации (95%), определяющие степень связи характеристик весенней фронтальной зоны с зимними условиями.

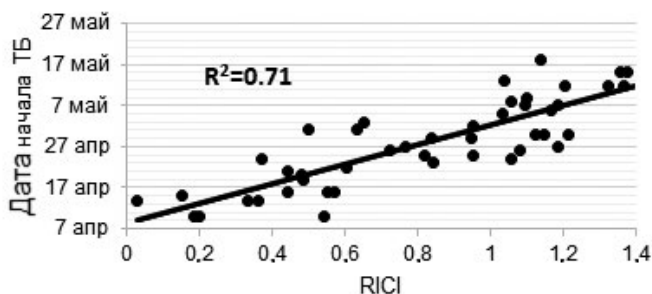


Рис. 7.6.2 – Зависимости дат начала термобара от ледовитости предыдущей зимы

Таблица 7.6.1

Степень связи характеристик весенней фронтальной зоны с зимними условиями

Характеристики ТБ	$RICI$	Прдлж. полного ледостава	Общ. прдлж. льда	Дата 50 % льда при разруш. от 1,10	Дата кон. льда от 1,10
Начало ТБ, дата от 1.03	0,71	0,40	0,44	0,54	0,53
Завершение ТБ, дата от 1.03	0,21	0,12	0,37	0,19	0,38
Прдлж. ТБ	0,15	0,06	0,02	0,08	0,02

* Начало ТБ, дата от 1.03 – дата появления весенней термической зоны (ТБ) в озере. Завершение ТБ, дата от 1.03 – дата исчезновения весенней термической зоны в озере. Прдлж. ТБ – продолжительность существования весенней термической зоны в озере. Общ. прдлж. льда – общая продолжительность ледовых явлений, сут. Начало ΣT^+ , дата от 1.03 – дата устойчивого перехода среднесуточных температур воздуха через 0°C весной. ΣT^+ нач. ТБ – сумма среднесуточных положительных температур воздуха, накопленная на дату появления весенней термической зоны (ТБ) в озере. ΣT^+ кон. ТБ – сумма среднесуточных температур воздуха, накопленная на дату исчезновения весенней термической зоны (ТБ) в озере. ΣT^+ от нач. до кон. ТБ – сумма среднесуточных температур воздуха, накопленная за даты между исчезновением и появлением ТБ. $T_{\text{ср}}$ ТБ – средние температуры воздуха за период существования в озере весеннего фронта.

Очевидно, что зимние условия достаточно сильно влияют на дату возникновения фронтальной зоны и гораздо слабее на дату её исчезновения на поверхности Ладожского оз., практически не влияя на продолжительность существования термобара (коэффициент детерминации 15%). После таяния льда скорость продвижения фронта в глубоководную часть озера во многом зависит от приходящей радиации и ветрового воздействия. В качестве характеристики приходящего на поверхность озера тепла может быть принята сумма положительных температур воздуха на определенные даты (табл. 7.6.2).

Таблица 7.6.2

Степень связи характеристик весенней фронтальной зоны с характеристиками прихода тепла на поверхность озера*

Характеристики ТБ	Начало ΣT^+ , дата от 1.03	ΣT^+ нач. ТБ	ΣT^+ кон. ТБ
Начало ТБ, дата от 1.03	0,36	0,57	-
Завершение ТБ, дата от 1.03	0,15	0,18	0,63
Прдлж. ТБ	0,07	0,18	0,23

Как было показано в предыдущем разделе, за последние 30 лет дата перехода от отрицательных к положительным температура воздуха сместилась с седьмого апреля на 31 марта, и, следовательно, можно ожидать более ранние сроки начала термобара. Дата начала ТБ определяется 36% изменчивости даты перехода к положительным температурам воздуха и 57% изменчивости количества накопленного тепла на эту дату. Дата завершения ТБ практически не зависит от даты возникновения ТБ (коэффициент 0,22). Примерно на 63% дата завершения ТБ определяется суммой положительных температур воздуха ΣT^+ кон. ТБ.

Представляет значительный интерес рассмотреть межгодовую изменчивость величины сумм среднесуточных положительных температур воздуха, накопленных на дату появления весенней термической зоны ΣT^+ нач. ТБ, сумм среднесуточных температур воздуха, накопленных на дату исчезновения весенней термической зоны ΣT^+ кон. ТБ, и продолжительность существования весенней термической зоны (рис. 7.6.3). Очевидно, что термобар может формироваться в мелководной части озера при различных величинах ΣT^+ нач. ТБ, изменяющихся от 10 до 60 градусо-дней, причем модальное значение соответствует диапазону 20–30 градусо-дней. Наиболее вероятная величина ΣT^+ кон. ТБ соответствует диапазону 650–850 градусо-дней. Другой вид имеет гистограмма для продолжительности существования фронта. В Ладожском оз. она двумодальна. Двумодальность указывает на две различные наиболее вероятные продолжительности термического фронта 70–75 суток и более короткую продолжительность, не превышающую 65 суток, что, вероятно, связано с современными климатическими изменениями.

Анализ показывает, что более короткая продолжительность ТБ соответствует более суровым зимам [Тихомиров, 1982]. После зимы с большим индексом ледовитости продолжительность существования термобара в озере может быть меньше в связи с его более поздним возникновением. На основе модели взаимодействия поверхности озера с атмосферой обнаружено два стабильных равновесных сезонных режима: а) с появлением озерного льда зимой и б) без него и с соответствующими холодными и теплыми температурами следующим летом [Sugiyama et al., 2018], все под одинаковым сезонно меняющимся внешним воздействием. Можно утверждать, что в Ладожском оз. также могут быть выделены два соответствующих режима, на которые указывают гистограммы рис. 7.6.3, б, в.

Как показано в [Блохина, 2018] на основе результатов математического моделирования, при определенных гидрометеорологических ситуациях (например, при ветре, направленном от берега) увеличение скорости ветра может усилить интенсивность конвективного вихря в глубинной части водоема

и ослабить в прибрежной, что замедлит скорость распространения термобара к центру водоема, т. е. дата исчезновения ТБ на поверхности воды сдвинется к более поздним срокам. На рис. 7.6.4 показана межгодовая изменчивость средней скорости ветра по м/с Сортавала за период существования фронтального раздела в Ладожском оз. с 1975 г. по настоящее время. Очевиден значимый тренд, указывающий на уменьшение скорости ветра за последние 40 лет почти на 30%. Рис. 7.6.5 подтверждает выводы работы [Блохина, 2018] о замедлении движения фронтального раздела с увеличением скорости ветра, однако величина объясненной дисперсии составляет только 23%.

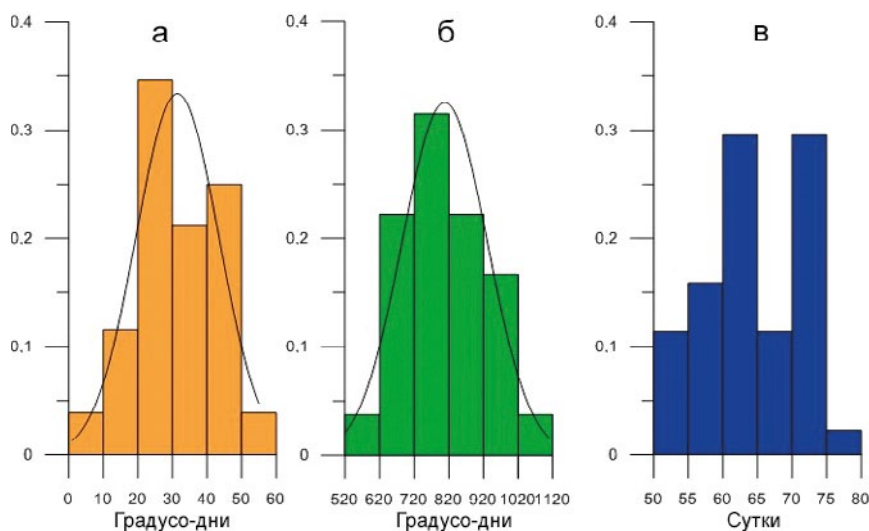


Рис. 7.6.3 – Гистограммы ΣT^+ нач. ТБ (а), ΣT^+ кон. ТБ (б) и продолжительности термобара в Ладожском оз.

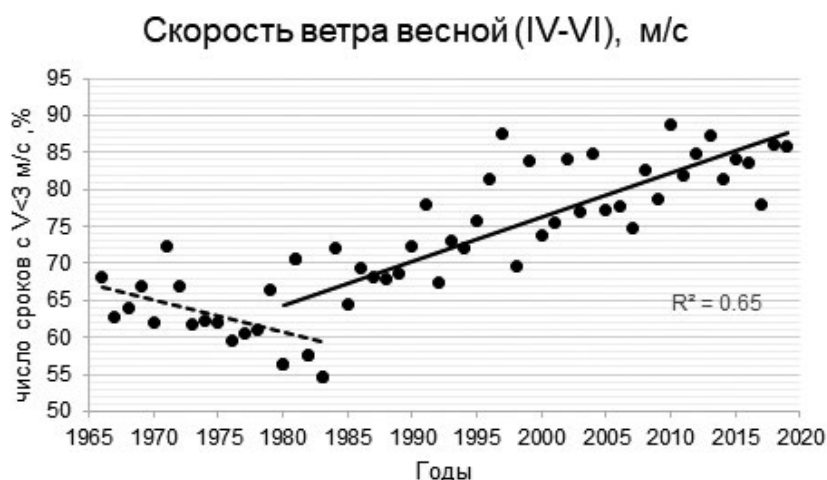


Рис. 7.6.4 – Межгодовая изменчивость числа сроков со штилевыми условиями (ветром < 3 м/с) за период существования термического фронта (апрель – июнь)

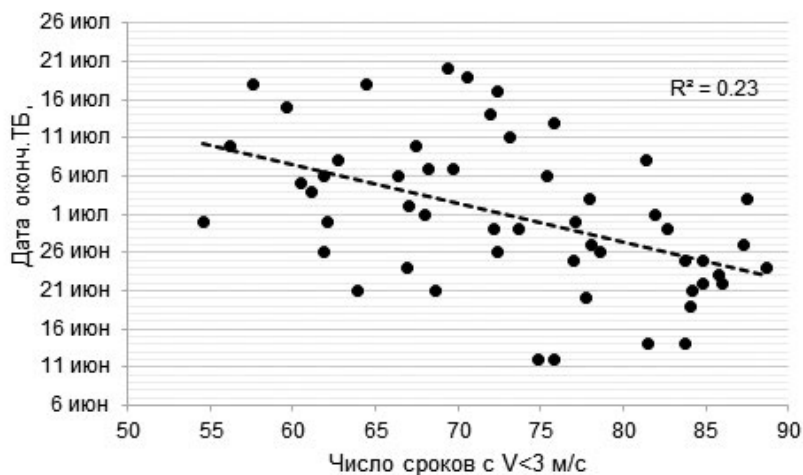


Рис. 7.6.5 – Зависимость даты окончания термобара от числа сроков со штилевыми условиями ($V < 3$ м/с) за период с апреля по июнь

Таким образом, временные характеристики начала, окончания и продолжительности весенней фронтальной зоны в Ладожском оз. зависят как от состояния ледового покрова на начало фронтальной зоны в прибрежной части озера, так и от ветрового режима. На основе более чем сорокалетних дистанционных наблюдений за продвижением весеннего фронтального раздела обосновано наличие двух стабильных равновесных сезонных режимов существования фронтальной зоны: 1) для зим с полным ледоставом и 2) с частичным ледоставом. Установлено более раннее возникновение фронтальной зоны в прибрежной части Ладожского оз. и более раннее исчезновение 4-градусной изотермы в глубоководной части озера. Это связано с уменьшением степени ледовитости Ладожского оз. в начале XXI века, с более ранними датами устойчивого перехода температур воздуха через 0°C и соответствующим увеличением приходящего тепла на поверхность озера, а также уменьшением средней скорости ветра за период существования фронтальной зоны.

7.7 Климатические вариации ледового режима Ладожского озера

Ладожское оз. обычно имеет ледовые образования на поверхности с середины ноября по начало мая. В этот период вертикальное распределение температуры воды способствует возникновению устойчивой плотностной стратификации с более легкой водой с температурой около 0°C у поверхности и придонными водами с температурами, изменяющимися в зависимости от глубины дна, в диапазоне от $0,5$ до $3,5^{\circ}\text{C}$. Зимой ледовое покрытие практически препятствует воздействию ветра на поверхность озера и не позволяет развиваться дрейфовой циркуляции и ветровому перемешиванию. В силу незначительного горизонтального градиента плотности в озере

возникает слабая геострофическая циркуляция циклонического характера [Филатов, 1991]. Динамические явления в озере главным образом связаны с распространением вод, впадающих в озеро притоков. Ледовый режим Ладожского оз. регулирует проникновение тепла и света в водную массу озера, что влияет на биотические процессы подо льдом. Продолжительность и интенсивность ледовых процессов (замерзания и таяния) служат индикатором климатических изменений и могут быть достаточно точно определены с использованием дистанционной информации.

Для анализа изменчивости ледовых характеристик Ладожского оз. создана и постоянно пополняется база данных степени покрытости озера льдом на основе авиационных разведок и данных спутникового зондирования. Методические основы создания базы и обработки космической информации приведены в монографии [Ладога, 2013]. В среднем за каждый зимний период имеется от 9 до 52 оцифрованных изображений ледовой обстановки на Ладожском оз. Повторяемость съемок – 5–6 дней. В базе ледовых данных Ладожского оз. с 1943 по 2018 г. собрано более 1 600 изображений ледовой обстановки с географической привязкой и определением степени покрытости льдом акватории с учетом его сплоченности. На рис. 6.7.1 приведен временной ряд изменений ледовитости озера с 1945 по 2018 г.

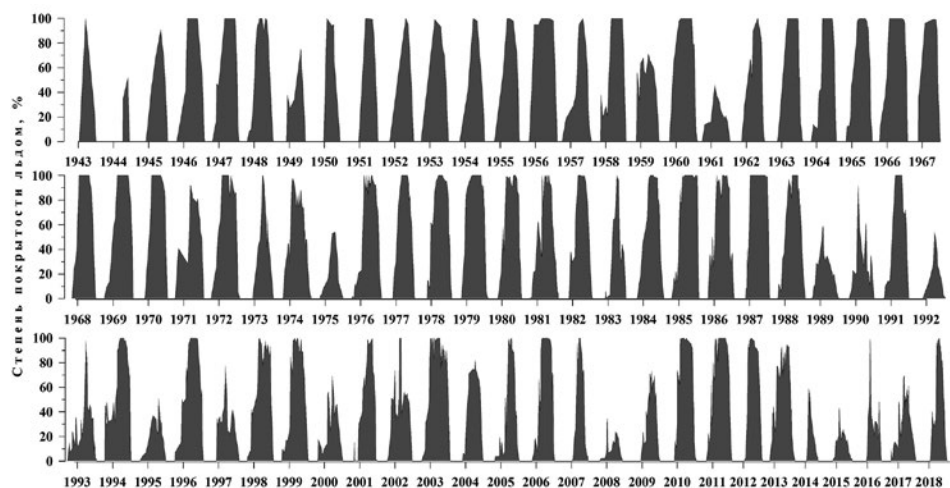


Рис. 7.7.1 – Межгодовые изменения степени покрытости льдом поверхности Ладожского оз.

В качестве интегрального параметра ледового состояния использовался относительный индекс ледовитости RICI [Karetnikov, Naumenko, 2008], безразмерная величина, выражающаяся площадью под кривой сезонного изменения степени покрытости озера льдом, нормированной на аналогичную площадь для средней зимы 1980–1981 гг. Зима 1980–1981 гг. имеет индекс $RICI = 1$. В статье приведена оценка ледовитости (средние, дисперсии, интервалы) Ладожского оз., демонстрирующая значительные вариации в сезонном и межгодовом аспекте. В качестве характеристики суровости ледового режима крупнейшего в Европе озера была выбрана продолжительность полного покрытия озера льдом, которая может изменяться от 1 суток

для мягких зим до 133 суток для экстремально холодных зим. Для детального анализа зимние сезоны были разбиты на шесть категорий в зависимости от продолжительности полного ледостава на акватории озера:

- 1) более 3 месяцев (экстремально холодный зимний период – ЭХ);
- 2) от 2 до 3 месяцев (холодный период – Х);
- 3) от 1 до 2 месяцев (средний зимний период – СР);
- 4) менее одного месяца (мягкий зимний период – М);

Две другие категории характеризуют зимние периоды с неполным ледоставом:

- 5) от 70% и более акватории (теплый – Т);
- 6) менее 70% акватории (экстремально теплый – ЭТ).

В теплые и экстремально теплые зимы озеро не покрывается льдом полностью, максимальная степень покрытости может не превышать 10–40%.

На рис. 7.7.2 показан временной ход нарастающей суммы отрицательных градусо-дней для каждой категории суровости ледового режима, демонстрирующий значительные различия в скорости роста и абсолютных величинах этого параметра. Полное замерзание поверхности Ладожского оз. в экстремально холодную зиму наступает в последней декаде декабря – начале января, с запаздыванием на три декады в холодную зиму и с запаздыванием на полторы декады (в феврале) в зиму со средними характеристиками.

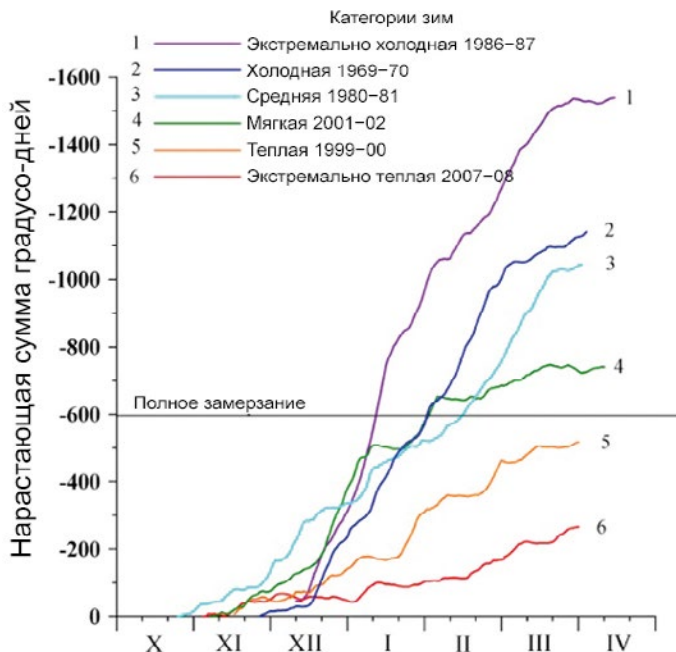


Рис. 7.7.2 – Временной ход нарастающей суммы отрицательных градусо-дней для различных категорий зимнего периода на Ладожском оз.

В отличие от экстремально холодных ($RICI=1,32$), холодных ($RICI=1,06$) и средних зимних периодов ($RICI=0,90$), в мягкие зимы ($RICI=0,69$) наи-

большее количество отрицательных градусо-дней не превышает 870. Озеро в мягкие зимы замерзает полностью только от 1 до 26 дней. Наиболее изменчивы ледовые характеристики для теплых и экстремально теплых зим. Относительный индекс ледовитости изменяется в диапазоне 0,2–0,6, количество отрицательных градусо-дней не превышает 600. Следует заметить, что чем теплее зима, тем меньше толщина ледового покрытия. Лед легко взламывается ветром и даже тает, что осложняет определение степени покрытости акватории льдом дистанционными методами.

Общее усиление (или ослабление) интенсивности циркуляции атмосферы в планетарном масштабе проявляется в региональных особенностях изменения климата и естественной климатической изменчивости, в частности на ледовом режиме Ладожского оз. Региональные факторы – это характеристики атмосферной циркуляции, влияющие на всю европейскую территорию, и определяемые соответствующими индексами. В качестве показателей, характеризующих степень воздействия климата на зимний режим озера, был выбран набор глобальных климатических индексов Северного полушария: NAO (индекс Северо-Атлантического колебания), AO (индекс Арктического колебания), EA (индекс Восточно-Атлантического колебания), EA/WR (индекс колебания между восточной Атлантикой и западной Евразией, известный как «Евразийский-2»), POL (индекс Полярного или Северо-Азиатского колебания) и SCAND (индекс Скандинавского колебания, известный как «Евразийское-1») [<http://www.crc.ncep.noaa.gov>]. Временные вариации этих индексов позволяют дать физическое объяснение изменений ледового состояния Ладожского оз. Для каждой категории ледового периода из временного ряда с 1950 по 2014 г. были рассчитаны суммы каждого из шести используемых индексов атмосферной циркуляции с октября по март (рис. 7.7.3), что позволило выявить диапазоны их изменчивости и определить характерные значения, присущие различным категориям зим.

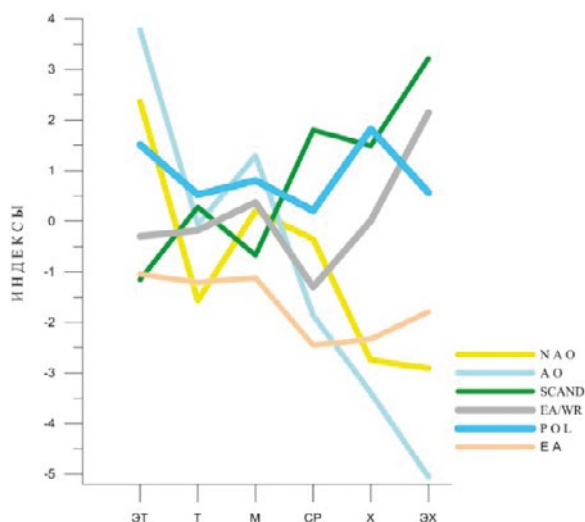


Рис. 7.7.3 – Временной ход различных индексов атмосферной циркуляции для различных типов суровости ледовых условий

Наибольший диапазон изменчивости имеет индекс АО: для экстремально теплых зим индекс имеет максимальное положительное значение, а для экстремально холодных зим – максимальное по абсолютной величине отрицательное значение. Средняя величина индекса АО с октября по март меньше нуля ($-0,88$).

Следующим в ряду по диапазону изменчивости является индекс NAO, который имеет аналогичную предыдущему индексу изменчивость. Положительным значениям соответствуют экстремально теплые зимы, когда Ладожское оз. покрывается льдом не более чем на 70%, экстремально холодные зимы соответствуют наибольшим отрицательным величинам NAO.

Третий по величине диапазона изменчивости от экстремально холодной зимы до экстремально теплой – индекс SCAND, характеризующий атмосферную циркуляцию над Скандинавским полуостровом. При наибольших положительных величинах этого индекса ледовые условия на Ладожском оз. экстремально суровые, при наименьших величинах – зимние сезоны экстремально теплые. Следует заметить, что экстремальные величины индексов необязательно соответствуют экстремальным ледовым условиям, так, например, для индекса EA/WR максимум соответствует экстремально холодным зимам, а минимум – средним по ледовитости условиям.

Два оставшихся индекса POL и EA имеют значительно меньший диапазон изменчивости, чем предыдущих четыре. POL имеет всегда положительные значения, а EA – отрицательные. Вероятно, эти индексы оказывают наименьшее влияние на ледовый режим Ладожского оз. Анализ вариаций шести индексов в зависимости от суровости зимы показал, что наибольший диапазон различий существует между экстремально теплой и экстремально холодной зимой лишь для трех индексов: АО, NAO, SCAND. Кроме того, было показано, что существуют нелинейные связи между индексами атмосферной циркуляции, которые вносят значимый вклад в изменчивость ледового режима Ладожского оз. Более 80 процентов предикторов, имеющих значимые связи с параметрами ледового режима, – это сочетания различных индексов атмосферной циркуляции [Науменко и др., 2014; 2016; 2019].

С точки зрения изменения ледовых условий за период, когда климат не претерпевал значительных изменений (с 1950 по 1980 г.), и декларируемых изменений климата за текущий период с 1981 по 2019 г. был проведен анализ изменений ледового режима Ладожского оз. Продолжительность обоих периодов превышает 30 лет. Оказалось, что за последний период резко увеличилось количество аномально теплых и теплых зим, что убедительно показано на рис. 7.7.4.

Если за период до 1980 г. было отмечено только 6 зим с неполным ледоставом, то за период после 1980 г. таких зим оказалось 13. Впервые за период инструментальных наблюдений практически восемь лет подряд с зимы 2013-го по зиму 2020 г. Ладожское оз. не замерзало полностью. Наименьшая площадь покрытия льдом поверхности озера была 15% в аномально теплую зиму 2020 г. при $RICI = 0,03$. В табл. 7.7.1 приведены годы, отнесенные к различным категориям зимнего режима, для двух периодов до и после 1980 г. На рис. 7.7.5 демонстрируется статистически значимое уменьшение ледовитости озера после 1980 г. Тренд значим при $p < 0,05$.

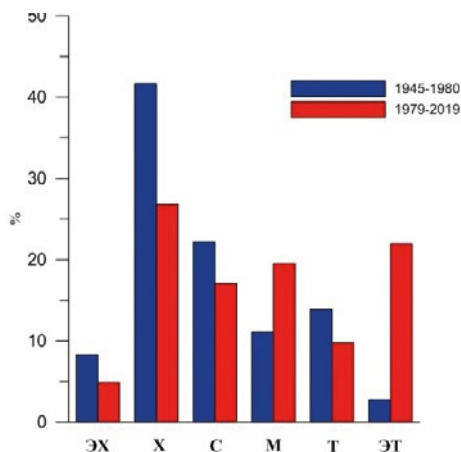


Рис. 7.7.4 – Распределение (в процентах) различных категорий зим для двух периодов – с 1945 по 1980 г. и с 1979 по 2019 г.

Ледовые параметры изменяются год от года неодинаково. Продолжительность 50% покрытия озера ледяным покровом уменьшилась с 108 до 86 суток. Дата достижения 50% покрытия при таянии изменилась с 28 до 12 апреля. Для суждений о возможных климатических воздействиях на ледовый режим Ладожского оз. ряды температур среднемесячных температур воздуха и индексов атмосферной циркуляции были проанализированы на однородность с использованием различных параметрических и непараметрических критериев. Ряды были разбиты на две части: с 1950 по 1980 г. и с 1979 по 2014 г.

Таблица 7.7.1

Типизация зим по продолжительности полного ледостава за период с 1944 г.

	Зимы с полным ледоставом				Зимы с частичным ледоставом, тах %	
Характеристика зимы	экстремально холодная	холодная	средняя	мягкая	теплая	экстремально теплая
Градации, сутки	i	60–89	30–59	J	i	<
Зимы	Период 1945–1980					
	1956	1946	1948	1952	1945	1961
	1960	1947	1950	1962	1949	
	1966	1958	1951	1973	1959	
		1963	1953	1974	1971	
		1964	1954		1975	
		1965	1955			
		1967	1957			
		1968	1977			
		1969				
		1970				

	Зимы с полным ледоставом				Зимы с частичным ледоставом, max %	
Характеристика зимы	экстремально холодная	холодная	средняя	мягкая	теплая	экстремально теплая
Градации, сутки	i	60–89	30–59	J	i	<
Зимы	Период 1945–1980					
		1972				
		1976				
		1978				
		1979				
		1980				
	Период 1979–2019					
	1985	1979	1981	1983	1990	1989
	1987	1980	1982	1993	2004	1992
		1984	1991	1997	2009	1995
		1986	1994	2002	2013	2000
		1988	1999	2005		2008
		1996	2001	2007		2014
		1998	2012	2016		2015
		2003		2018		2017
		2006				2019
		2010				
		2011				
1945–1980	3	15	8	4	5	1
1979–2019	2	11	7	8	4	9

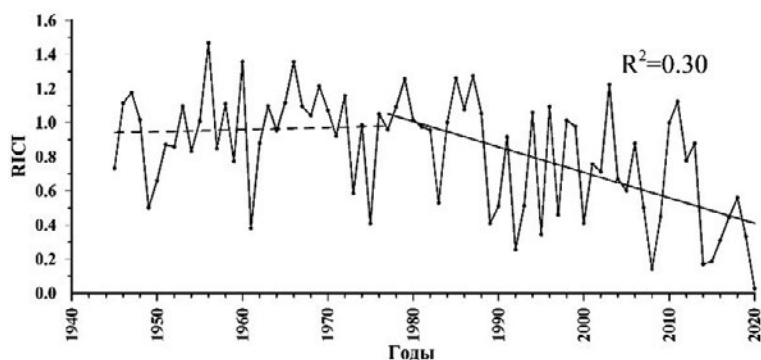


Рис. 7.7.5 – Межгодовая изменчивость индекса ледовитости (RICI)

В октябре произошли значимые изменения четырех из шести выбранных атмосферных индексов рассмотренных периодов: три индекса NAO, EA/WR, SCAND уменьшились, перейдя через 0, а индекс Восточно-Атлантического колебания (EA/WR) уменьшился по абсолютной величине, оставаясь отрицательным. В сезонном аспекте наибольшие изменения про-

изошли в индексе NAO. Во второй период четыре месяца: октябрь, январь, февраль, март – демонстрируют значимые изменения. Как уже было отмечено в предыдущих параграфах, за второй период (с 1980 г. по настоящее время) произошло значимое повышение температуры воздуха в весенние месяцы (март, апрель) и за эти же месяцы в настоящее время произошли значимые увеличения индекса NAO в марте и EA в апреле. Совместный анализ значимых изменений температуры воздуха (март – апрель) и индексов NAO и EA указывает на влияние именно этих индексов на увеличение температуры воздуха в районе Ладожского оз.

Аномально теплая зима 2019–2020 гг. за весь доступный период наблюдений позволила сделать вывод о возможной сумме отрицательных градусо-дней за зимний период (~150) и среднегодовой температуре воздуха (~5,9 °C), при которых весь зимний период Ладожское оз. будет без ледового покрытия. Рис. 7.7.6 демонстрирует значимую эмпирическую зависимость между среднегодовой температурой воздуха, суммой отрицательных градусо-дней (м/с Сортавала) и относительным индексом ледовитости Ладожского оз. Левая зависимость носит диагностический характер и позволяет определить среднегодовую температуру воздуха, при которой Ладожское оз. не будет замерзать (~5,9 °C).

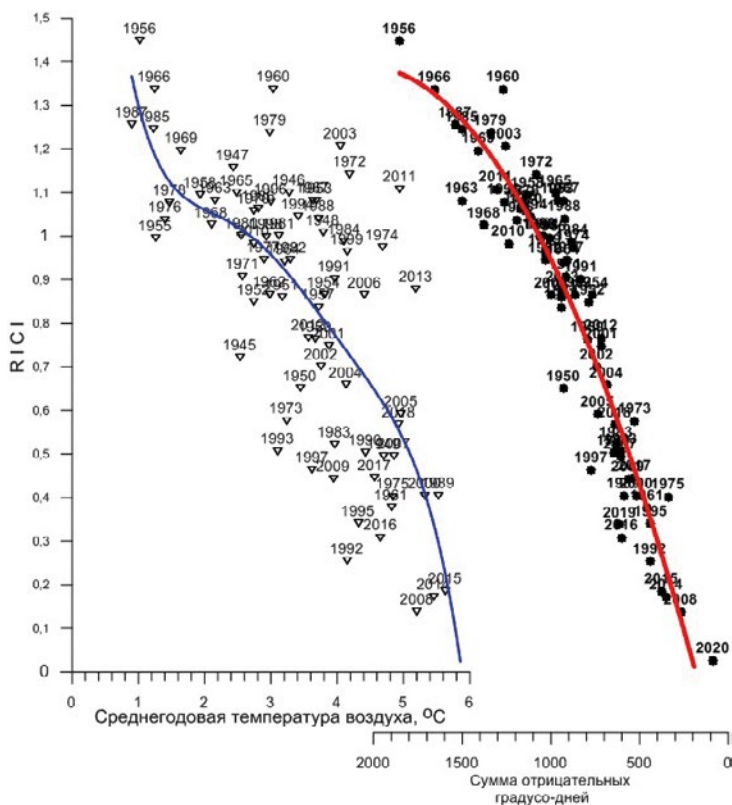


Рис. 7.7.6 – Зависимость между среднегодовой температурой воздуха, суммой отрицательных градусо-дней (м/с Сортавала) и относительным индексом ледовитости Ладожского оз.

В связи с возможным отсутствием льда на поверхности Ладожского оз. в будущие зимы следует подчеркнуть, что это приведет к более раннему началу прогрева озера с увеличением поступления тепла и света в зимний период в водную массу, ветровому перемешиванию при открытой свободной поверхности, более раннему возникновению термической фронтальной зоны, первичной полной стратификации озера и, как следствие, перестройке экосистемы озера. При сохранении незамерзающей поверхности Ладожского оз. от зимы к зиме вероятен переход озера из димиктического типа к мономиктическому [Arvola et al., 2010; Maberly et al., 2020].

Дистанционные методы на первых этапах льдообразования в ноябре – декабре фиксируют наличие областей с переохлажденной водой и внутриводным льдом в южной и юго-восточной частях Ладожском оз. [Мелентьев и др., 2006]. В связи с повышением зимних температур воздуха и воды увеличивается вероятность возникновения переохлажденной воды при резком кратковременном понижении температуры воздуха, что приведет к негативному воздействию внутриводного льда [Бузин, Дьяченко, 2011; Бузин, Горюшкова, 2013] на водозаборы Санкт-Петербурга в р. Неве.

Подводя итоги изложенных в настоящем разделе материалов, можно сделать следующие выводы.

1. Анализ ледового режима Ладожского оз. и выделение различных категорий ледовитости в зависимости от суровости зим показали большие диапазоны изменчивости ледовых характеристик, как с точки зрения метеорологических условий, так и дат наступления и исчезновения различных ледовых явлений.

2. В настоящее время по сравнению с предыдущим периодом увеличилось количество теплых и экстремально теплых лет в районе Ладожского оз., что связано с неоднородностью рядов индексов атмосферной циркуляции и свидетельствует о возможной перестройке атмосферных процессов над Ладожским оз.

3. При установлении корреляционных связей между ледовыми условиями Ладожского оз. и индексами атмосферной циркуляции необходимо учитывать их нелинейные взаимодействия. Более 80% предикторов представлены сочетаниями индексов циркуляции, а не самими индексами.

7.8 Течения на поверхности Ладожского озера на основе последовательных ИК-спутниковых съемок

Течения в крупных озерах определяют процессы тепло и массопереноса различных пространственно-временных масштабов, распределение химических элементов и гидробионтов, а также во многом ответственны за трансформацию и механизмы самоочищения вод. В настоящее время синоптическая и мезомасштабная циркуляция вод крупнейшего в Европе Ладожского оз. недостаточно изучена из-за отсутствия регулярных гидрологических работ. Лишь долговременные измерения течений позволят представить крупномасштабную циркуляцию в озере и дать количественную оценку системы течений, меняющейся в зависимости от сезона и ветровой ситуации. Непосредственные измерения являются необходимыми звеном для верификации

различных моделей, в частности, двух- и трехмерных термогидродинамических моделей крупных озёр [Охлопкова, 1966; Андреев, Воробьева, 1986; Астраханцев и др., 1988; Филатов, 1991]. Однако непосредственные измерения течений в водоемах связаны со значительными затратами и требуют существенных ресурсов.

Одним из перспективных методов оценки системы поверхностных течений в крупных озерах является метод максимальной кросс-корреляции (Maximum Cross Correlation, далее МСС), использующий последовательные ИК спутниковые снимки с интервалом в несколько часов. Появление космических аппаратов, сканирующих поверхность Земли несколько раз в сутки, привело к идее проследить движение воды по последовательным спутниковым снимкам, впервые методика была предложена в 1986 г. [Emery et al., 1986] для анализа течений на поверхности морей и океанов. Метод основан на обнаружении поверхностных потоков, связанных с движением температурных градиентов и получил достаточно широкое распространение [Kelly et al., 1992].

Метод МСС в основном тестировался в открытом океане и в нескольких случаях в небольших бассейнах, таких как Адриатическое море [Notarstefano et al., 2008], Черное море [Afanasyev et al., 2002] и озеро Тахо [Steissberg et al., 2005]. В то же время для применения метода МСС к условиям Ладожского оз., относительно небольшого водоема по сравнению с морскими акваториями, были проведены дополнительные исследования по его адаптации [Гузиватый, Науменко, Румянцев, 2020]. В исследованиях применяется модифицированный метод – нормализованная кросс-корреляция [Lewis, 1995; Naralick, Shapiro, 1992] – показавший хорошие результаты в исследованиях [Gade, 2012]. Вычисления проводились в системах расчетов MatLab, Octave и SeaDAS [SeaDAS].

Метод МСС может использоваться только для отслеживания течений, перемещающихся по нормали к тепловым градиентам, поэтому он не подходит для обнаружения потоков, движущихся вдоль температурных фронтов [Emery, 1986; Zavialov et al., 2002]. Так, в экспериментах [Kelly, 1992] векторы скорости оказывались заниженными по абсолютной величине на 30–60% по отношению к скорости, измеренной непосредственно с помощью дрейфтеров и акустических зондов. Исходными данными для расчетов методом МСС служат серии из нескольких ИК спутниковых изображений акватории Ладожского оз. с пространственным разрешением около километра, полученных сканером MODIS в течение суток. Сканер установлен на спутниках Aqua и Terra [NASA Ocean Color].

Озеро, в силу своего расположения и размеров, достаточно непродолжительные периоды бывает полностью свободно от облачности. Важной предварительной задачей при расчетах течений является выбор пар последовательных космических снимков, пригодных для применения метода. В первую очередь это касается отсутствия облачного покрова или дымки, которые вносят существенные искажения в распределение изотерм поверхностного слоя воды Ладожского оз. Также при выборе пар последовательных космических снимков учитывается время суток, метеорологические условия и разница во времени между снимками в предположении, что за этот временной

период термическая структура озера изменяется только под действием адвективного смещения изотерм. Оценки показывают, что достаточно крупномасштабные изменения термической структуры озера летом могут происходить за небольшой отрезок времени, составляющий несколько часов [Филатов, 1991]. Если над Ладожским оз. в дневное время нет облаков и наблюдается слабый ветер, то происходит интенсивный прогрев верхнего слоя воды, существенно изменяющий его структуру. Наилучшие результаты показывают расчеты, проведенные с использованием снимков, полученных в ночное время или через небольшие промежутки времени, составляющие около 3 часов, на что указывали и исследования на Черном море [Afanasyev et al., 2002].

Размер окна поиска (корреляционного окна) определяется структурными особенностями изучаемого поля течений. Обычно для океанов и морей при расчетах МСС используется квадратное окно 22 на 22 пикселя с шагом смещения в 2 пикселя. Для Ладожского оз. пространственные масштабы температурных неоднородностей составляют 25–50 км [Naumenko, 2006]. Численные эксперименты (рис. 7.8.1) для более чем 40 пар снимков с июня по сентябрь показали, что для каждой пары ИК-изображений размер корреляционного окна должен определяться индивидуально, но не выходя за пределы от 16×16 до 24×24 пикселей [Гузиватый, Наumenко, Румянцев, 2020].

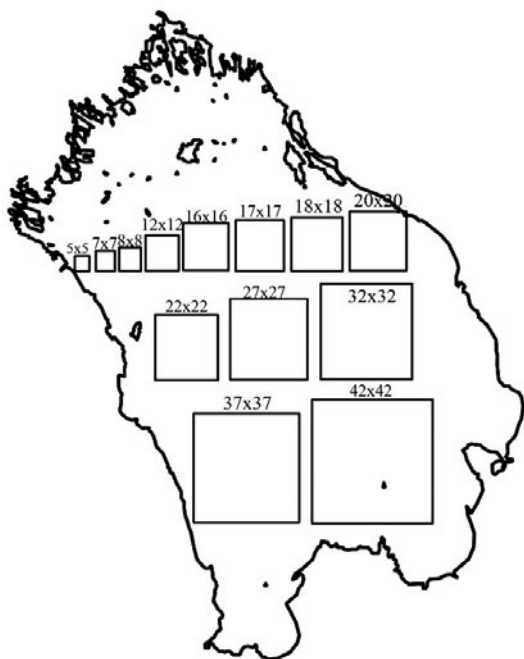


Рис. 7.8.1 – Размеры корреляционных окон относительно акватории Ладожского оз.

Для проверки соответствия скоростей и направлений течений, рассчитанных методом МСС, предложен подход, заключающийся в измерении скорости перемещения маркеров (характерных точек на изотермах) между двумя снимками с последующим расчетом векторов скорости [Алексанин,

2013]. Этот подход был применен для тех же ИК-изображений, что и при определении оптимального размера корреляционного окна. Так, на рис. 7.8.2 у западного берега Ладожского оз. в районе о. Коневец наблюдается обширная область вод с пониженной температурой, образовавшаяся под действием юго-западного ветра. Затоки воды с пониженной температурой начали распространяться и на основную часть акватории Ладожского оз., что проявляется в смещении изотерм. За 7 часов 44 минуты изотермы первого снимка (рис. 7.8.2, а) меняют свое положение примерно на 5 км относительно второго (рис. 7.8.2, б, и 7.8.2, в) при сохранении на этих снимках пространственного подобия изотерм. Происходит перенос поверхностных вод во всей центральной части на юго-восток, т. е. примерно под углом 45° относительно направления ветра. Условной границей, где течения уже не прослеживаются, служит изотерма 16° , после нее до самого берега переноса не наблюдается.

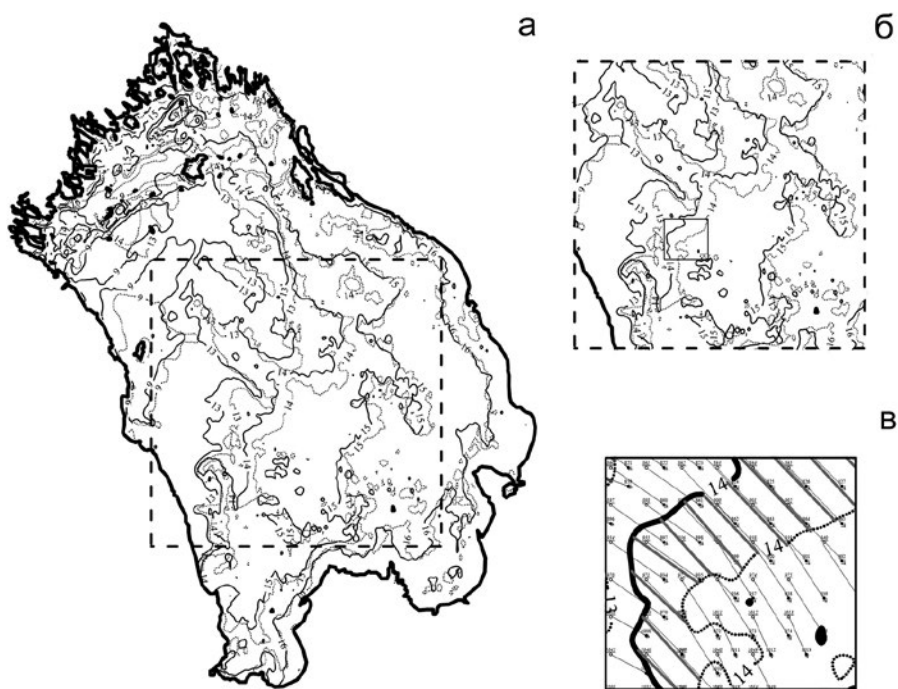


Рис. 7.8.2 – Скорости и направления течений, определенные методом маркеров и МСС между двумя снимками: а) композитное изображение с наложением изотерм на снимках, выполненных 09.09.2009 в 15:16: и 23:00 мин Ладожское оз. и б) увеличенный район, в) район, для которого проводились вычисления. Сплошная линия – изотермы первого снимка, пунктирная – изотермы второго снимка

Сравнение векторов движения выбранных маркеров и результатов расчетов МСС показывает, что примерно 60% направлений между перемещениями маркеров и рассчитанными значениями векторов имеют отклонения не более $\pm 5^\circ$. Из проведенного сравнения можно заключить, что метод МСС даёт реалистичные результаты (см. рис. 7.8.3), адекватно отражающие динамику поверхностного слоя воды.

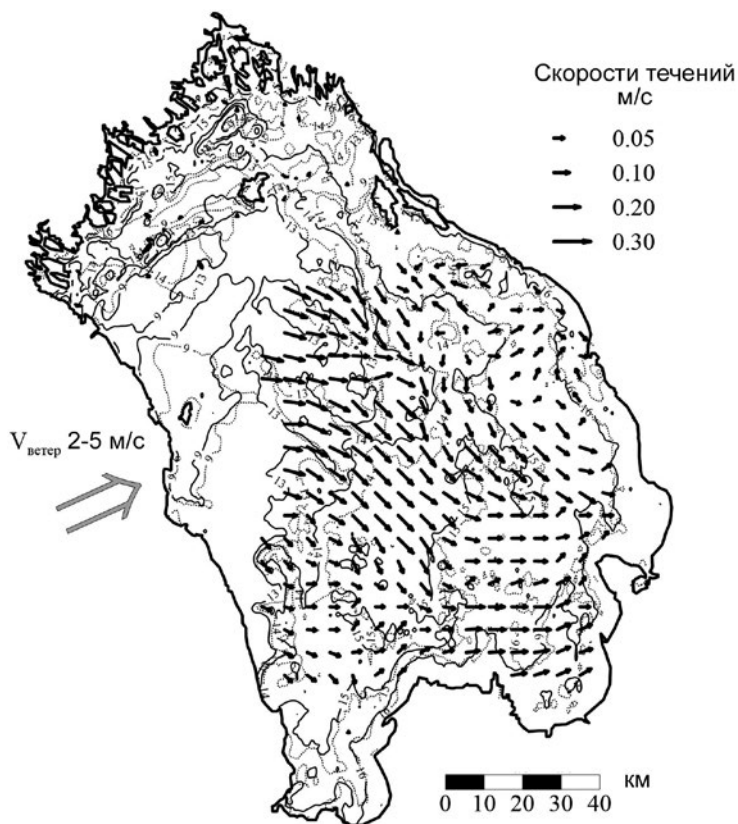


Рис. 7.8.3 – Смещение изотерм и результирующие течения в поверхностном слое озера при воздействии юго-юго-западного ветра

На поверхность Ладожского оз. практически непрерывно воздействуют ветра, поэтому результатом этого воздействия является движение поверхностного слоя воды, причем за счет трения это движение передается более глубоким слоям. Результаты исследований [Боуден, 1988] показывают, что течение на поверхности направлено примерно по ветру, а скорость составляет около 3% от скорости ветра, измеренной на высоте 10 м. Причем его направление и сила для различных районов озера может иметь значительные отличия.

Особенности пространственного распределения поверхностных течений в Ладожском оз. в период открытой воды получены с помощью метода МСС при различных ветровых ситуациях, по их результатам построены схемы переноса поверхностного слоя. Характерным примером может служить рис. 7.8.4. Основой для расчетов послужила пара изображений поверхности Ладожского оз. в ИК диапазоне, полученных со спутника Тегга в 6:54 и 9:163 июля 2010 г. Время между изображениями составляет 2 часа 22 минуты. Данные о ветре, который наблюдался в этот период над Ладожским оз., получены с метеостанции г. Сортавала, о. Валаам, г. Шлиссельбург – юго-западный, 2–5 м/с.

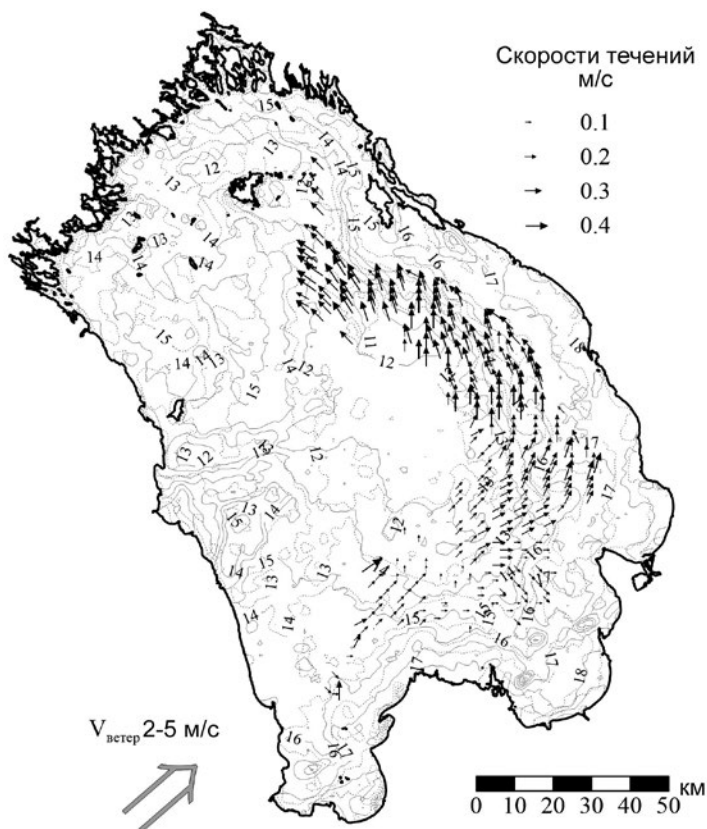


Рис. 7.8.4 – Поверхностные течения, рассчитанные на основании снимков, полученных со спутников серии MODIS 3 июля 2010 г. в 6:54 и 9:16

На рис. 7.8.4 видны зоны повышенной температуры в районе восточного побережья и впадения рек Бурная, Волхов и Свирь и зоны повышенных температурных градиентов, которые проходят вдоль всего южного и восточного берега. Если в центре озера температура примерно равна 11 °С, то на восточном побережье достигает 17–19 °С. Стрелки показывают поле течений, где основные поверхностные потоки проявляются как раз в зоне повышенных градиентов и направлены вдоль восточного побережья. Направление потоков меняется с северо-восточного на северное и далее переходит на северо-запад, прижимая тем самым прибрежные воды, имеющие повышенную температуру, к восточному берегу.

Эволюция термического состояния Ладожского оз., а вместе с ним и перестройка системы течений на поверхности представлена на рис. 7.8.5, 7.8.6 и 7.8.7. Под действием ветра северо-восточных, восточных и юго-восточных направлений 16 августа 2019 г., рис. 7.8.5, а, 7.8.5, б, 7.8.5, в, хорошо прослеживается развитие апвеллинга у северо-восточного берега. К утру 17 августа 2019 г. ветер меняет направление и переходит на южные румбы, вследствие этого заток холодных вод вдоль восточного берега ослабевает (рис. 7.8.5, г, 7.8.5, д, 7.8.5, е).

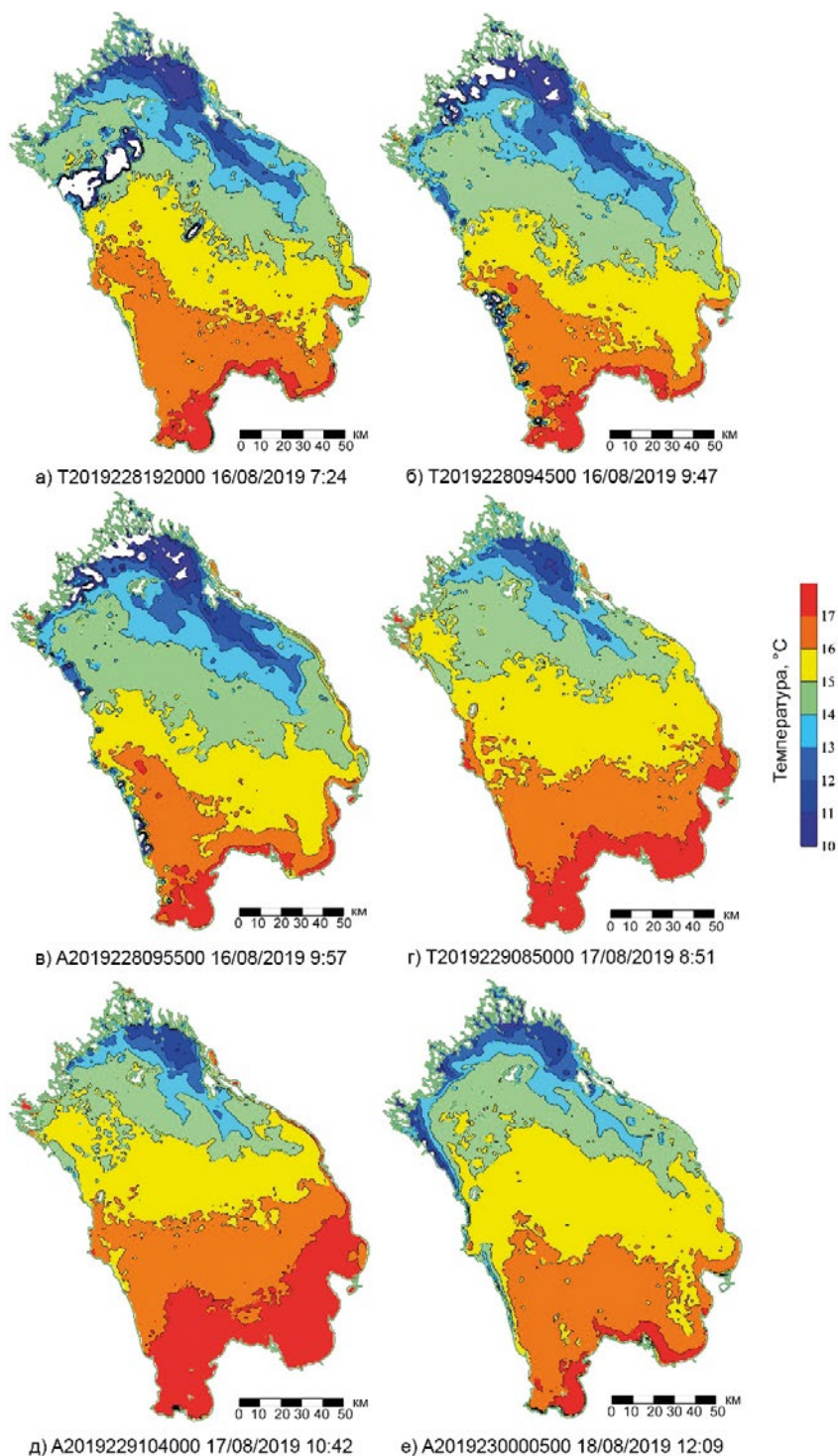


Рис. 7.8.5 – Эволюция термического состояния Ладожского оз. за 2 суток

На рис. 7.8.6 представлены векторы течений для пары снимков а – в рис. 7.8.5, полученных со спутников Terra и Aqua 16 августа 2019 г. в 7 час. 24 мин. и 9 час. 57 мин.

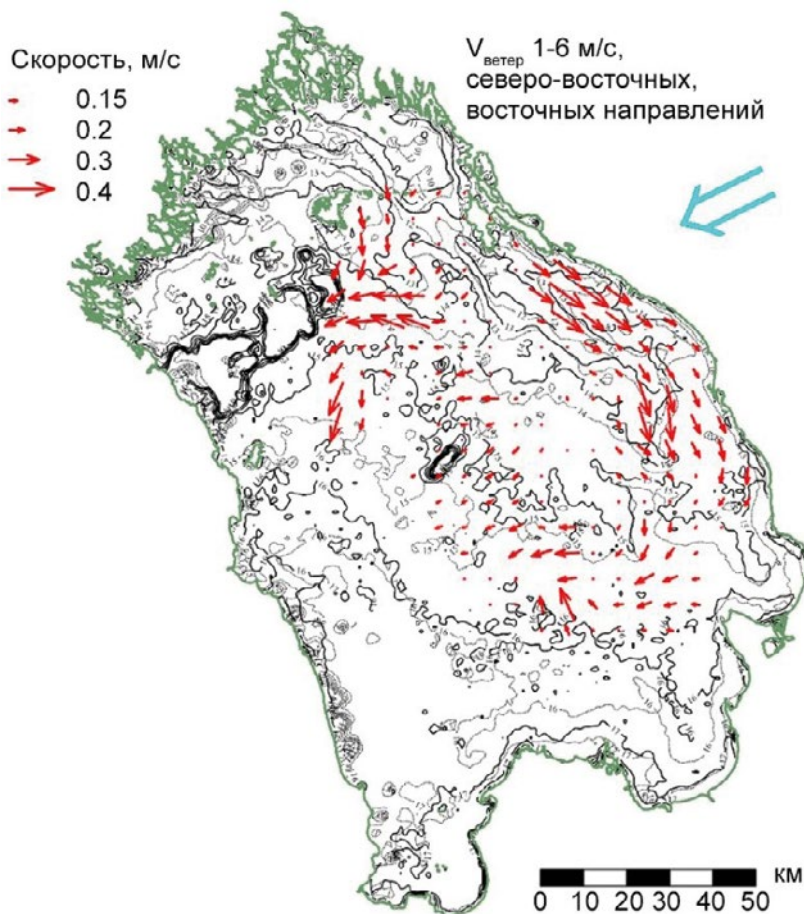


Рис. 7.8.6 – Векторы течений в Ладожском оз. спутников Terra и Aqua 16 августа 2109 г. в 7 час. 24 мин. и 9 час. 57 мин. (снимки а-в, рис. 7.8.5). Сплошная линия – изотермы первого снимка, пунктирная – изотермы второго снимка

К 17 августа ветер с северных, северо-восточных, восточный направлений меняется на ветер западного, юго-западного, южного направлений с преобладанием южных составляющих. В результате этого перестраивается вся система течений, заток более холодных вод с севера на юго-восток (рис. 7.8.5, г, 7.8.5, д, 7.8.5, е) прекращается, и площадь его начинает уменьшаться. Это хорошо показывают векторы течений. Они направлены так же, как и в первом случае вдоль восточного берега, но только в обратную сторону на северо-запад. На широте о. Валаам распадается на локальные циркуляции, охватывающие всю центральную северо-восточную часть Ладожского оз.

На рис. 7.8.7 представлена система течений для пары снимков г – д (рис. 7.8.5), полученных со спутников Terra и Aqua 17 августа 2019 г. в 8 час. 51 мин. и 10 час. 42 мин.

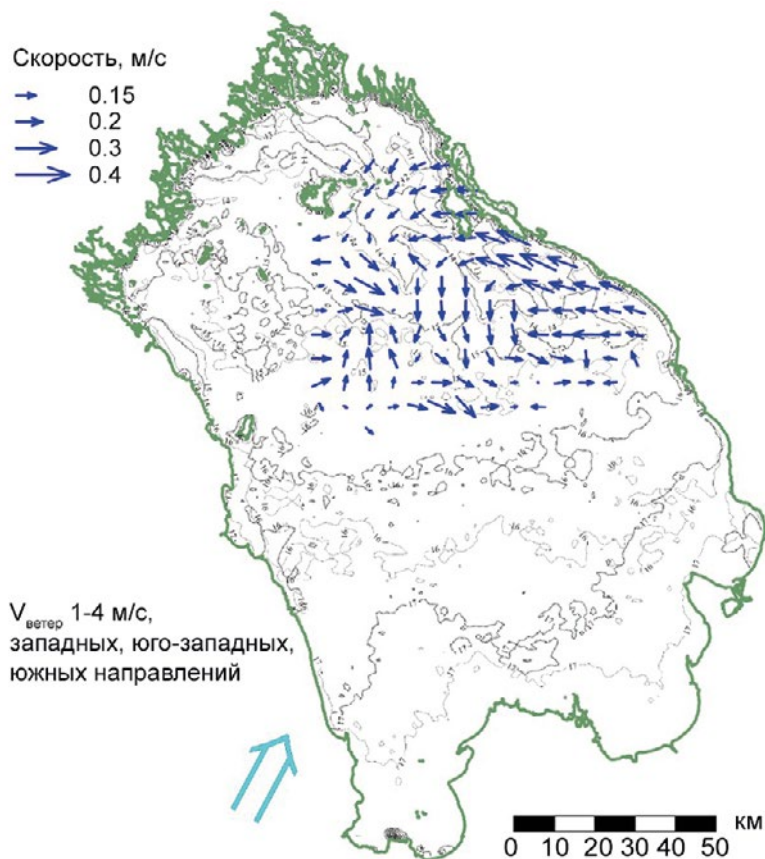


Рис. 7.8.7 – Векторы течений в Ладожском оз. спутников Terra и Aqua 17 августа 2109 г. в 8 час. 51 мин. и 10 час. 42 мин. (снимки г – д, рис. 7.8.5). Сплошная линия – изотермы первого снимка, пунктирная – изотермы второго снимка

Изменение под воздействием ветра юго-западного и западного направлений термического состояния Ладожского оз., а вместе с ним и перестройка системы течений на поверхности представлены на рис. 7.8.8, а, и 7.8.8, б. Для расчетов были использованы 2 пары спутниковых изображения: 1 августа в 19:40 и 2 августа в 5:20 а), 3 августа в 4:25 и 13:50 2012 г. б). Если в начале периода, 1 августа, ветер был северо-западного направления, то к 3 августа он перешел на юго-западный, одновременно система поверхностных течений начала перестраиваться, стал преобладать западный перенос.

Структура течений на поверхности Ладожского оз. в сезонном цикле зависит от поступления тепла от Солнца, градиентов температуры, которые связаны с турбулентным обменом тепла между водой и воздухом. Весенний период характеризуется интенсивным поступлением солнечной радиации

на поверхность Ладожского оз., в апреле возникает термический бар, озеро условно поделено на две зоны – теплую прибрежную и холодную глубоководную с температурой меньше 4°C . Основная система течений, мало зависящая от ветра, направлена вдоль фронтального раздела в зоне взаимодействия холодных и теплых вод. Эту составляющую метод оценить не может [Емегу, 1986], однако колебания фронтального раздела под воздействием ветра метод максимальной кросс-корреляции фиксирует, как это представлено на рис. 7.8.9, а. На рисунке прослеживаются движения потоков по нормали к фронтальному разделу, причем движение изотерм к центральной области согласуется с действием ветра как по скорости, так и по направлению. Основными особенностями весеннего периода является то, что течения при слабых ветрах южных составляющих прослеживаются только в области фронтального раздела, не затрагивая центральную часть озера.

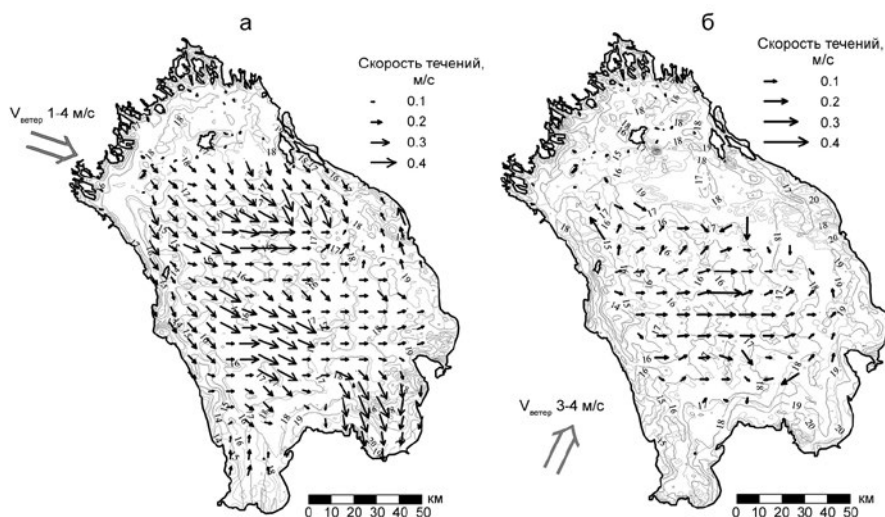


Рис. 7.8.8 – Поверхностные течения, рассчитанные на основании снимков, полученных со спутников: а) 1 августа 2012 г. в 19:40 и 2 августа 2012 г. в 5:20, б) 3 августа 2012 г. в 4:25 и 13:50

На изображениях хорошо видна одна особенность – в центральных районах озера течений не наблюдается. Это связано с тем, что в озере имеется холодное ядро – локальная область высокого давления [Науменко, 2012], входя в которую, слабый ветер или обтекает ее, или теряет свою силу. Причиной отсутствия течений могут быть незначительные температурные градиенты, составляющие $0,2^{\circ}\text{C}$ на 50 км, при которых методом МСС течения не определяются. Если температурные градиенты в центральной области достигают величин от $1,6^{\circ}\text{C}$ и более на 50 км, и весенний термический бар завершился во всей центральной части озера, то наблюдается перенос воды под действием ветра на северо-восток. Оценки показывают, что при западном юго-западном ветре силой 1–2 м/с существует перенос, при котором у восточного берега вода движется со скоростью 0,05 м/с на юг, а у западного на север.

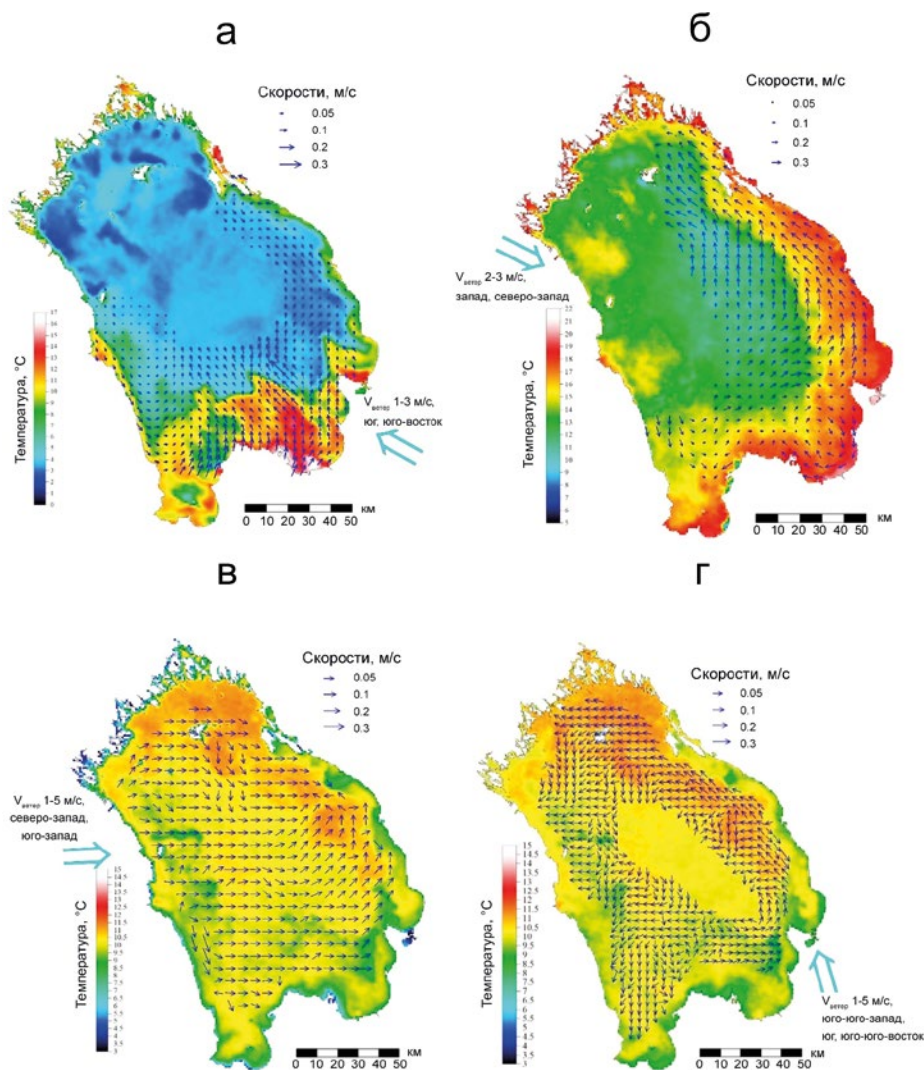


Рис. 7.8.9 – Поверхностные течения, рассчитанные на основании последовательных снимков, полученных со спутников серии MODIS. а) 19 мая 2010 г. в 19:24:52 и 20 мая 2010 г. в 01:06:12, б) 3 июля 2010 г. в 06:54:19 и в 09:16:12, в) 5 октября 2010 г. в 19:06:13 и 6 октября 2010 г. в 00:46:34, г) 6 октября 2010 г. в 23:51:28 и 7 октября 2010 г. в 09:15:50

Летний период характеризуется выравниванием температурных градиентов по всему озеру, хотя прибрежная часть озера по температуре и несколько выше центральной. Летом уже не существует таких градиентов, как в весенний период. Озеро имеет устойчивую стратификацию, и под воздействием ветра движение поверхностного слоя имеет то же направление, что и ветер (рис. 7.8.9, б). Дрейфовые течения охватывают всю южную половину озера под воздействием северо-западного ветра. Выявлено последовательное развитие дрейфовой циркуляции в Ладожском оз. в июне под воз-

действием западного, северо-западного ветра силой 3–4 м/с. Если вначале течения в целом имеют южную составляющую, то далее они приобретают упорядоченное движение в виде циркуляции, охватывающей все озеро. Основные черты летнего периода заключаются в большей роли ветра и, если его воздействие наблюдается в течение нескольких дней, происходит перестройка дрейфовых течений к виду циркуляций.

Осенний период характеризуется уменьшением вертикальной устойчивости, температура с середины августа начинает медленно понижаться, толщина деятельного слоя увеличивается, градиенты на поверхности по сравнению с летом становятся еще меньше, а поверхностный слой имеет температуру около 10 °С. В целом циркуляция (рис. 7.8.9, в) имеет ту же составляющую, что и ветер, воздействующий на поверхность озера. На рис. 7.8.9, г, в центральной части озера течения отсутствуют. Анализ снимков показывает, что градиенты в центральной части составляют в среднем 0,3 °С на 50 км. Как отмечалось ранее, если область поверхности воды однородна и не имеет температурных отличительных признаков для отслеживания, т.е. маркеров в виде изолиний температуры, то метод выявить движения воды на поверхности не может. В осенний период происходит частая смена ветра по направлению и скорости, поэтому в озере не зафиксировано устойчивых циркуляционных потоков.

Применение метода максимальной кросс-корреляции для расчёта поверхностных течений Ладожского оз. показало его перспективность в условиях практического отсутствия прямых измерений. Метод адаптирован для крупного озера и предложены новые процедуры выбора и анализа наиболее информативных космических инфракрасных съёмок для анализа течений. Выявлены наиболее благоприятные условия, параметры, а также ограничения для применения метода максимальной кросс-корреляции для Ладожского оз. Построены системы поверхностных течений для определенных ветровых ситуаций и сезонов. Разработанная методика на основе анализа последовательных спутниковых ИК-съёмок позволяет оценить динамику вод Ладожского оз. и может быть применена для других крупных озёр.

Глава 8. Гидрохимический режим Ладожского озера и его притоков по данным натурных наблюдений: многолетняя динамика и современное состояние

Гидрохимические наблюдения на Ладожском оз. и его притоках проводились Институтом озероведения в 1959–1961 гг. и с 1976 г. по настоящее время [Гидрохимия и гидрооптика Ладожского озера, 1967; Антропогенное эвтрофирование..., 1982; Современное состояние..., 1987; Ладожское озеро..., 1992; Ладожское озеро..., 2002; Расплетина и др., 2006; Ладога, 2013].

Поступление веществ с водосборного бассейна является одним из основных факторов, влияющих на химический состав воды Ладожского оз. Основными источниками поступления веществ с водосбора являются реки. В число обследованных рек входили три главных притока озера – рр. Свирь, Вуокса (в нижнем течении река Бурная) и Волхов, на долю которых приходится более 80% суммарного речного притока в озеро, а их водосборы составляют более 80% площади водосборного бассейна [Соловьева, 1967]. К числу основных притоков с площадями водосборов свыше 2 тыс. км² относятся также рр. Олонка, Оять, Сясь, Паша и Янис. Несмотря на то, что рр. Паша и Оять являются притоками р. Свири и впадают в нее в ее нижнем течении, по особенностям бассейнов и гидрологическому режиму они близки рекам собственного (частного) водосбора озера. Еще три обследованных реки – Тулема, Видлица и Тулокса имеют площади водосборов от 1 до 2 тыс. км². Кроме того, в озеро впадает более двух десятков более мелких рек, среди которых обследовались четыре южных притока – рр. Морье, Авлога, Лава и Назия, подверженные значительному антропогенному воздействию [Расплетина и др., 2006].

Химический состав речных вод Ладожского бассейна, с одной стороны, определяется общими климатическими условиями, с другой стороны, имеет существенные различия по условиям формирования. Так, южная часть бассейна отличается от северной геоморфологическим строением, составом слагающих пород, объемом и составом подземной составляющей стока, озерностью и заболоченностью отдельных частей бассейна, интенсивностью биохимических процессов выветривания пород и минерализации органического вещества. Наблюдается неоднородность химического состава речных вод в пределах бассейна – как правило, поступательный рост значений гидрохимических показателей при движении с севера на юг. Вода зарегулированных притоков (рр. Свири, Бурной, Вуоксы, Яниса и, в значительно меньшей степени, Волхова) характеризуется наименьшей изменчивостью гидрохимических показателей. Почти вся площадь водосборов этих рек, за исключением Волхова, расположена в пределах распространения пород Балтийского кристаллического щита. Река Свирь по условиям питания – типично озерная река, помимо Онежского оз., ее бассейн включает много мелких озер. Сток реки зарегулирован плотинами двух ГЭС. По строению бассейна и ландшафтным условиям питания р. Бурная имеет много

общего с р. Свирью. Хозяйственная деятельность человека внесла значительные нарушения в естественный гидрохимический режим рек, поэтому вынос химических веществ в озеро с водой рек является интегральным показателем природных условий и хозяйственной деятельности на водосборе.

Химический состав воды в истоке р. Невы в целом определяется гидрохимическим режимом Ладожского оз. и в основном соответствует составу основной водной массы озера. Влияние местных условий, сформировавшихся в бухте Петрокрепость, ведет в отдельных случаях к увеличению значений некоторых химических показателей.

Помимо поступления веществ с водосбора, важнейшими факторами, влияющими на химический состав воды Ладожского оз. и его гидрохимический режим, являются морфометрические характеристики озера, происходящие в нем гидрологические процессы, характер функционирования озерной биоты. Ярко выраженная неоднородность морфометрии озерной котловины является важнейшим фактором, определяющим неоднородность протекания лимнических процессов в разных частях акватории. В связи с этим на основе морфометрических характеристик и с учетом особенностей протекания внутриводоемных процессов выделены четыре лимнические зоны озера [Гусаков, Тержевик, 1992], представленные на рис. 8.1. Каждая из зон играет особую роль в функционировании экосистемы в целом. Мелководная прибрежная зона с глубинами до 15 м максимально подвержена влиянию процессов на водосборе, в том числе прямому антропогенному воздействию. Сюда поступают воды притоков, сточные воды предприятий, поверхностно-склоновый сток и др. Весной и осенью фронт термического бара и характер крупномасштабного переноса в пределах зоны препятствуют свободному водообмену с глубоководной частью озера.

Для деклинальной зоны с глубинами 15–52 м весной характерно существование устойчивого, ярко выраженного фронта термического бара. В области прогретых вод, между фронтом термобара и берегом происходят интенсивные биологические процессы, что приводит к созданию большого количества органического вещества за счет высокой продуктивности весеннего фитопланктона. При прохождении фронта термобара за счет нисходящих движений воды происходит вовлечение аллохтонного и автохтонного органического вещества с поверхностных горизонтов в придонные. Деклиналная зона является местом первоначального накопления и минерализации органического вещества в гипolimнионе. Здесь при минимальной емкости гипolimниона оказывается сосредоточена значительная доля органического вещества. Именно здесь может в первую очередь возникать заметное снижение содержания кислорода в придонном горизонте, затраченного на деструкционные процессы.

Глубоководные зоны – профундальная (глубины 52–89 м) и ультрапрофундальная (глубже 89 м) – представляют собой основную водную массу озера, самую консервативную его область. Их объем составляет около 80% объема озера, вследствие чего концентрации химических веществ в воде этих зон определяют гидрохимические характеристики и трофический статус всего озера. Изменение лимнических характеристик этой водной массы может привести к необратимой деградации экосистемы озера.

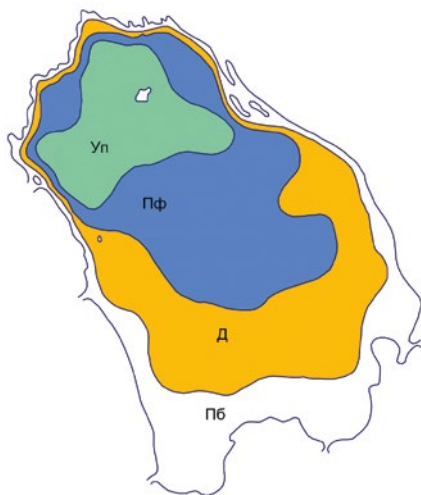


Рис. 8.1 – Схема расположения лимнических зон Ладожского оз.: Пб – прибрежная, Д – деклиная, Пф – профундальная, Уп – ультрапрофундальная

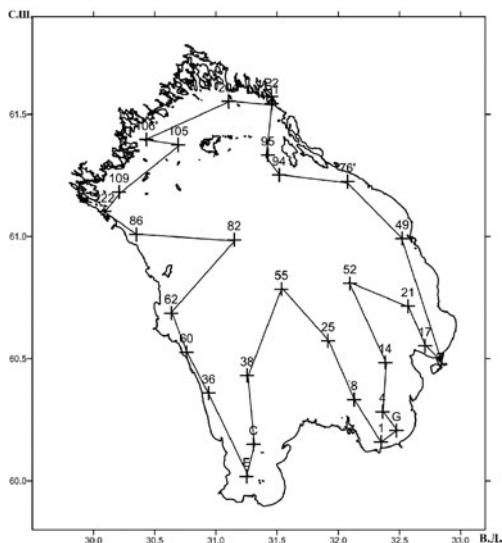


Рис. 8.2 – Расположение станций регулярных наблюдений, выполняемых ИНОЗ РАН на акватории Ладожского оз.

С позиции продукционно-деструкционных соотношений в экосистеме две мелководные зоны и летний эпилимнион глубоководных зон представляют собой преимущественно трофогенную, а озерный гипolimнион – трофолитическую области озерной водной массы. Преобладание трофолитической области над трофогенной определяет доминирование процессов минерализации органического вещества в экосистеме над его накоплением. Представленное лимническое районирование достаточно адекватно отражает основные характерные особенности гидрохимических и гидробиологических процессов в озере, поэтому часто используется при анализе результатов натурных исследований ИНОЗ РАН.

Основная программа ежегодных работ на акватории Ладоги в последнее десятилетие выполнялась на сети станций, схема которых представлена на рис. 8.2. Кроме этого, ежегодно организовывались специальные рейсы с целью изучения литоральной зоны озера (рис. 8.3).

Оценка многолетних изменений гидрохимического режима Ладожского оз. проводилась на основе наблюдения за пространственно-временными изменениями основных гидрохимических показателей. В период открытой воды исследования проводились с борта научно-исследовательского судна в сроки, по возможности приуроченные к гидрологическим сезонам. Весной – с конца мая до середины июня, когда озеро находится в условиях устойчивого разделения термобаром на теплоактивную и теплоинертную области примерно по глубине 50 м. Летом – с конца июля до начала сентября, в период устойчивой стратификации и четкого разделения водной массы на эпилимнион и гипolimнион. Осенью – в октябре, в период устойчивого охлаждения поверхности воды и углубления слоя скачка. Пробы воды

отбирались по стандартной схеме станций, расположенных практически по всей открытой части акватории, на стандартных горизонтах с глубинами (в зависимости от глубины станции) 0,3, 10, 25, 50, 100, 150 м и в придонном горизонте. Средние для озера значения показателей рассчитывались как средневзвешенные с учетом объемов, описанных выше лимнических зон. Схемы пространственного распределения гидрохимических показателей построены с использованием средневзвешенных по глубине значений для каждой станции.

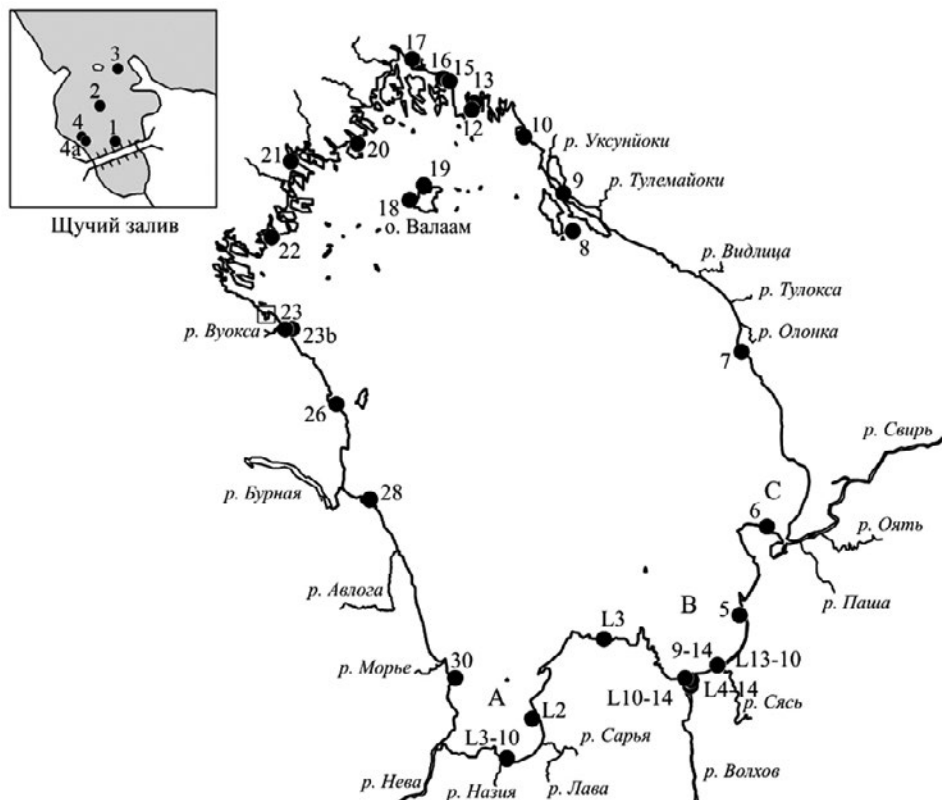


Рис. 8.3 – Схема расположения станций регулярных наблюдений при изучении литоральной зоны озера. Южные заливы озера: А – Бухта Петрокрепость, В – Волховская губа, С – Сви́рская губа; Щучий залив (1 – у дамбы, 2 – в центре, 3 – на выходе из залива, 4 – литораль заросли, 4а – открытая песчаная литораль)

8.1 Основной ионный состав воды и электропроводность

Ладожское оз. характеризуется низкой минерализацией. Основными факторами, определяющими ее величину и особенности формирования основного ионного состава воды озера, являются климатические условия водосборного бассейна, обеспечивающие хорошую промытость почв и грунтов, его геологическое строение и состав слагающих его пород. В период наблюдений 1960–2010 гг. среднее по озеру значение суммы главных ионов (Σ) варьировало от 55 до 72 мг/л [Сусарева, 2013].

Основная роль в формировании химического состава воды озера принадлежит речному стоку, поэтому минерализация озера в основном зависит от минерализации воды трех главных притоков озера – рек Свири, Бурной и Волхова, объем водного стока которых в сумме дает около 80% речного притока в озеро. В табл. 8.1.1 приведены среднегодовые значения суммы главных ионов в воде трех основных притоков Ладожского оз. по данным первой половины 60-х гг. прошлого века и за период открытой воды в 2011–2019 гг. Как видно из таблицы, в настоящее время значения Σ и повышены по сравнению с предыдущими годами. В истоке р. Невы сумма главных ионов в 1995–2000 гг. варьировала пределах 57,4–78,5 мг/л, в 2004–2005 гг. – 63,6–72,5 мг/л [Расплетина, 2006]. В 2011–2019 гг. в период открытой воды (Σ и) изменялась от 54 до 81 мг/л, т.е. расширился диапазон концентраций, при этом возросли максимальные значения.

Таблица 8.1.1

Средние значения суммы главных ионов в воде основных притоков в 60-е гг. прошлого века (среднегодовые значения) и в период 2011–2019 гг. (средние значения для периода открытой воды), мг/л

Река	Сумма главных ионов, мг/л	
	1960-е гг. [Соловьева, 1967]	2011–2019 гг.
Волхов	121,4	160,2
Свирь	37,3	41,0
Бурная	27,3	41,5

Содержание суммы главных ионов в воде притоков Ладожского оз. возрастает с севера на юг от 25–40 до 200–300 мг/л, при этом повышенные значения обычно наблюдаются в межень [Расплетина, 2006]. Менее минерализованные воды характерны для рек, водосборы которых сложены кристаллическими породами Балтийского щита, перекрытыми толщей четвертичных отложений небольшой мощности. К этим рекам относятся два главных притока – рр. Свирь и Вуокса (включая южный рукав р. Вуоксы – р. Бурную), реки северного, северо-восточного и восточного побережья: Янис, Тулема, Видлица, Тулокса и Олонка. Для большей части этих притоков значение суммы главных ионов не превышает 50–60 мг/л. Более высокая минерализация свойственна воде рек юго-восточного и южного побережья, водосборы которых сложены осадочными породами – это реки Волхов, Паша, Оять, Сясь и Авлога.

Косвенной характеристикой величины минерализации является электропроводность воды. В табл. 8.1.2 приведены диапазоны электропроводности воды притоков Ладожского оз. и р. Невы в истоке за период 2011–2019 гг. В наименьшей степени сезонным колебаниям подвержены значения электропроводности зарегулированных рек – Свири, Яниса, Вуоксы и Бурной.

Таблица 8.1.2

**Пределы изменения и средние значения электропроводности воды притоков
Ладожского оз. и р. Невы в истоке в разные сезоны 2011–2019 гг., мкСм/см**

Река	Май	Июнь – август	Сентябрь – октябрь
Волхов	139–295 (203)	165–346 (230)	167–345 (244)
Свирь	33–63 (54)	56–80 (65)	55–74 (66)
Бурная	61–77 (70)	67–96 (76)	63–78 (71)
Вуокса	57–71 (64)	60–85 (68)	59–73 (65)
Янис	18–42 (35)	36–53 (40)	23–44 (38)
Тулема	24–32 (28)	31–47 (40)	23–41 (33)
Видлица	32–51 (41)	40–58 (52)	38–54 (48)
Тулокса	21–39 (30)	32–57 (47)	30–5 (42)
Олонка	31–390 (88)	38–93 (70)	46–101 (70)
Оять	35–100 (61)	60–157 (110)	40–99 (60)
Паша	60–130 (83)	74–220 (142)	53–188 (113)
Сясь	127–241 (162)	158–323 (221)	109–310 (176)
Лава	187–351 (260)	229–545 (380)	224–424 (299)
Назия	163–233 (194)	169–275 (219)	99–212 (162)
Морье	28–75 (52)	62–119 (85)	54–114 (79)
Авлога	121–196 (162)	142–249 (193)	75–214 (167)
Нева	83–99 (93)	92–102 (97)	93–114 (101)

*В скобках даны средние значения за рассматриваемый период

Основную часть минерального состава природных вод составляют ионы солей хлористоводородной, серной и угольной кислот с катионами натрия, калия, магния и кальция. На рис. 8.1.1 и 8.1.2 («треугольники Фере») представлен усредненный за шесть лет (2013–2018 гг.) для периода открытой воды ионный состав воды притоков в устьях и р. Невы в истоке. По осям отложено содержание главных ионов в %-эквивалентном соотношении (сумма четырех главных катионов принимается за единицу, сумма трех главных анионов также принимается равной единице). Как видно из рисунков, притоки Ладожского оз., за исключением р. Бурной, и р. Нева относятся к гидрокарбонатному типу и имеют кальциевый или смешанный катионный состав. Река Бурная часто в течение года переходит в смешанный класс, что отличает ее от большей части притоков Ладожского оз. Особенности формирования ионного состава р. Бурной обусловлены влиянием как природных (метаморфические породы водосбора, обогащенные сульфидами тяжелых металлов), так и антропогенных факторов (сульфаты поступают со сточными водами целлюлозно-бумажных предприятий, а хлориды – с хозяйственно-бытовыми стоками).

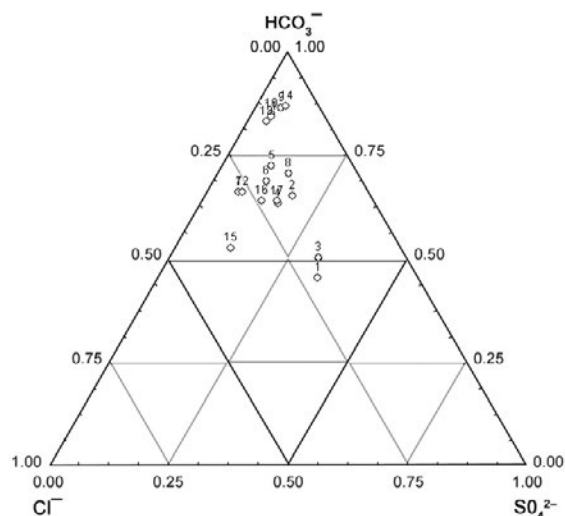


Рис. 8.1.1 – Соотношение главных анионов в воде притоков Ладожского оз. и р. Невы в истоке, усредненное за период открытой воды 2013–2018 гг., %-экв. Реки: 1 – Бурная, 2 – Вуокса, 3 – Янис, 4 – Тулема, 5 – Видлица, 6 – Тулокса, 7 – Олонка, 8 – Свирь, 9 – Оять, 10 – Паша, 11 – Сясь, 12 – Волхов, 13 – Лава, 14 – Назия, 15 – Морье, 16 – Авлога, 17 – Нева

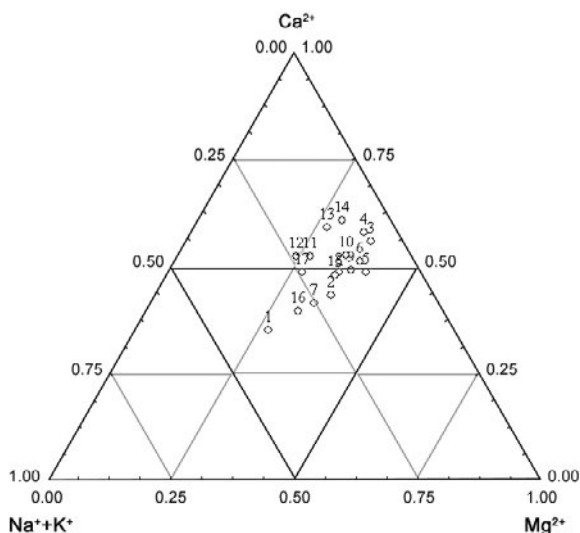


Рис. 8.1.2 – Соотношение главных катионов в воде притоков Ладожского оз. и р. Невы в истоке, усредненное за период открытой воды 2013–2018 гг., %-экв. Реки: 1 – Бурная, 2 – Вуокса, 3 – Янис, 4 – Тулема, 5 – Видлица, 6 – Тулокса, 7 – Олонка, 8 – Свирь, 9 – Оять, 10 – Паша, 11 – Сясь, 12 – Волхов, 13 – Лава, 14 – Назия, 15 – Морье, 16 – Авлога, 17 – Нева

В период с 2013 по 2016 г. более подробно рассмотрено изменение минерализации и основного ионного состава рек Бурной и Вуоксы. Среднее значение суммы главных ионов в р. Бурной в период 1981–1993 гг. составляло 43 мг/л, в период 2011–2016 гг. – 40 мг/л, р. Вуоксы – 41 мг/л. Сезон-

ная динамика минерализации воды р. Вуоксы выражена слабо. Средние концентрации основных ионов, за исключением гидрокарбонатов, в период наблюдений 1985–1993 гг. были повышены по сравнению с периодом 1959–1962 гг. [Raspletina, 1997]. Причиной данного повышения могло быть поступление сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности с сульфатной варкой целлюлозы, для которых характерно повышенное содержание Na^+ и SO_4^{2-} , а также хозяйственно-бытовых сточных вод, обычно содержащих Na^+ и Cl^- в высоких концентрациях. В период наблюдений 2013–2016 гг. абсолютное содержание хлоридов и сульфатов в р. Вуоксы существенно снизилось, содержание $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ уменьшилось до уровня 1959–1961 гг. и ниже [Гусева, 2017] (табл. 8.1.3).

Таблица 8.1.3

Средние концентрации основных ионов в воде р. Вуоксы в разные годы, мг/л

Период наблюдений	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$
1959–1962	12,8	10,2	2,7	4,4	1,1	4,6
1985–1993	11,4	12,8	5,8	4,9	1,8	6,9
2013–2016 (р. Бурная)	15,4	9,4	4,3	4,4	2,2	4,6
2013–2016 (р. Вуокса)	21,4	5,7	3,6	5,0	2,6	3,1

Осредненное значение суммы главных ионов в воде Ладожского оз. в 1960 г. составляло около 55 мг/л, в 1991–1998 гг. оно повысилось до 63,7 мг/л, т. е. возросло в 1,2 раза. Наибольшие значения Σ были отмечены в 2001–2004 гг. (до 71,6 мг/л), после чего наметилась тенденция к уменьшению до уровня 1990-х гг. [Сусарева, 2013]. В 2019 г. среднее значение Σ в воде озера в летне-осенний период составляло 64,8 мг/л, при этом осредненные концентрации главных ионов составляли: HCO_3^- – 34,2, SO_4^{2-} – 7,7, Cl^- – 5,7, Ca^{2+} – 9,5, Mg^{2+} – 2,9, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ – 5,9 мг/л. Таким образом, вода Ладожского оз., так же, как и воды основных притоков, характеризуется гидрокарбонатно-кальциевым составом. Изменчивость содержания главных ионов в пространственном и временном распределении выражена слабо.

8.2 Кислород и водородный показатель

Содержание растворенного кислорода в воде озера является одним из показателей трофического статуса водоема, а также одним из критериев оценки условий обитания гидробионтов. В низкопродуктивных водоемах, где продукционно-деструкционные процессы сбалансированы, насыщенность воды растворенным кислородом близка к 100%. Нарушение кислородного режима является одним из основных индикаторов развития процесса эвтрофирования водоема. Концентрация кислорода играет решающую роль в создании величины окислительно-восстановительного потенциала и в значительной мере определяет направление и скорость процессов химического и биохимического окисления органических и неорганических соединений. Водородный показатель (pH) имеет большое значение для химических и биологических процессов, протекающих в водоеме. От его ве-

личины зависят развитие и жизнедеятельность гидробионтов, устойчивость различных форм существования и миграции металлов и биогенных элементов, токсичность загрязняющих веществ. С другой стороны, по величине pH можно судить об интенсивности процесса фотосинтеза – при активном фотосинтезе pH растет вследствие поглощения CO_2 . Процесс деструкции и минерализации органического вещества в водоеме, напротив, ведет к снижению величины pH и закислению водоема. Величина pH зависит в основном от углекислотного равновесия, которое регулируется соотношением компонентов системы $\text{CO}_2 - \text{HCO}_3^- - \text{CO}_3^{2-}$.

Водородный показатель. Для большей части исследованных рек Ладожского водосбора, которые располагаются в пределах Балтийского щита, летом, в межень характерна реакция среды, близкая к нейтральной, в половодье и во время дождевых паводков – слабокислая. Реки с озерным питанием характеризуются небольшим интервалом значений pH, близких к нейтральному. Как правило, водородный показатель вод юго-восточных и южных рек в межень увеличивается. Так, в период до 2005 г. pH мог достигать 8,0–8,5, а во время паводков снижаться до 6,5 [Расплетина, 2006].

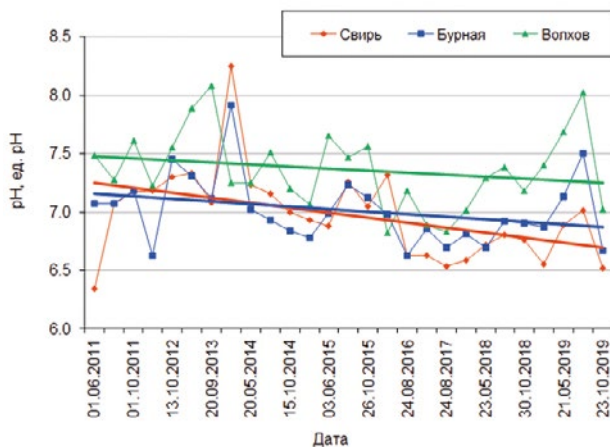


Рис. 8.2.1 – Межгодовые изменения средних значений водородного показателя pH в рр. Свирь, Бурная (Вуокса), Волхов и линии трендов

В предыдущий период наблюдений 2000–2005 гг. для большей части притоков отмечалось увеличение минимальных, средних и максимальных значений водородного показателя, а также увеличение амплитуд значений pH по сравнению с показателями 1960-х гг., что связывалось с эвтрофированием притоков [Сусарева, 2013]. Напротив, в 2013–2019 гг. водородный показатель воды в устьях основных притоков (рис. 8.2.1) и в истоке р. Невы (рис. 8.2.2) имел тенденцию к снижению. Однако при анализе межгодовой изменчивости значений pH следует учитывать, что они также зависят от водности года.

Из табл. 8.2.1, в которой показаны диапазоны водородного показателя за период 2011–2019 гг., видно, что верхняя граница pH в настоящее время редко превышает значение 8,00 даже для вод южных рек.

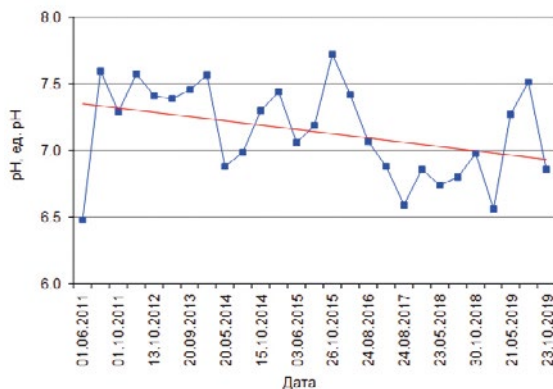


Рис. 8.2.2 – Межгодовые изменения среднего значения водородного показателя pH в истоке р. Невы и линия тренда

Таблица 8.2.1

Пределы pH в воде притоков и в истоке р. Невы в разные сезоны 2011–2019 гг.

Река	Май	Июнь – август	Сентябрь – октябрь
Волхов	6,69–7,69	6,82–8,02	6,83–8,08
Свирь	6,34–7,33	6,53–7,26	6,52–8,25
Бурная	6,69–7,31	6,63–7,50	6,67–7,91
Вуокса	6,63–7,28	6,64–7,45	6,65–8,05
Янис	6,08–7,50	6,08–7,50	6,53–7,90
Тулема	6,11–7,17	6,35–7,66	6,14–6,93
Видлица	6,49–7,08	6,32–7,67	6,35–7,02
Тулокса	6,05–7,07	5,83–7,77	5,81–6,91
Олонка	6,30–7,11	5,79–7,88	6,17–8,15
Оять	6,53–7,50	6,31–8,03	6,42–8,15
Паша	6,67–7,66	6,27–8,09	6,51–8,01
Сясь	7,09–7,62	6,71–7,99	6,86–8,05
Лава	6,89–7,86	7,10–8,20	7,23–7,74
Назия	7,20–7,71	6,87–7,57	6,48–8,30
Морье	5,97–6,98	6,09–7,45	6,21–7,44
Авлога	6,73–7,76	6,32–7,57	6,56–7,47
Нева	6,48–7,42	6,59–7,60	6,86–7,73

Аналогичный тренд наблюдается и в Ладожском оз. В 80-е годы прошлого века значения pH воды озера в вегетационный период в трофогенном слое часто достигали 8,5 и более, в 2005–2015 гг. в период интенсивного развития фитопланктона только на отдельных станциях отмечалось превышение значения 8,0. В последние десятилетия наблюдается постепенное снижение значений pH и уменьшение амплитуды его колебаний в озере. В период 2016–2018 гг. повышение pH в юго-восточной части озера было,

как правило, незначительным (до 7,5) при высоких значениях относительного содержания кислорода, свидетельствующих об интенсивно протекающем фотосинтезе. Летом 2019 г., в период активного фотосинтеза, значения рН в основной водной массе не превышали 7,8.

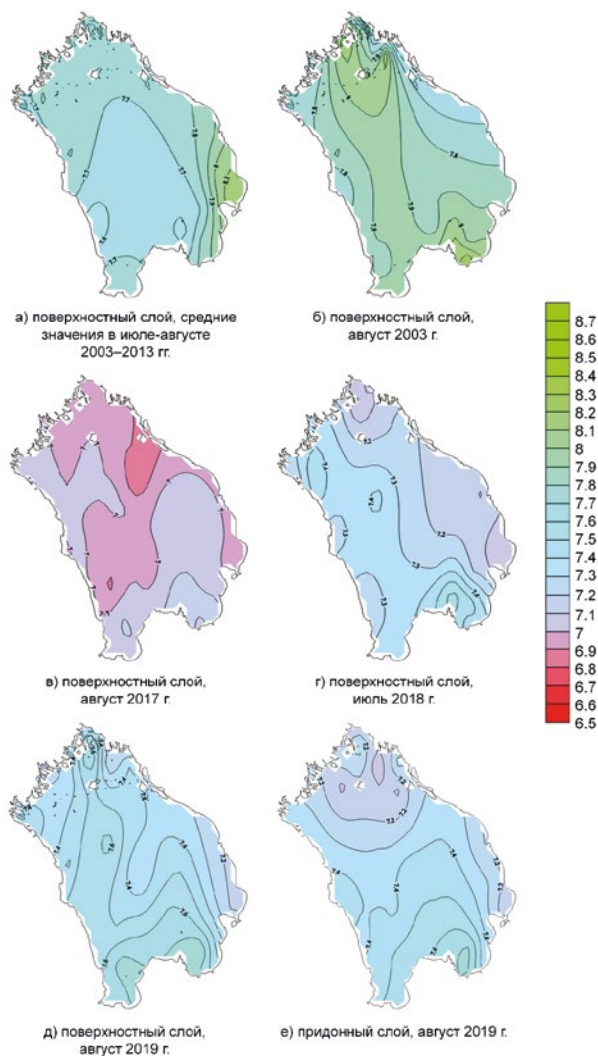


Рис. 8.2.3 – Характерные распределения значений рН в Ладожском оз. в летний период разных лет

На рис. 8.2.3 и 8.2.4 показано, что распределение водородного показателя в акватории озера в 2017–2019 гг. сохраняет некоторые пространственные закономерности, характерные для сезонных распределений в период 2003–2013 гг. [Гусева, 2015], однако отмечен сдвиг рН в сторону более низких значений. Снижение значений рН может быть связано с изменением баланса продукции и деструкции органического веществ и с тем, что по-

глошение CO_2 в результате фотосинтеза компенсируется выделением CO_2 при разложении органического вещества в водной толще. В целом значения водородного показателя Ладожского оз. остаются в пределах, характерных для крупного глубоководного малопродуктивного холодноводного озера, однако по-прежнему отмечается незначительная тенденция к их снижению.

Кислород. Для Ладожского оз. характерно высокое содержание растворенного в воде кислорода в течение всего года и повышение его абсолютно-го содержания с понижением температуры. В летний и весенний периоды увеличение относительного содержания кислорода, как правило, является результатом фотосинтетической активности.

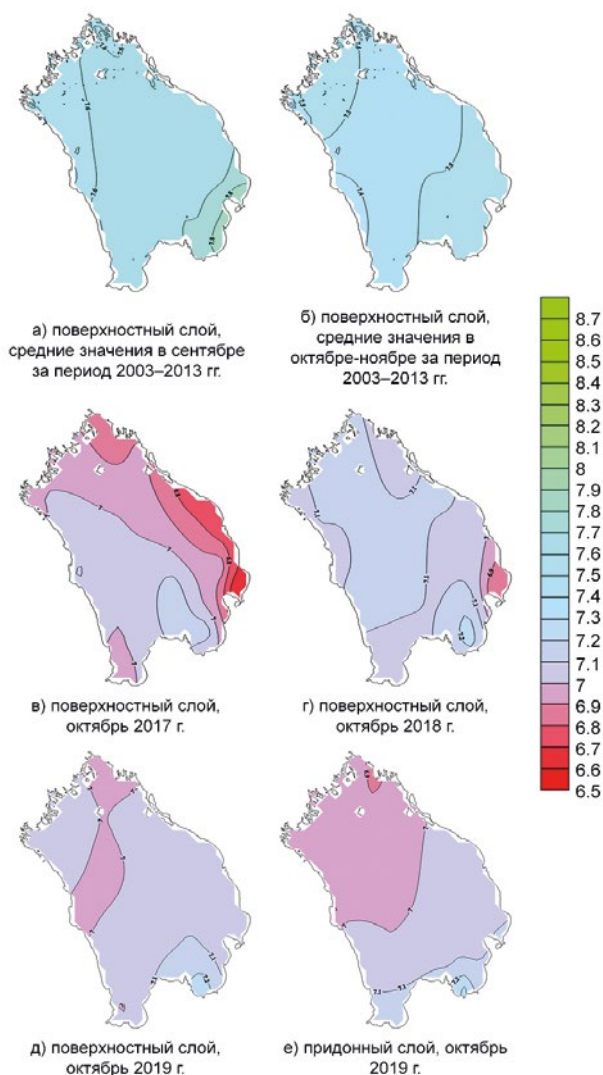


Рис. 8.2.4 – Характерные распределения значений pH в Ладожском оз. в осенний период разных лет

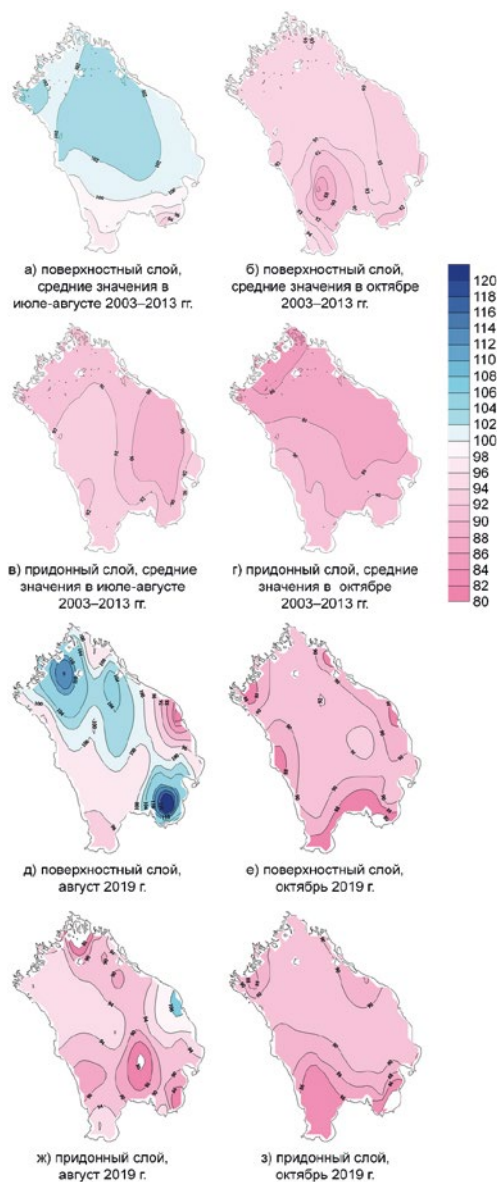


Рис. 8.2.5 – Распределение относительного содержания растворенного кислорода в Ладожском оз. в летне-осенний период 2003–2013 гг. и 2019 г.

В 2019 г. повышенное содержание кислорода ($>100\%$ насыщения) наблюдалось в августе, в первую очередь, в Волховской губе, а также в северной и центральной частях озера (рис. 8.2.5). По сравнению с прошлыми годами, когда в основном наблюдались пересыщение воды кислородом в центральной и северной частях озера и незначительный дефицит кислорода в прибрежной зоне, где преимущественно происходит окисление органического вещества (особенно в Волховской губе, где кислород быстро расходуется

на деструкцию органического вещества как автохтонного, так и поступающего с речными водами), в 2019 г. распределение кислорода по акватории и высокое его содержание (до 140% насыщения) свидетельствовали об интенсификации продукционных процессов в озере. Относительное содержание растворенного кислорода в водной массе лимнических зон озера в 2019 г. составляло: в прибрежной зоне – 70–140%, в деklinальной – 76–104%, в профундальной – 87–104%, и в ультрапрофундальной – 75–118%. Характерные распределения относительного содержания кислорода в Ладожском оз. в период 2003–2013 гг. и в 2019 г. представлены на рис. 8.2.5.

Как правило, дефицит кислорода в Ладожском оз. не достигает критических значений. Наиболее низкие значения, составлявшие 70% насыщения, наблюдались в 2019 г. в Волховской губе в осенний период. Исключением являются заливы в северной, шхерной части Ладожского оз., исследованные в 2018–2019 гг. Они отличаются от основной водной массы озера как степенью антропогенной нагрузки, так и изолированностью от неё. Так, в мелководной части Сортавальского залива относительное содержание кислорода в придонном слое в летний период снижалось до 24% (2,8 мг/л) при нижнем пороге 6 мг/л для объектов рыбохозяйственного назначения. Для глубоководных станций северной части Ладожского оз. насыщение кислородом достаточно велико по всему столбу воды (рис. 8.2.6) Летом, в период активного фотосинтеза при насыщении верхнего слоя кислородом выше 100% иногда наблюдается небольшой дефицит его на 10-метровом горизонте. С увеличением глубины насыщение воды кислородом выравнивается. По всей видимости, дефицит связан с расходом кислорода на окисление образовавшегося в верхнем слое автохтонного органического вещества. В весенний период насыщение кислородом по всему столбу воды достаточно равномерно, за исключением отдельных всплесков «цветения» в теплоактивной зоне, приводящих к повышению pH и перенасыщению кислородом верхнего слоя воды.

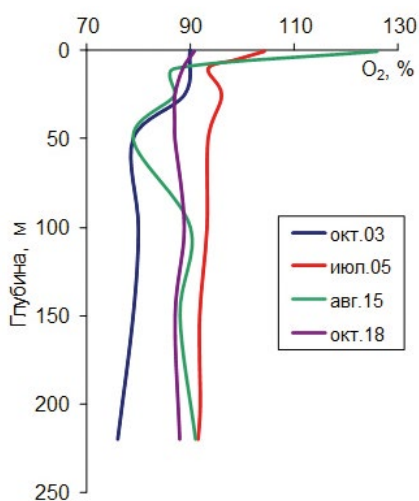


Рис. 8.2.6 – Вертикальное распределение относительного содержания кислорода в водной массе глубоководной северной части Ладожского оз.

8.3 Органическое вещество

Для характеристики содержания органического вещества в воде притоков Ладожского оз. и истока р. Нева используются такие гидрохимические показатели, как цветность воды и концентрация общего органического углерода (ТОС – total organic carbon). Природные особенности Ладожского водосбора приводят к обогащению поверхностных вод темноокрашенными органическими веществами гумусовой природы. В условиях переувлажненности и при недостатке тепла минерализация растительных остатков протекает медленно с образованием кислых продуктов неполного распада. При бедности почво-грунтов основаниями полной нейтрализации органических кислот не происходит. В результате большое количество гумусовых веществ, учитывая их высокую подвижность, может попадать в поверхностные воды. Это обуславливает высокую цветность воды и широкий диапазон концентрации общего органического углерода в воде притоков озера [Соловьева, 1967].

Таблица 8.3.1

Пределы изменения цветности (град. Pt-Co шкалы) воды притоков Ладожского оз. и истока р. Невы в разные годы

Река	Год							
	2011–2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Волхов	77–237	93–112	118–164	68–320	116–304	160–162	58–152	104–144
Свирь	40–99	36–38	55–76	40–63	48–80	56–64	33–44	40–80
Бурная	38–40	31–44	37–55	38–46	32–64	36–48	34–60	28–40
Вуокса	40–78	45–66	61–74	44–54	48–80	52–64	36–64	32–48
Янис	64–123	82–96	90–91	76–82	80–128	72–96	60–100	80–92
Тулема	101–200	152–198	120–176	134–268	192–272	160–200	88–160	112–180
Видлица	52–240	66–90	91–126	79–138	144–248	112–160	60–160	110–176
Тулокса	136–357	144–157	181–232	118–219	256–480	176–240	100–192	102–165
Олонка	125–352	92–128	181–205	160–208	200–336	184–224	160–196	112–212
Оять	116–266	82–160	169–198	76–200	90–288	146–200	32–160	112–182
Паша	96–277	104–140	224–268	156–188	112–320	160–240	32–152	136–154
Сясь	145–310	84–160	203–234	204–240	104–320	168–200	24–200	112–202
Лава	224–363	187–208	198–282	71–260	208–440	224–256	120–168	120–180
Назия	132–352	186–312	198–243	84–224	165–536	200–248	164–224	144–188
Морье	266–358	280–345	250–396	220–300	304–490	240–260	132–236	188–280
Авлога	81–176	72–162	122–125	56–140	90–280	108–240	54–168	85–144
Нева	29–58	38–41	68–74	34–62	38–72	38–52	36–56	30–48

Цветность воды рек Ладожского водосбора изменяется в широких пределах, например, в 2001–2005 гг. она изменялась от 25–45 град. в межень до 340–380 град. во время дождевых паводков [Расплетина и др., 2006]. Содержание окрашенных органических веществ в реках в большой степени зависит от зарегулированности их стока озерами. Поэтому реки с высокой озерностью водосборов характеризуются наименьшими значениями цветности воды и содержания общего органического углерода при незначительных их колебаниях в течение года. Случаи существенных повышений значений этих показателей встречаются достаточно редко. К таким рекам относятся два главных притока – реки Свирь и Вуокса с р. Бурной, также к ним относится северный приток – р. Янис. Обычно значения цветности воды колеблются в пределах 30–50 град. для Свири и 20–40 град. для Бурной, в р. Янис значения цветности воды могут достигать до 100–120 град. Содержание общего органического углерода в воде этих рек обычно также невелико – 6–17 мг·С/л [Расплетина и др., 2006]. За период 2011–2019 гг. наиболее низкие значения цветности воды и концентрации ТОС в этой группе рек чаще всего наблюдались в р. Бурной (соответственно, 31–64 град., 3,4–12,2 мг·С/л). В р. Вуокса цветность изменялась в пределах 36–80 град., ТОС – 2,3–14,6 мг·С/л, в Свири – 33–99 град. и 2,6–13,6 мг·С/л соответственно. Несколько выше значения цветности были в воде р. Янис (60–128 град.), величина ТОС изменялась от 5,7 до 17,1 мг·С/л (табл. 8.3.1, рис. 8.3.1).

Из трех главных притоков Ладожского оз. вода Волхова, зарегулированность которого значительно ниже, чем рек Свирь и Вуокса, содержит большее количество интенсивно окрашенных органических веществ. Различия в цветности воды рек обусловлены также особенностями водосборов. Цветность воды рек Волхова изменяется в очень широких пределах – в 2000–2005 гг. ее значение изменялось от 40 до 240 град., при этом содержание органического углерода находилось в пределах 15–25 мг·С/л [Расплетина и др., 2006]. Как видно из табл. 8.3.1, в последние годы (2011–2019 гг.) цветность воды этой реки также изменялось в широком диапазоне 58–320 град., содержание органического углерода варьировало от 7,8 до 30,6 мг·С/л, т.е. как и ранее, было выше, чем в воде двух других главных притоков озера (рис. 8.3.1). В июне 2015 г. было отмечено высокое значение цветности (320 град.) – максимальное из наблюдавшихся после 2000 года., концентрация ТОС в это время также была достаточно высока – 26,1 мг·С/л. В 2017 г. цветность воды в р. Волхов оставалась практически постоянной – 160–162 град., в то время как концентрация ТОС возрастала от весны к осени от 18,4 до 29,4 мг·С/л. Повышение концентрации ТОС при постоянном значении цветности воды может быть связано с поступлением в этот период в реку сточных вод. Самое высокое за период 2011–2019 гг. значение ТОС (30,6 мг·С/л), сопровождавшееся высоким значением цветности, было отмечено в августе 2016 г. во время дождевого паводка. В августе 2018 г., в период летней межени, напротив, наблюдались наиболее низкая концентрация ТОС (7,8 мг·С/л) и низкая цветность (58 град.). Также невысокие концентрации ТОС (14,2–17,2 мг·С/л) в воде Волхова фиксировались с осени 2018 г. по лето 2019 г.

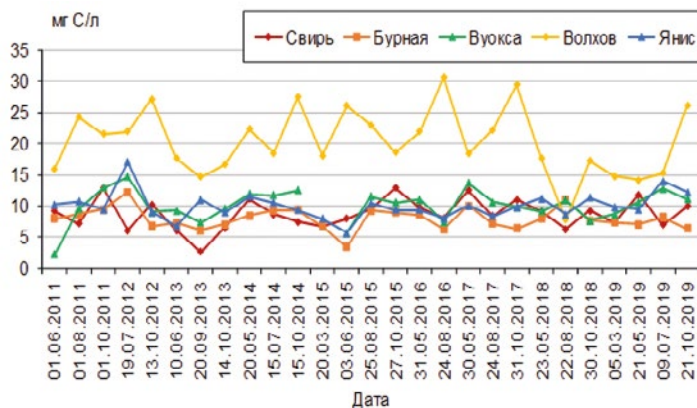


Рис. 8.3.1 – Межгодовые и сезонные изменения концентрации ТОС в воде главных притоков и р. Янис

В слабо зарегулированных реках в течение года значения цветности могут изменяться на порядок от самых низких значений (25–45 град.) в период межени до очень высоких (300–400 град.) во время дождевых паводков, то же отмечено и для содержания органического углерода.

В воде рек северо-восточного и восточного побережья (рр. Тулема, Видлица, Тулокса и Олонка) высокое содержание окрашенных веществ обусловлено высокой степенью заболоченности территории их водосборов. Нижний предел цветности воды здесь может быть близок минимальным значениям в воде рек северного побережья (45–90 град.), в то время как верхний предел намного превышает значения, характерные для северных рек, и может достигать 190–360 град. Содержание ТОС также может изменяться в широких пределах от 7,4 до 36,0 мг·С/л [Расплетина и др., 2006]. За период 2011–2018 гг. цветность воды в этих реках изменялась в основном в диапазоне 52–357 град., в августе 2016 г. в связи с дождевыми паводками она оказалась выше и изменялась от 248 до 480 град. В 2019 г. во всех реках этой части побережья цветность воды была невысокая и составляла 102–212 град. Наиболее низкие значения, в основном 60–160 град., обычно характерны для р. Видлицы (табл. 8.3.1).

Как и величина цветности, содержание ТОС в воде северо-восточных и восточных притоков изменяется в широких пределах (рис. 8.3.2). В 2011–2019 гг. в наиболее широком диапазоне концентрация ТОС изменялась в воде р. Олонки – от 60 до 294 мг·С/л, в воде р. Тулемы – от 9,3 до 26,1 мг·С/л, Тулоксы – от 12,8 до 28,2 мг·С/л. Как и для цветности, наиболее низкие значения концентрации ТОС (6,0–21,5 мг·С/л) относились к р. Видлице.

Водосборы слабо зарегулированных рек юго-восточной части Ладожского побережья – Ояти, Паши и Сяси, сложены осадочными породами, озёрность здесь низкая – 1–3%. Как и у водосборов рек северо-восточного и восточного побережий, значительные площади (11–18%) занимают болота, преимущественно низинного типа. Все это обуславливает обычно высокую цветность воды и значительные концентрации ТОС. Бассейн р. Сяси является одной из наиболее освоенных частей Ладожского водосбора. Антропо-

генная нагрузка на бассейны рек Паши и Ояты мала. В период 2000–2005 гг. в воде этих рек диапазон цветности составлял 25–335 град., содержания общего органического углерода – 7,4–32,2 мг·С/л [Расплетина и др., 2006]. В период 2011–2019 гг. цветность воды в этих реках изменялась от 24 до 320 град. Наиболее высокие значения (288–320 град.), как и в воде притоков северо-восточного побережья, наблюдалась в августе 2016 г., а в августе 2018 г. цветность была наиболее низкой (24–32 град.) (табл. 8.3.1).

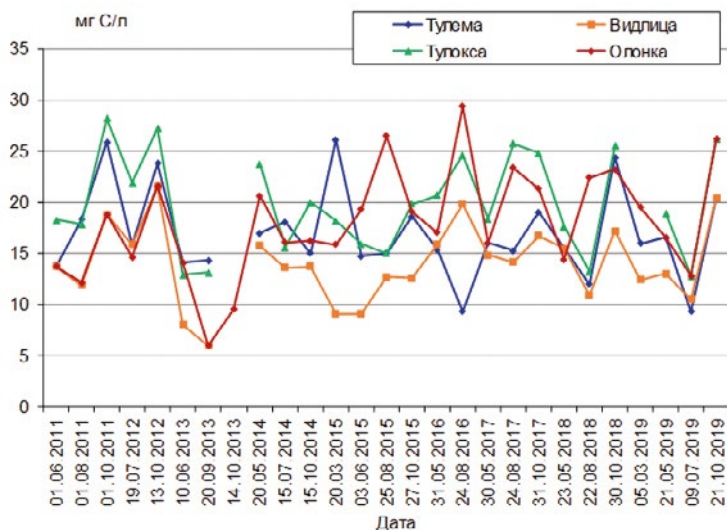


Рис. 8.3.2 – Межгодовые и сезонные изменения концентрации ТОС в воде притоков северо-восточной и восточной частей водосбора

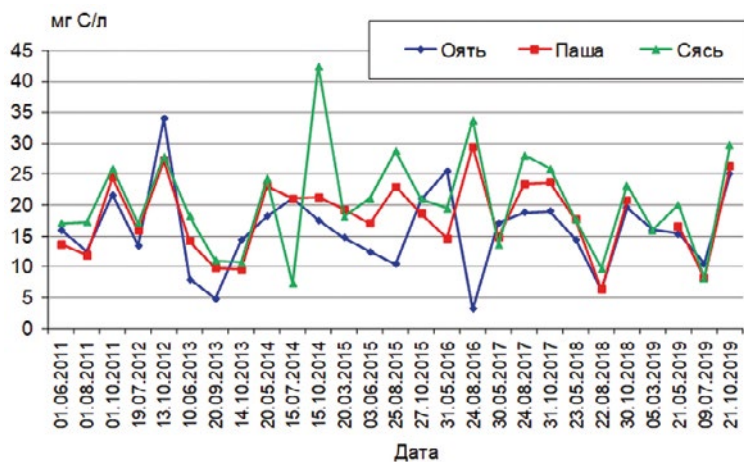


Рис. 8.3.3 – Межгодовые и сезонные изменения концентрации ТОС в воде притоков юго-восточной части водосбора

Концентрация ТОС в воде юго-восточных притоков озера в 2011–2012 гг. изменялась от 11,9 до 34,0 мг·С/л, в 2013–2018 гг. диапазон расширился до 3,2–42,5 мг·С/л, хотя в основном значения варьировали от 10,0 до 25,0 мг·С/л. Как показано на рис. 8.3.3, во всех реках периодически отмечались как очень низкие, так и достаточно высокие концентрации ТОС. Во многих случаях содержание углерода в воде р. Сясь было выше, чем в двух других реках, что связано с большей антропогенной нагрузкой на ее бассейн. Наибольшее значение ТОС в этой реке (42,5 мг·С/л) наблюдалось в октябре 2014 г., что, возможно, явилось результатом хозяйственной деятельности. Однако в июле 2014 г. здесь отмечалась одна из наиболее низких за рассматриваемый период концентраций ТОС – 7,3 мг·С/л. Также значительное снижение концентрации ТОС дважды наблюдалось в воде р. Оять (3,2–4,9 мг·С/л). На рис. 8.3.3 видно, что концентрации ТОС в воде этих трех рек в большинстве случаев изменяются достаточно синхронно.

Малые притоки южного и юго-западного побережья Ладожского оз. – реки Лава, Назия, Морье, Авлога, характеризуются наиболее высокими показателями цветности и общего органического углерода среди всех притоков озера. Чаше всего более высокие значения этих показателей характерны для воды р. Морье, более низкие – для р. Авлоги. В 2000–2005 гг. цветность воды малых притоков была выше 100 град. и доходила до 360 град., концентрация ТОС варьировала от 10,2 до 45,7 мг·С/л [Расплетина и др., 2006]. В 2011–2019 гг. в большинстве случаев значения цветности воды оставались в тех же пределах, однако в целом диапазон цветности расширился. Так, цветность воды всех рек иногда могла опускаться ниже 100 град., а иногда существенно возрастать, как это было в 2016 г., когда цветность воды рек Морье и Назии достигла своих наибольших значений – соответственно, 490 и 536 град. (табл. 8.3.1). Повышенные значения цветности, как и в большинстве других незарегулированных притоков, наблюдались здесь в августе 2016 г.

Изменения содержания ТОС в воде малых притоков за многолетний период представлены на рис. 8.3.4. Наиболее низкие концентрации органического углерода отмечались обычно в воде р. Авлоги, в 2011–2019 гг. они изменялись в основном от 6,8 до 19,4 мг·С/л, только в августе 2017 г. и в октябре 2018 г. фиксировались более высокие концентрации, соответственно, 29,2 и 279 мг·С/л. В воде рек Лава и Назия концентрации ТОС близки по величине, в рассматриваемый период они изменялись от 16,1 до 40,9 мг·С/л в р. Лава и от 12,3 до 43,8 мг·С/л в р. Назия. Практически всегда более высокие концентрации ТОС (12,5–51,0 мг·С/л) отмечаются в воде р. Морье.

Цветность воды и содержание органического вещества в истоке р. Невы обычно близки величинам, характерным для юго-западного побережья Ладожского оз., составляя в среднем, соответственно, около 40 град. и 6,5–8,9 мг·С/л и мало изменяясь в течение года. В 2011–2012 гг. цветность воды в истоке Невы составляла 29–58 град, в 2013–2018 гг. – в основном 34–62 град., но иногда, как это было в 2014 г. и в августе 2016 г., увеличивалась до 68–74 град. В 2019 г. диапазон цветности воды с истока р. Невы был достаточно узким – 30–48 град. (табл. 8.3.1).

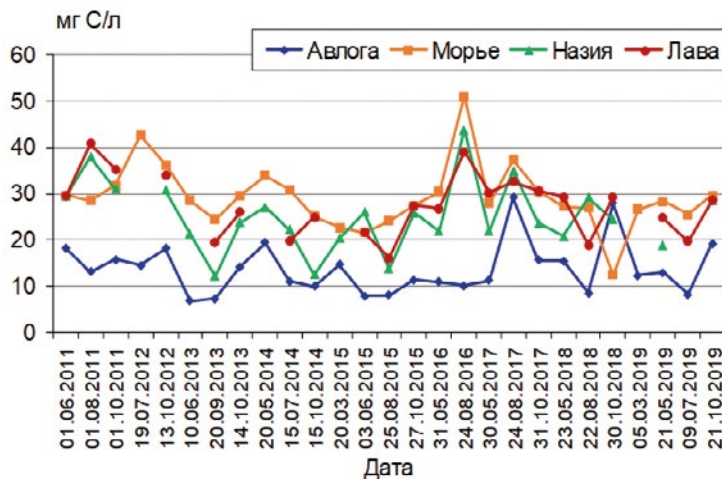


Рис. 8.3.4 – Межгодовые и сезонные изменения концентрации ТОС в воде малых рек южной части водосбора

В 2011–2012 гг. концентрация ТОС изменялась от 9,1 до 11,8 мг·С/л, в 2013–2018 гг. значения в основном лежали в диапазоне 6,1–9,1 мг·С/л. Достаточно высокие значения ТОС (11,3–13,0 мг·С/л), стабильно сохранявшиеся с октября 2013 г. по октябрь 2014 г., сопровождалось повышением цветности воды, что указывало на природную причину изменений. В 2019 г. концентрации ТОС изменялись в пределах значений, характерных для воды юго-западной части прибрежной зоны – от 7,4 до 10,50 мг·С/л (рис. 8.3.5).

Цветность воды открытой части озера отличается большой устойчивостью. Изменения ее значений в начале 60-х годов прошлого века находились в пределах 29–42 град. [Расплетина и др., 1967]. В настоящее время (2009–2019 гг.) цветность воды основной водной массы (профундальная и ультра-профундальная зоны) осталась практически в тех же пределах – 24–46 град.

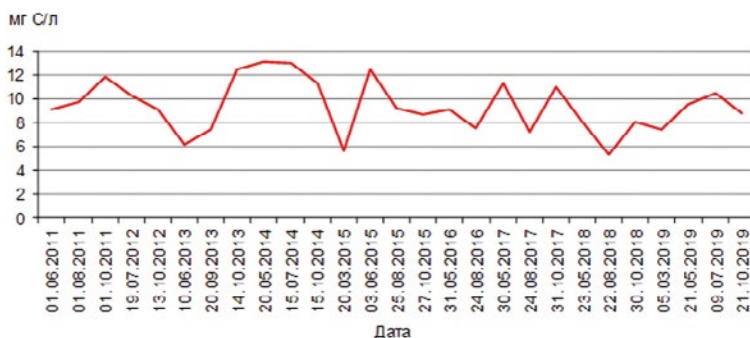


Рис. 8.3.5 – Межгодовые и сезонные изменения концентрации ТОС в истоке р. Невы

Интенсивно окрашенные воды поступают в озеро с водами притоков, поэтому цветность воды в прибрежной зоне может изменяться в очень широких пределах. Отмечается постепенное уменьшение цветности при

удалении от устьев рек по направлению к деклинальной зоне. Обычно наиболее высокая цветность воды, доходящая в отдельные периоды до 90–200 град., характерна для Волховской губы, куда поступают сильно окрашенные воды Волхова и Сяси. Ранней весной, когда термический бар находится вблизи берега и препятствует распространению в озеро волховских вод, цветность в Волховской губе может сильно увеличиться. Часто значения цветности в поверхностном и придонном горизонтах значительно отличаются друг от друга в зависимости от того, каким образом происходит распространение речных вод. Как отмечалось ранее [Расплетина и др., 1967], цветность воды Волховской губы в значительной степени уменьшается по направлению от внутренней ее части к внешней в результате быстрой коагуляции части темноокрашенных гумусовых коллоидов при смешении вод берегового стока с богатыми кислородом озерными водами. Однако иногда, учитывая, что величина водного стока Волхова достаточно велика, при ветрах южных направлений наблюдается распространение его вод с повышенной цветностью в поверхностном слое воды на обширных участках южной части озера. При сильных ветрах северных направлений поступление в губу вод центральной части озера снижает цветность до значений основной водной массы, как это наблюдалось в сентябре 2016 г., когда цветность воды в Волховской губе составляла 36–41 град., и в 2018 и 2019 гг. в течение всего периода наблюдений, когда она не превышала 29–48 град. В целом в период 2011–2018 гг. цветность воды в губе изменялась в широких пределах от 29 до 165 град.

В Свирской губе цветность воды обычно ниже, чем в Волховской, и может достигать 50–76 град. В 2011–2019 гг. значения изменялись от 28 до 70 град. Благодаря тому, что в летний период в озере наблюдается циклонический перенос водных масс, влияние вод Волховской и Свирской губ сказывается в повышении цветности до 40–50 град. также вдоль восточного побережья до района впадения р. Видлицы.

Интервал значений цветности воды в бухте Петрокрепость и вдоль западного берега озера до устья р. Вуоксы обычно намного уже, чем в юго-восточном районе, среднее значение цветности составляет здесь 40 град. В 2011–2019 гг. цветность воды вдоль западного побережья изменялась от 28 до 46 град., только в октябре 2016 и 2017 гг. она увеличивалась до 50–60 град.

Цветность воды деклинальной зоны озера обычно мало отличается от цветности в глубоководных зонах, в 2011–2019 гг. она в основном составляла 24–48 град. Иногда в юго-восточной части деклинальной зоны отмечается влияние более окрашенных вод Волховской и Свирской губ, как, например, в 2017 г., когда в отдельных случаях цветность воды составляла здесь 50–62 град.

Как указывалось выше, межгодовые колебания концентрации общего органического углерода в воде основных притоков Ладожского оз., вносящих основной вклад в поступление органического вещества с водосбора, невелики. За период 2011–2019 гг. содержание ТОС в воде главных притоков озера изменялось в основном от 21 до 26 мг·С/л в воде р. Волхов, от 8 до 10 мг·С/л в воде р. Свирь, от 7 до 9 мг·С/л в воде р. Бурной и от 8 до 12 мг·С/л в воде р. Вуоксы. При относительном постоянстве внешнего по-

ступления главным механизмом, регулирующим содержание органического углерода в воде озера, является соотношение продукционно-деструкционных процессов в водоеме. В сбалансированной системе динамическое равновесие этих процессов обеспечивает постоянство содержания общего органического углерода в воде озера, преобладание одного из них приводит к изменению среднегодового содержания ТОС [Трегубова и др., 1987], что наблюдалось до 1979 г., когда среднегодовое значение концентрации ТОС было постоянно и составляло $8,3 \text{ мг} \cdot \text{С} / \text{л}$ [Расплетина, 1982]. Произшедшая в результате развития процесса антропогенного эвтрофирования интенсификация продукционно-деструкционных процессов в экосистеме озера привела к нарушениям в режиме этого ранее консервативного показателя.

Значительные межгодовые изменения средних концентраций ТОС в воде озера начали происходить с 1981 г. и продолжаются по настоящее время. Изменения среднегодовых величин в водоеме при многолетнем ряде наблюдений могут говорить о дисбалансе продукционно-деструкционных процессов. За это время отмечалось несколько периодов повышения и снижения содержания концентрации ТОС в воде озера. В 1981 г. содержание ТОС снизилось до $6,4 \text{ мг} \cdot \text{С} / \text{л}$ и до 2000 г. происходили постоянные колебания его среднегодовой величины от $5,8$ до $9,5 \text{ мг} \cdot \text{С} / \text{л}$ [Кулиш, 2002]. Последнее значительное увеличение содержания органического вещества в воде озера приходится на период 2001–2003 гг., когда средняя концентрация его в озере составляла $10,0 \text{ мг} \cdot \text{С} / \text{л}$. Затем достаточно резкое снижение средней концентрации до $8,4 \text{ мг} \cdot \text{С} / \text{л}$ происходит в 2004 г. С 2005 г. наступает период относительной стабильности, с 2005 по 2009 г. средняя за период открытой воды концентрация ТОС колебалась около значения $7,0 \text{ мг} \cdot \text{С} / \text{л}$ ($6,6$ – $7,3 \text{ мг} \cdot \text{С} / \text{л}$) [Петрова, Игнатьева, 2013]. В период 2010–2013 гг. средние для озера значения концентрации органического углерода оставались на уровне предыдущих лет и составляли $6,4$ – $7,4 \text{ мг} \cdot \text{С} / \text{л}$. В 2011–2013 и 2015 гг. наблюдения проводились только в весенний и летний периоды, поэтому полученные среднегодовые значения следует считать приблизительными. В 2014 г. наблюдения на большей части акватории не проводились, поэтому данные отсутствуют. В 2015–2019 гг. средняя для озера концентрация ТОС немного повысилась – до $7,6$ – $8,5 \text{ мг} \cdot \text{С} / \text{л}$ (рис. 8.3.6).

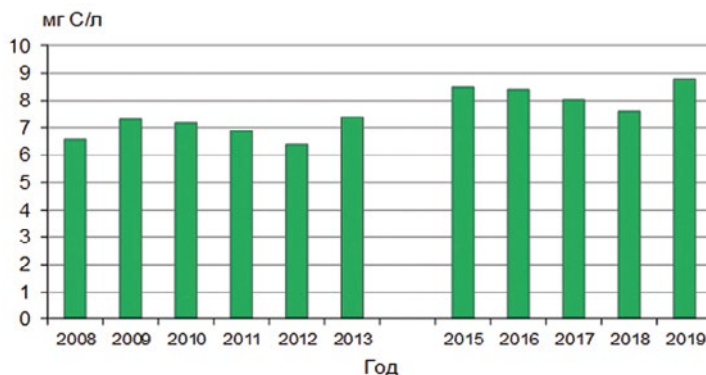


Рис. 8.3.6 – Средние за период открытой воды концентрации ТОС в воде Ладожского оз.

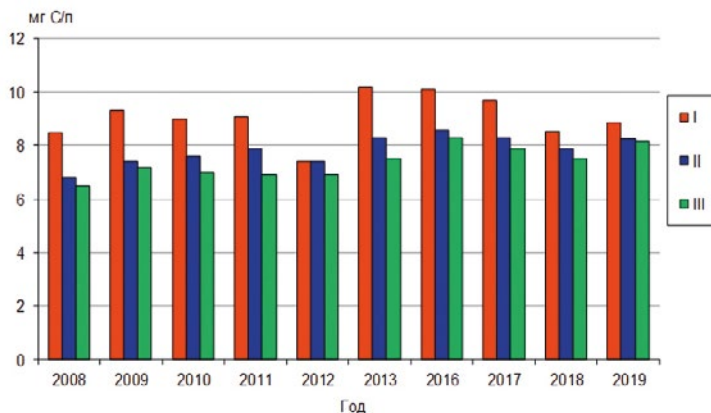


Рис. 8.3.7 – Средневзвешенные за период открытой воды концентрации ТОС в лимнических зонах Ладожского оз. Лимнические зоны озера: I – прибрежная, II – деклинальная, III – профундальная + ультрапрофундальная

В 2016–2019 гг. средние за период открытой воды концентрации ТОС в деклинальной и особенно глубоководных зонах озера по сравнению с предыдущими годами увеличились более заметно, чем концентрация в прибрежной зоне (рис. 8.3.7). В 2008–2012 гг. они изменялись в пределах 6,5–7,2 мг·C/л, а в 2013-м и 2016–2019 гг. средняя за период открытой воды концентрация в воде глубоководных зон увеличилась до 7,5–8,3 мг·C/л.

Изменения средних за период открытой воды концентраций в глубоководных зонах в основном зависят от продукционно-деструкционных процессов и могут свидетельствовать об изменении их соотношения. Поскольку объем глубоководных зон значительно превышает объем прибрежной и деклинальной, полученные для них средние концентрации гидрохимических показателей определяют средние концентрации в озере в целом. Таким образом, за счет этих зон в 2016–2019 гг. выросло и среднее за период открытой воды содержание ТОС.

Концентрация ТОС в воде прибрежной зоны в большей степени зависит от поступления органического вещества с водами притоков, поэтому здесь встречаются наиболее высокие концентрации и широкий диапазон значений. Средние за период открытой воды показатели в этой зоне в 2013, 2016 и 2017 гг. были выше по сравнению с 2008–2012 гг. Они изменялись в пределах 7,4–9,3 мг·C/л в 2008–2012 гг. и в пределах 9,7–10,2 мг·C/л в 2013, 2016 и 2017 гг. [Петрова, Гусева, 2017]. В 2018 и 2019 гг. среднегодовые концентрации в прибрежной зоне снизились и были близки по величине – соответственно, 8,6 и 8,8 мг·C/л. Как уже было отмечено выше, рост концентрации ТОС в прибрежной зоне в 2013–2016 гг. наблюдался одновременно с повышением значений цветности воды, что говорит о природном происхождении органического вещества. Обычно более высоким содержанием ТОС отличается Волховская губа вследствие поступления богатых органическим веществом вод р. Волхов. В 2008–2013 гг. измеренные концентрации ТОС вблизи устья Волхова доходили до 21,1 мг·C/л, в 2015–2017 г. находились в диапазоне 8,1–23,4 мг·C/л, в 2018 г. были невысокими – 12,2–13,3 мг·C/л, летом

2019 г. стали еще ниже – 10,3–11,4 мг·С/л, осенью 2019 г. – 13,4–14,6 мг·С/л, при этом цветность воды также была низкой, на уровне значений для центральной части озера. Часто более высокие концентрации, лежащие в диапазоне 10,0–15,0 мг·С/л, отмечаются вблизи устья р. Свири, однако в 2019 г. здесь, как и в Волховской губе, они были невысокими – 8,0–9,2 мг·С/л.

В деklinальной зоне в 2008–2012 гг. средние концентрации ТОС изменялись от 6,8 до 7,4 мг·С/л, в 2013–2018 гг. они увеличились до 7,2–8,8 мг·С/л, при этом в основном значения находились в пределах 6,2–9,6 мг·С/л, доходя до 10,5–12,2 мг·С/л на отдельных станциях в юго-восточной части зоны. В 2019 г. средние для зоны концентрации составили 8,1–8,4 мг·С/л, при этом на отдельных станциях отбора проб концентрации ТОС изменялись от 6,9 до 10,1 мг·С/л.

Особенности пространственного распределения общего органического углерода в разные сезоны на примере данных 2017–2019 гг. представлены на рис. 8.3.8. Распределение построено с использованием средневзвешенных по глубине концентраций для каждой станции. На рисунке хорошо видно, что в оба срока наблюдений в 2019 г., особенно летом, средние концентрации для каждой станции на большей части акватории были выше, чем в 2017–2018 гг.

Концентрация лабильного органического углерода отражает легкодоступную для водных микроорганизмов часть общего органического углерода, которую путем биохимического окисления они могут использовать достаточно быстро. В глубоководных зонах озера ЛОС представлен в основном клетками фито- и зоопланктона, продуктами их неполной деструкции и растворенными метаболитами, поступающими в воду в процессе жизнедеятельности гидробионтов. Средняя концентрация ЛОС за вегетационный период является равновесным показателем, характеризующим соотношение протекающих в озере продукционных и деструкционных процессов. При сохранении их равновесия среднегодовое содержание ЛОС должно оставаться достаточно постоянным. Однако в Ладожском оз. с начала 80-х годов прошлого века происходят постоянные колебания значений этого показателя. При этом сезонные колебания концентрации ЛОС естественны, так как процессы продукции и деструкции в озере не совпадают по времени. На начальном этапе исследований процесса антропогенного эвтрофирования озера, в 1976–1979 гг., средняя концентрация лабильного органического углерода достигала значения 1,8 мг·С/л [Трегубова, Кулиш, 1982], в дальнейшем она снизилась до 0,5 мг·С/л и до 2004 г. часто была равна или ниже этого уровня, хотя встречались годы с высоким среднегодовым содержанием ЛОС – они были приурочены к периоду 1984–1992 гг. [Кулиш, 2002]. С 2005 по 2010 г. средняя величина ЛОС постоянно колеблется от 0,6 до 1,1 мг·С/л [Петрова, Игнатьева, 2013].

По сравнению с 2008–2011 гг., в 2012–2019 гг. средняя за период открытой воды концентрация лабильного углерода в озере вновь снижается, изменяясь в пределах 0,46–0,7 мг·С/л (рис. 8.3.9). Продолжающиеся колебания среднегодовой концентрации ЛОС говорят о продолжении изменений в соотношении процессов продукции и деструкции в озере. В 2011–2015 гг. наблюдения проводились только в весенний и летний периоды, а в 2019 г. только летом и осенью, поэтому средние значения в эти годы нужно считать

приблизительными. В 2014 г. большая часть акватории была не охвачена наблюдениями, поэтому данные отсутствуют.

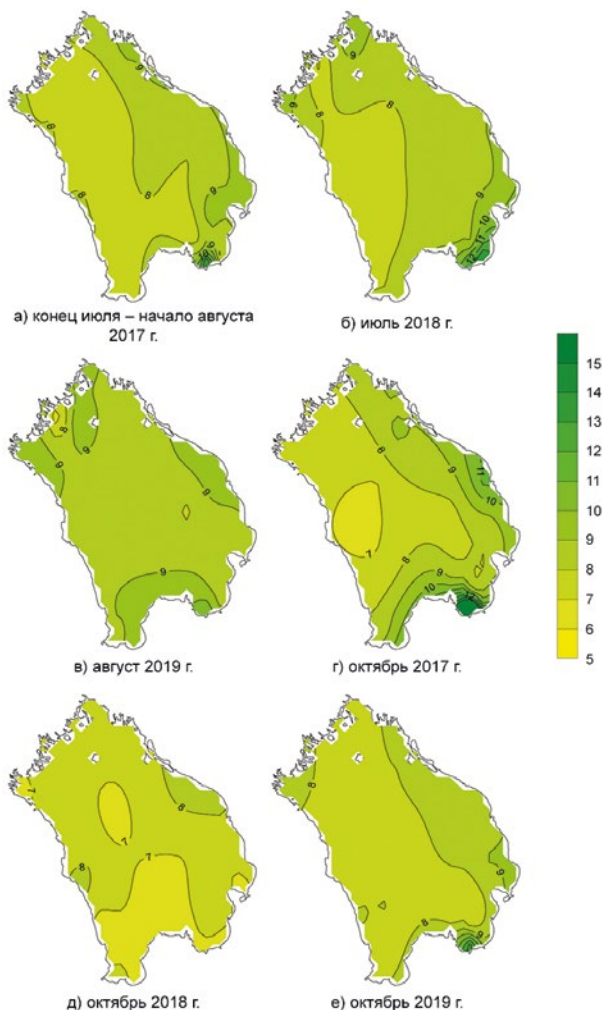


Рис. 8.3.8 – Пространственное распределение средневзвешенных по глубине концентраций общего органического углерода ($\text{мг}\cdot\text{C}/\text{л}$) в разные сезоны 2017–2019 гг.

Благодаря более активному развитию биоты, обычно в воде прибрежной зоны количество лабильного углерода всегда намного выше, чем в других зонах. Высокие концентрации часто отмечаются также в деklinальной зоне. Начиная с осени 2006 г. до весны 2011 г., наблюдалась тенденция увеличения концентрации лабильного углерода и его доли от общего углерода во всех зонах, в том числе глубоководных, не только в поверхностном, но и в придонном горизонте. Наибольшие значения LOC в глубоководных зонах могли составлять 2,0–3,2 $\text{мг}\cdot\text{C}/\text{л}$, а иногда (осенью 2008 г.) они достигали 3,4 $\text{мг}\cdot\text{C}/\text{л}$. При этом весной и осенью наибольшие значения в воде глубоководных зон

часто были такими же или даже выше, чем в воде деклинальной и прибрежной зон. В результате этого в 2008–2011 гг. средние за период открытой воды значения LOC были довольно высокими во всех зонах озера.

Начиная с 2012 г., снижение концентрации лабильного углерода происходит во всех лимнических зонах, однако наиболее сильно оно проявилось в воде глубоководных зон. В результате, высоких значений концентраций лабильного углерода в воде этих зон не отмечалось (рис. 8.3.9). Наиболее заметное снижение содержания LOC по сравнению с предыдущими годами во всех зонах озера происходит в 2016–2018 гг., при этом концентрации изменялись от 0,2 до 2,9 мг·С/л. В воде глубоководных зон значения выше 1,0 мг·С/л почти не встречались, они отмечены только в поверхностном слое воды и были связаны с развитием биоты. В воде прибрежной и деклинальной зон концентрации LOC могли увеличиваться до 2,2–2,9 мг·С/л. В 2019 г. средние за летне-осенний период концентрации LOC в воде глубоководных и деклинальной зон остались на уровне 2018 г., а в воде прибрежной зоны сильно упали, что видно на рис. 8.3.10.

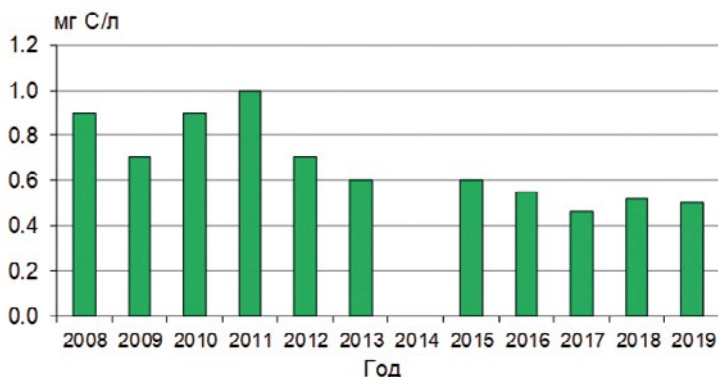


Рис. 8.3.9 – Средние за период открытой воды концентрации лабильного органического углерода в воде Ладожского оз.

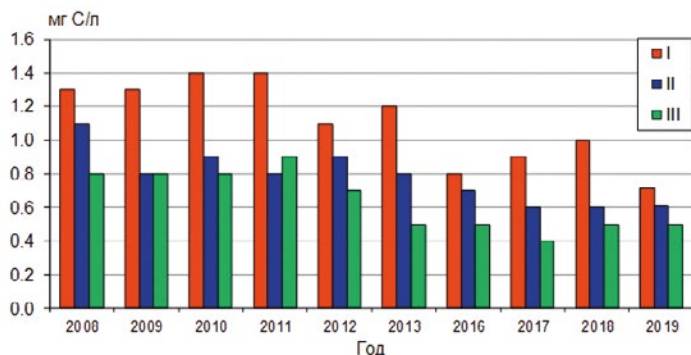


Рис. 8.3.10 – Средневзвешенные за период открытой воды концентрации LOC в лимнических зонах Ладожского оз. Лимнические зоны озера: I – прибрежная, II – деклинальная, III – профундальная + ультрапрофундальная

В 2009–2010 гг. количество лабильного углерода составляло достаточно большую долю от общего углерода, чаще всего это 10–16%, но в некоторых случаях она увеличивалась до 25–27%, а осенью иногда составляла 43%. Увеличение доли лабильного углерода наблюдалось не только в мелководных, но и в глубоководных зонах озера. Например, летом 2010 г. доля лабильного углерода в отдельных случаях по вертикали на станциях глубоководной зоны достигала 20–30%, а в одном случае в глубоководной зоне – до 40% [Петрова, Игнатьева, 2013]. Увеличение доли LOC в воде глубоководной зоны не только в поверхностном слое, но и по всему столбу воды в эти годы говорит о дисбалансе процессов накопления и минерализации органического вещества в экосистеме.

Начиная с 2011 г., доля лабильного углерода постепенно снижается. Весной 2011 г. и летом 2012 г. она в большинстве случаев оставалась в пределах 10–16%, в бухте Петрокрепость весной 2011 г. и в Свирской губе летом 2012 г. не превышала 20%. С 2013 г. это снижение продолжается – в 2013 г., летом 2015 г. и в 2016–2017 гг. в большинстве случаев доля LOC была ниже 10%, при этом максимальная величина ее составляла 16–22%. Доля лабильного углерода выше 10% встречалась только в поверхностном слое воды на глубоководных станциях и на мелководных станциях в прибрежной зоне. По вертикали на станциях в глубоководных зонах доля LOC изменялась от 4 до 9%.

Весной и осенью 2018 г. доля LOC в основном была ниже 10%, только в прибрежной зоне она увеличивалась до 14–24%. Летом доля лабильного углерода 10–16% встречалась на станциях прибрежной и деklinальной зон и в поверхностном слое воды глубоководных зон. Похожая картина сохранилась и в 2019 г. В августе доля LOC в воде глубоководных станций изменялась от 6 до 17% в поверхностном слое воды и от 5 до 8% на остальных, более глубоких горизонтах. В прибрежной и деklinальной зонах она составляла в основном 7–15% в поверхностном горизонте и 6–9% у дна. Выше она была только в Волховской губе – 10–14%, и в Свирской губе – 12–21%. В октябре доля LOC была особенно низкой – практически не превышала 10%, а в большинстве случаев изменялась от 2 до 7%.

Таким образом, после периода достаточно высоких значений концентрации лабильного углерода в озере и значительной его доли в общем содержании органического углерода в последние годы наблюдается снижение содержания LOC во всех зонах озера. Значительного увеличения концентрации лабильного углерода на глубоких горизонтах центральной и северной части озера, которые отмечались в 2006–2010 гг., в последние годы не обнаружено.

8.4 Биогенные элементы

Соединения фосфора. Содержание биогенных элементов определяет биологическую продуктивность водоема. Наиболее часто лимитирующим фактором для развития водных организмов является содержание фосфора, поэтому его количество и характер распределения в водоеме имеют большое значение для функционирования биоты. Избыточное поступление фосфора в водоем ведет к его эвтрофированию и ухудшению качества воды.

Концентрации форм фосфора в воде определялись в соответствии с методиками, разработанными Союзом стандартизации Финляндии (SFS): неорганический фосфор (IP) – спектрофотометрическим модифицированным молибдатным методом Мерфи и Райли с использованием аскорбиновой кислоты в качестве окислителя (SFS 3025); общий фосфор (TP) – окислением органических соединений фосфора персульфатом калия в присутствии серной кислоты с последующим определением фосфатов (SFS 3026).

Естественное состояние поверхностных вод Ладожского бассейна характеризуется небольшим содержанием фосфора. Наиболее низки его концентрации в воде рек северной части бассейна, которые протекают по территориям, сложенным кристаллическими породами. Содержание фосфора постепенно увеличивается по мере продвижения к югу, и наиболее высокие значения наблюдаются в воде рек южной части бассейна. Хозяйственная деятельность на территории водосбора озера вносит свой вклад в содержание фосфора в воде рек и часто приводит к его росту. Существенные различия природных условий и степени антропогенного воздействия отражаются на значениях концентрации фосфора в воде рек Ладожского бассейна (табл. 8.4.1).

Таблица 8.4.1

**Пределы концентраций общего фосфора (мкг·Р/л)
в воде притоков Ладоги и в истоке Невы в разные сезоны 2011–2019 гг.**

Река	Весна	Лето	Осень
Волхов	58–90 (553)	52–132	38–112 (222)
Свирь	12–38	15–27	12–36 (63)
Бурная	13–56 (68)	14–25	11–42
Вуокса	21–31	23–30 (89)	24–37
Янис	11–18	11–19 (42)	8–16 (52)
Тулема	15–63 (99)	12–32	11–43
Видлица	37–58	29–53	28–53
Тулокса	65–106	78–154	63–91
Олонка	62–99	93–132	83–109
Оять	37–56	33–64	42–53
Паша	27–87	20–63	29–78
Сясь	43–114	26–79	36–71
Лава	59–101	66–217	57–130
Назия	65–96	65–122	55–146
Морье	56–157	73–221	78–164
Авлога	246–349	197–482	172–363
Нева	15–44	11–30	12–26 (109)

* В скобках приведены повышенные концентрации, нехарактерные для данной реки

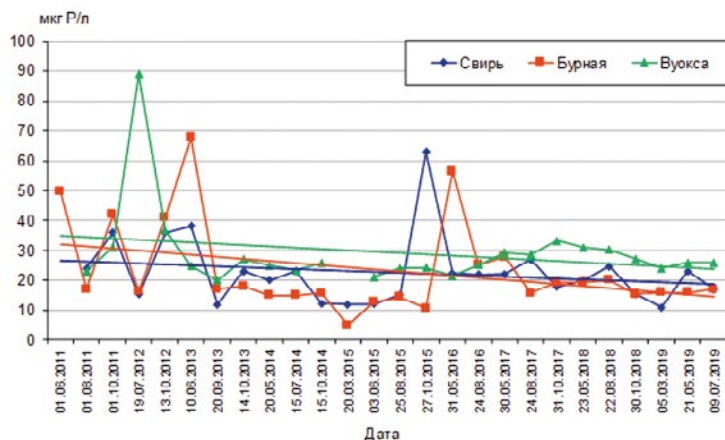


Рис. 8.4.1 – Межгодовые и сезонные изменения концентрации общего фосфора в воде рр. Свирь, Бурная и Вуокса и линии трендов

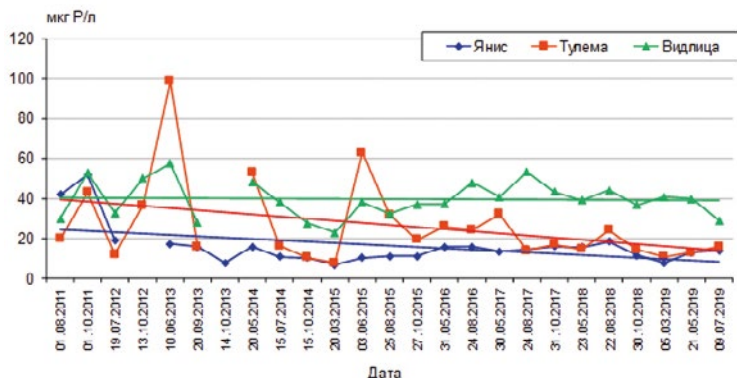


Рис. 8.4.2 – Межгодовые и сезонные изменения концентрации общего фосфора в воде северного и северо-восточных притоков и линии трендов

В силу природных условий, наименьшим содержанием фосфора характеризуется вода рек с большой зарегулированностью стока и высокой озерностью водосборов, к которым относятся два главных притока озера – р. Свирь и р. Бурная (северный рукав – р. Вуокса), а также реки северной (р. Янис) и северо-восточной (рр. Тулема и Видлица) частей бассейна. Концентрация общего фосфора в этих реках невелика и обычно не превышает 50–60 мкг·Р/л, а чаще бывает ниже 30–40 мкг·Р/л, несколько выше ТР в реках Видлица и Тулема. В 2001–2008 гг. содержание общего фосфора в рр. Бурная, Янис и Тулема составляло 12–31 мкг·Р/л, в р. Свирь – 14–60 мкг·Р/л, в р. Видлица – 35–97 мкг·Р/л [Расплетина, 2006; Петрова, Игнатъева, 2013]. На протяжении 2011–2019 гг. в большинстве случаев количество ТР оставалось в пределах многолетних значений. В 2011–2013 гг. в нескольких случаях были зафиксированы концентрации, значительно превышающие средние, в реках Вуокса (89 мкг·Р/л), Янис (42–52 мкг·Р/л) и Тулема (99 мкг·Р/л), при этом содержание ТР изменялось в более широком диапазоне, чем в даль-

нейшем. С конца 2013 г. диапазон ТР становится значительно уже, особенно для рек Вуоксы и Яниса, концентрации только в двух случаях приближаются к максимальным для данной группы рек показателям, а чаще всего, особенно в 2017–2019 гг., они колеблются около нижнего предела значений. Обычно самая низкая концентрация общего фосфора стабильно сохраняется в воде р. Янис. За рассматриваемый период (2011–2019 гг.) для всех вышеперечисленных притоков, кроме р. Видлицы, наблюдается тенденция к незначительному снижению содержания общего фосфора в воде (рис. 8.4.1 и 8.4.2).

Третий главный приток Ладожского оз. – р. Волхов, впадающая в озеро в юго-восточной части бассейна, всегда отличалась высоким содержанием фосфора в воде по сравнению с двумя другими главными притоками. Это обусловлено как особенностями природных условий водосбора, так и значительным поступлением фосфора от антропогенных источников. Большой объем водного стока делает Волхов главным источником поступления фосфора в озеро с водосбора. По данным прошлых лет известно, что он дает примерно 52% от общего поступления ТР с водами притоков. При этом концентрации фосфора в воде реки за многолетний период испытывали значительные колебания. Так, осенью 2005 г. и летом 2006 г. деятельность ОАО «Волховский алюминий» привела к повышению содержания ТР в воде Волхова до 335–380 мкг·Р/л [Расплетина и др., 2006]. В дальнейшем содержание фосфора в сточных водах предприятия сократилось, в результате концентрация ТР в 2007–2008 гг. уменьшилось до 58–76 мкг·Р/л [Петрова, Игнатьева, 2013]. За период 2011–2019 гг. концентрация общего фосфора в воде р. Волхов в основном оставалась в пределах 38–132 мкг·Р/л, демонстрируя очень слабую тенденцию к росту, при этом наблюдалось два периода с высокой концентрацией – в июне 2015 г. и в октябре 2017 г. (рис. 8.4.3). В июне 2015 г. произошло резкое повышение концентрации ТР до 553 мкг·Р/л, которое в 1,5 раза превысило высокое содержание, отмеченное в 2005–2006 гг. В октябре 2017 г. происходит очередное повышение концентрации до 222 мкг·Р/л. Вероятнее всего, это результаты разовых сбросов загрязненных вод от антропогенного источника, которым, как и в предыдущие годы, может быть производство алюминия.

Содержание общего фосфора в воде рек восточного (рр. Тулокса и Олонка) и юго-восточного побережья (рр. Паша, Оять и Сясь) находится преимущественно в диапазоне 80–140 мкг·Р/л, при этом наименьшие значения могут снижаться до 15–40 мкг·Р/л. Водосборы этих рек сложены осадочными породами, для них характерна значительная сельскохозяйственная освоенность территории. Это обуславливает более высокие концентрации общего фосфора в воде по сравнению с реками северной части бассейна. В воде рек Олонка и Тулокса концентрация фосфора обычно несколько выше, чем в реках юго-восточного побережья. За период 2001–2008 гг. содержание ТР изменялось в широких пределах: в реках Олонке и Тулоксе – от 38 до 144 мкг·Р/л, в реках Паша, Оять, Сясь – от 16 до 101 мкг·Р/л [Расплетина и др., 2006; Петрова, Игнатьева, 2013]. Содержание фосфора в воде рр. Тулокса и Олонка в 2011–2019 гг. изменялось в основном в диапазоне 62–154 мкг·Р/л, характерном для этих рек, в р. Тулокса наблюдалась тенденция незначительного роста ТР за эти годы (табл. 8.4.1, рис. 8.4.4).

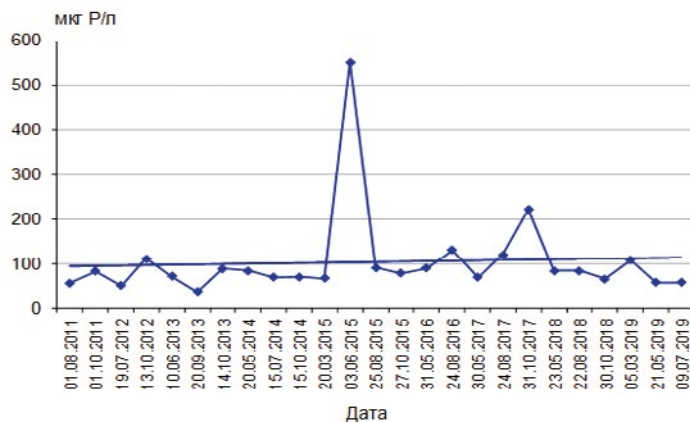


Рис. 8.4.3 – Межгодовые и сезонные изменения концентрации общего фосфора в воде р. Волхов и линия тренда

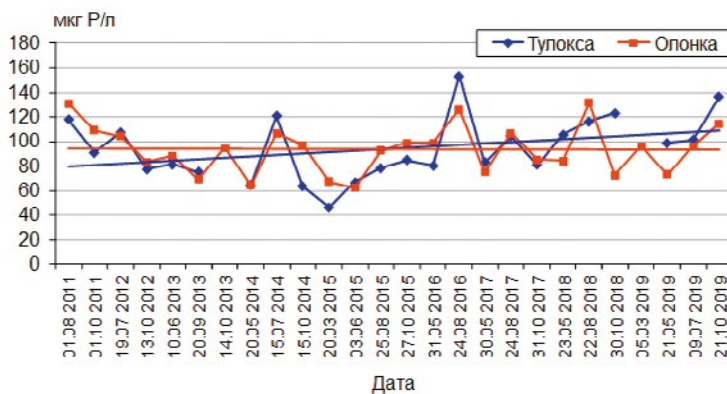


Рис. 8.4.4 – Межгодовые и сезонные изменения концентрации общего фосфора в воде восточных притоков и линии трендов

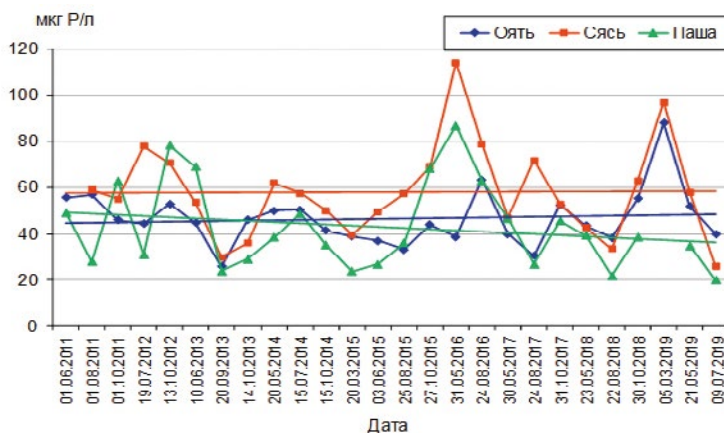


Рис. 8.4.5 – Межгодовые и сезонные изменения концентрации общего фосфора в воде юго-восточных притоков и линии трендов

Содержание общего фосфора в реках Оять, Паша и Сясь в 2011–2019 гг. находилось в пределах 20–114 мкг·Р/л. Наиболее высокие значения характерны для р. Сясь (34–114 мкг·Р/л). Концентрация ТР в двух других реках ниже: в воде р. Оять – 33–64, в р. Паша – 22–87 мкг·Р/л (рис. 8.4.5). Для р. Оять наблюдается незначительный рост концентраций, для р. Паша, напротив, довольно заметное снижение.

Небольшие реки южного побережья Ладожского оз. испытывают наибольшее антропогенное влияние, поэтому содержание общего фосфора в них наиболее высокое среди всех рассмотренных притоков. В результате сбросов хозяйственно-бытовых сточных вод р. Авлога отличается самыми высокими концентрациями ТР среди всех притоков озера и очень широким их диапазоном. Особенно высокое содержание общего фосфора наблюдалось осенью 2001 г. (3250 мкг·Р/л), летом 2003 г. (1700 мкг·Р/л) и летом 2004 г. (1550 мкг·Р/л), в остальных случаях в 2001–2005 гг. концентрации ТР изменялись от 335 до 820 мкг·Р/л [Расплетина и др., 2006]. В 2007 г. концентрация фосфора в Авлоге составляла 380–484 мкг·Р/л [Петрова, Игнатъева, 2013]. В течение периода 2011–2019 гг. прослеживается отчетливая тенденция снижения содержания общего фосфора – в основном концентрации были ниже 200–300 мкг·Р/л, хотя иногда отмечалось повышение до 400–550 мкг·Р/л. Так, в августе 2016 г., вероятно, в результате увеличения поступления из антропогенных источников, произошло очередное резкое увеличение концентрации до 557 мкг·Р/л (рис. 8.4.6).

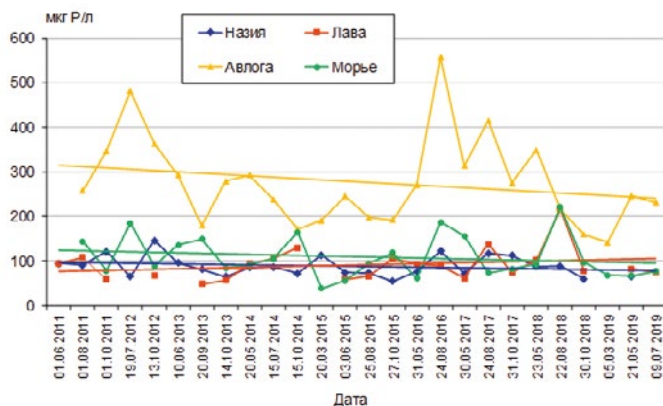


Рис. 8.4.6 – Межгодовые и сезонные изменения концентрации общего фосфора в воде малых притоков южной части водосбора и линии трендов

Содержание общего фосфора в реках Лава, Назия и Морье всегда было намного ниже, чем в р. Авлога. В 2001–2005 гг. в воде р. Морье концентрация ТР изменялась от 90 до 275 мкг·Р/л, в двух других реках – от 44 до 273 мкг·Р/л [Расплетина и др., 2006]. В 2007 г. в р. Морье содержание снизилось до 101–108 мкг·Р/л [Петрова, Игнатъева, 2013]. В 2011–2018 гг. содержание ТР в воде всех этих рек изменялось от 55 до 217 мкг·Р/л, в 2019 г. – оставалось на уровне минимальных значений предыдущего периода (65–82 мкг·Р/л). Среди этих трех рек более высокие значения чаще

относятся к р. Морье. При этом за весь период 2011–2019 гг. в реках Назия и Морье отмечается тенденция слабого снижения содержания общего фосфора, тогда как в реке Лава – слабого увеличения (рис. 8.4.6).

В истоке Невы содержание общего фосфора во многом отражает его содержание в прибрежной зоне Ладожского озера, в бухте Петрокрепость. В 2001–2008 гг. концентрация ТР изменялась от 10 до 25 мкг·Р/л. Наиболее низкие значения были отмечены в 2007–2008 гг. – 12–14 мкг·Р/л, что соответствовало средним значениям для озера [Расплетина, 2006, Петрова, Игнатьева, 2013]. В 2011–2012 гг. концентрации изменялись от 12 до 23 мкг·Р/л, в 2013–2014 гг. встречались более высокие значения – 26–44 мкг·Р/л, а в октябре 2014 г. отмечалось экстремально высокое содержание (109 мкг·Р/л), которое могло быть связано с антропогенным фактором. Начиная с августа 2015 г. диапазон концентраций ТР сузился, при этом концентрации заметно снизились, составляя в 2016–2019 гг. 15–19 мкг·Р/л (рис. 8.4.7).

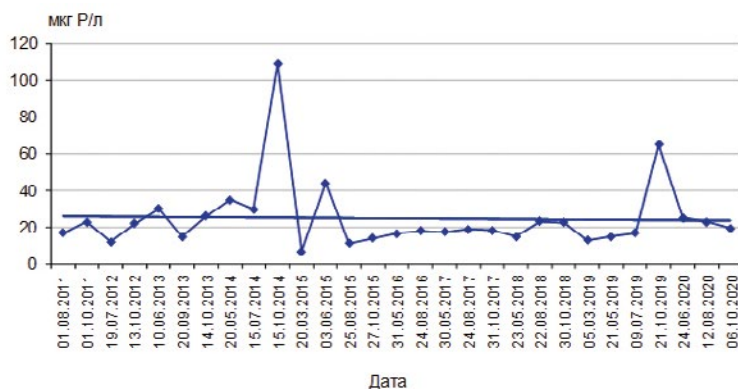


Рис. 8.4.7 – Межгодовые и сезонные изменения концентрации общего фосфора в истоке р. Невы и линия тренда

На основе анализа данных о содержании общего фосфора в воде притоков в период 2011–2019 гг. выявлены незначительные тренды снижения концентраций ТР в воде многих рек – Свири, Бурной, Вуоксы, Яниса, Тулемы, Паши, Авлоги, Назии и Морье. В воде р. Тулоксы наблюдается незначительный рост содержания фосфора, также очень слабый рост отмечается в воде рек Волхов и Лава.

Значительная фосфорная нагрузка на Ладожское оз., связанная с интенсивной хозяйственной деятельностью на его водосборе в начале 70-х гг. прошлого века, привела к антропогенному эвтрофированию и перестройке экосистемы водоема. В этот период в воде озера наблюдались максимальные значения средних концентраций ТР (30 мкг·Р/л). В дальнейшем, в результате снижения поступления фосфора, его концентрация в воде водоема стала уменьшаться. Так, в 1980 г. среднее значение концентрации ТР составляло 27 мкг·Р/л, в 1981–1984 гг. – 23–24 мкг·Р/л, в 1988–1992 гг. – 20–21 мкг·Р/л, в 1993–2002 гг. – 16–18 мкг·Р/л. Исключением стали 1999–2000 гг., когда повышенные концентрации фосфора наблюдались практически по всей ак-

ватории в летний период и среднее значение ТР возросло до 21–22 мкг·Р/л [Расплетина, Сусарева, 2002]. Отчетливый тренд снижения средней за период открытой воды концентрации общего фосфора в озере в период с конца 70-х до начала 2000-х гг. хорошо виден на рис. 8.4.8. Также на рисунке отмечены уровни допустимого (15 мкг·Р/л) и критического (30 мкг Р л⁻¹) для экосистемы озера значений среднегодовых концентраций ТР, которые были установлены в ходе предшествующих исследований [Петрова и др., 1992], и значений, характерных для периода 1959–1962 гг. [Расплетина и др., 1967], когда трофический статус озера оценивался как олиготрофный. Начиная с 2003 г. средневзвешенная за период открытой воды концентрация общего фосфора в озере ни разу не превышала значения допустимой концентрации. В течение 2003–2010 гг. она составляла 11–13 мкг·Р/л, только в 2008 г. отмечалось повышение до 14 мкг·Р/л [Петрова, Игнатьева, 2013]. После 2010 г. средние значения остались на том же уровне. В отдельные годы (2007, 2009, 2011, 2013, 2015 гг.) средняя концентрация ТР снижалась до 10–11 мкг·Р/л, т. е. минимальных значений для всего периода наблюдений, начиная с 1976 г., приближающихся к значениям 1959–1962 гг. (рис. 8.4.8).

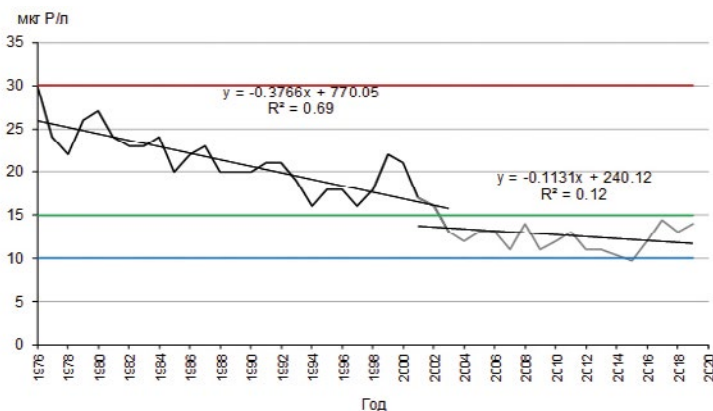


Рис. 8.4.8 – Средняя концентрация общего фосфора в воде Ладожского оз. и уровни концентраций (мкг·Р/л): 10 – наблюдавшаяся в 1959–1962 гг.; 15 – допустимая, 30 – критическая

Следует отметить, что полученные средние концентрации для 2011–2013 и 2015 гг. недостаточно корректны, т. к. наблюдения проводились только весной и летом, но их можно рассматривать в общем ряду результатов наблюдений, поскольку сезонные изменения в содержании общего фосфора выражены неярко. В 2014 г. наблюдения на большей части акватории не проводились.

В последние годы концентрация общего фосфора варьирует в более узком интервале значений. В 1976–1980 гг. максимальные концентрации превышали минимальные почти в 20 раз [Расплетина, Сусарева, 2002], в 2006–2012 гг. в воде прибрежной зоны – в 10 раз, в 2013–2018 гг. – в 6–10 раз. В воде глубоководных зон за последние 10 лет кратность превышения составляла не более, а чаще менее 3 раз. В 2019 г. в прибрежной зоне она достигала 4,5 раза, в других зонах не более двух 2 раз.

Несмотря на снижение концентрации общего фосфора, характерные черты его пространственно-временного распределения по акватории, подробно рассмотренные в предыдущих работах [Гусаков и др, 1987; Расплетина, 1982; 1992; Расплетина, Гусаков, 1988; Расплетина, Сусарева, 2002; Петрова, Игнатьева, 2013], во все годы сохраняются. Изменение содержания фосфора по акватории определяется как неоднородностью его поступления с водосбора, так и гидротермодинамическими условиями в озере. Средние за период открытой воды концентрации общего фосфора в лимнических зонах озера за последние годы представлены на рис. 8.4.9.

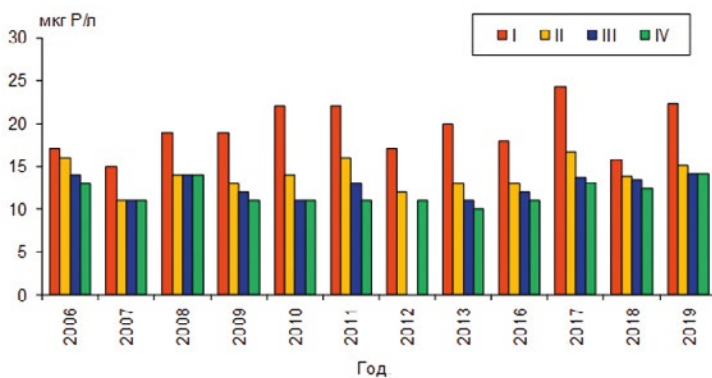


Рис. 8.4.9 – Средние за период открытой воды концентрации общего фосфора в лимнических зонах Ладожского оз. Лимнические зоны озера: I – прибрежная, II – деклинальная, III – профундальная, IV – ультрапрофундальная

В воде прибрежной зоны содержание общего фосфора и, соответственно, средняя за период открытой воды концентрация всегда наиболее высоки. Максимальные значения характерны для Волховской губы, принимающей воды основного поставщика фосфора в озеро – р. Волхов – и богатые фосфором воды р. Сясь, и для Свирской губы. С 2006 по 2016 г. и в 2018–2019 гг. средняя концентрация ТР в прибрежной зоне составляла 15–23 мкг·Р/л. В 2017 г. она выросла до 24 мкг·Р/л за счет значительно возросших концентраций ТР в Волховской губе летом и осенью. В 2013–2019 гг. в воде озера вблизи устья р. Волхов содержание общего фосфора в основном изменялось от 20 до 72 мкг·Р/л, хотя иногда могло быть и ниже 20 мкг·Р/л, однако летом и осенью 2017 г. концентрация его здесь доходила до 89–103 мкг·Р/л. В воде Свирской губы концентрации фосфора обычно ниже, в 2013–2019 гг. в основном они изменялись от 20 до 31 мкг·Р/л, но могли опускаться до 9–18 мкг·Р/л. На других участках прибрежной зоны содержание общего фосфора в 2013–2019 гг. составляло 10–23 мкг·Р/л.

Объем двух глубоководных зон (профундальной и ультрапрофундальной), как уже было отмечено выше, составляет около 80% объема всего озера, поэтому средняя концентрация в воде этих зон определяет среднее содержание общего фосфора в воде озера в целом. Для глубоководных зон озера характерны наиболее низкие значения и узкий диапазон concentra-

ций фосфора. С 2006 г. по 2010 г. средняя за период открытой воды концентрация ТР составляла 11–14 мкг·Р/л [Петрова, Игнатьева, 2013], в 2011 и 2016 гг. она изменялась в пределах 10–13 мкг·Р/л, в 2017–2019 гг. – 12–14 мкг·Р/л.

Средняя за период открытой воды концентрация ТР в воде деклинальной зоны обычно равна или ненамного превышает таковую в воде глубоководных зон. С 2006 по 2018 г. она составляла 11–16 мкг·Р/л, за исключением 2017 г., когда она возросла до 17 мкг·Р/л. Это увеличение было вызвано ростом концентрации в юго-восточной части деклинальной зоны в конце июля 2017 г., где, как было сказано выше, в это время отмечалась очень высокая концентрация общего фосфора в Волховской губе. Характер пространственного распределения ТР по акватории в разные сезоны на примере данных 2016–2018 гг. представлен на рис. 8.4.10. Распределение построено с использованием средневзвешенных по глубине концентраций для каждой станции.

В течение всего периода наблюдений в 2016–2018 гг. наибольшие концентрации фосфора, как обычно, отмечались в воде прибрежной зоны, находящейся под прямым влиянием притоков. Величина концентрации фосфора в Волховской губе часто определяется гидросиноптической обстановкой в озере. При ветрах южных направлений концентрации в первую очередь зависят от влияния Волхова. При ветрах северного направления Волховская губа заполняется водами глубоководной части озера, и концентрации фосфора мало отличаются от среднеозерных, что можно было наблюдать в сентябре 2016 г.

В 2017 г. весенние концентрации во всех зонах озера оставались в пределах значений предыдущих лет. Летом повсеместно отмечался их заметный рост, особенно в прибрежной и деклинальной зонах озера, что связано с очень высокими концентрациями в Волховской губе, о чем говорилось выше. Осенью значительное содержание ТР в Волховской губе сохранилось, в результате чего средние концентрации в прибрежной и деклинальной зонах оставались достаточно высокими.

Сезонные изменения концентрации общего фосфора обычно незначительны. Распределение общего фосфора по вертикали во все сезоны года также достаточно однородно. Летом возможно небольшое повышение его концентрации в верхнем пятиметровом слое, связанное со скоплением сестона. Исключение составляет участок, расположенный непосредственно вблизи устья р. Волхов. Здесь концентрации фосфора в поверхностном и придонном горизонтах могут значительно отличаться в зависимости от того, каким образом распределяются богатые фосфором волховские воды. Например, в августе 2015 г., в июле 2017 г. и в июне 2018 г. концентрация фосфора в поверхностном слое воды была заметно выше, чем в придонном, в то же время, в октябре 2017 г. и в июле 2018 г. наблюдалась обратная картина.

Неорганический (минеральный) фосфор является доступной для потребления биотой формой фосфора. Для него, так же, как и для общего фосфора, за весь период наблюдений с 1976 г. наблюдается отчетливый тренд снижения средних за период открытой воды концентраций в воде озера (рис. 8.4.11).

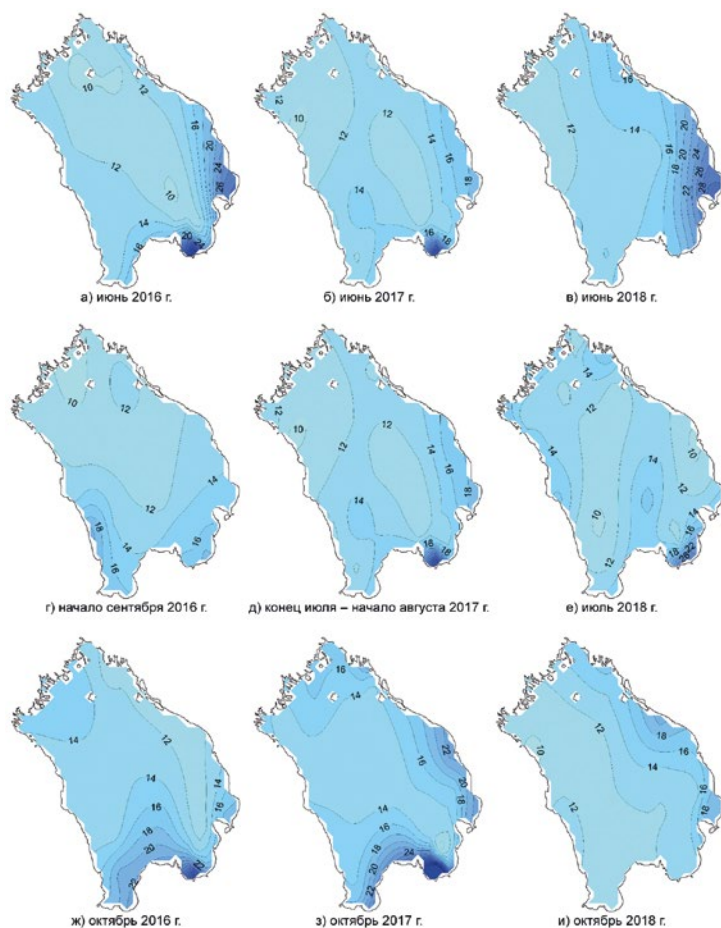


Рис. 8.4.10 – Пространственное распределение средневзвешенных по глубине концентраций общего фосфора (мкг Р/л) в разные сезоны 2016–2018 гг.

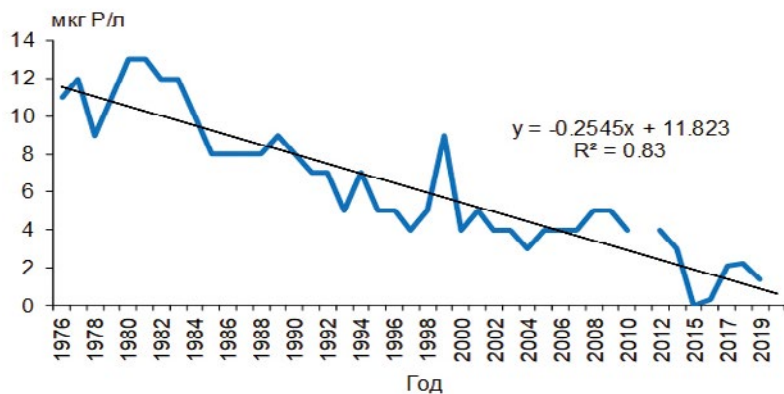


Рис. 8.4.11 – Средние за период открытой воды концентрации неорганического фосфора в воде Ладожского оз.

В 1956–1962 гг. среднегодовое содержание неорганического фосфора в озере составляло $3 \text{ мкг} \cdot \text{Р/л}$ [Расплетина, 1967], в 1976–1989 гг. оно выросло до $11 \text{ мкг} \cdot \text{Р/л}$. К 1998 г. произошло его плавное снижение с 9 до $5 \text{ мкг} \cdot \text{Р/л}$, и в 2000–2012 гг. средние концентрации IP не превышали $5 \text{ мкг} \cdot \text{Р/л}$ [Расплетина, Сусарева, 2002; Петрова, Игнатъева, 2013], в 2013 г. наблюдалось дальнейшее снижение до $3 \text{ мкг} \cdot \text{Р/л}$. В 2016 г. средняя концентрация неорганического фосфора резко упала – до $0,3 \text{ мкг} \cdot \text{Р/л}$, благодаря тому, что летнее содержание IP в озере было ниже предела обнаружения. В 2017 и 2018 гг. потребление минерального фосфора в летний период оказалось ниже, чем в 2016 г., в результате средняя за период открытой воды концентрация вновь возросла до $2 \text{ мкг} \cdot \text{Р/л}$. В августе 2019 г. практически повторилась картина, которая наблюдалась летом 2016 г., поэтому среднее за летне-осенний сезон значение IP опять снизилось до $1 \text{ мкг} \cdot \text{Р/л}$. Если с 2000 по 2010 г. изменения средних за период открытой воды концентраций минерального фосфора происходили в узком диапазоне от 4 до $5 \text{ мкг} \cdot \text{Р/л}$, то в последние годы этот диапазон значительно расширился.

В 60-е годы прошлого века, когда Ладожское оз. представляло собой низкопродуктивный олиготрофный водоем, а среднегодовое содержание минерального фосфора составляло $3 \text{ мкг} \cdot \text{Р/л}$, фосфор являлся фактором, лимитирующим развитие планктона [Расплетина, 1982]. Среднее содержание общего фосфора после 2003 г. приблизилось к значениям 1956–1962 гг., при этом среднегодовое количество неорганического фосфора после 2013 г. оказывалось ниже $3 \text{ мкг} \cdot \text{Р/л}$, что в условиях мезотрофной стадии развития водоема должно лимитировать развитие биоты и приводить к снижению продуктивности.

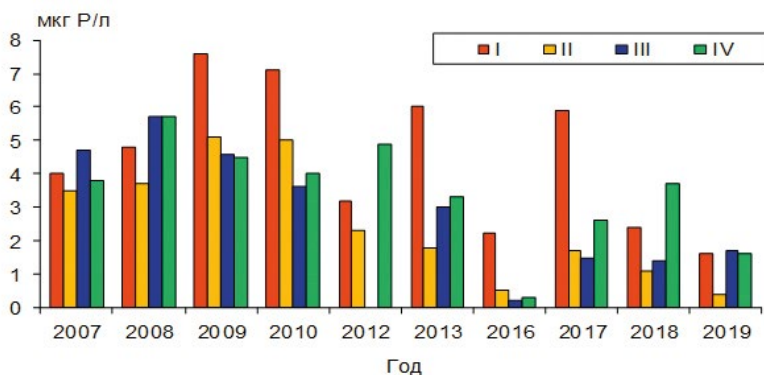


Рис. 8.4.12 – Средние концентрации неорганического фосфора в лимнических зонах Ладожского оз. Лимнические зоны озера: I – прибрежная, II – деклиная, III – профундальная, IV – ультрапрофундальная

Поскольку концентрация неорганического фосфора в значительной степени определяется его потреблением биотой, для его пространственного распределения не наблюдается столь же характерная картина, как для общего фосфора, с более высокими значениями в воде прибрежной и, частично, деклиной зон. Изменение среднего содержания IP в лимнических зонах

озера представлено на рис. 8.4.12. Сезонные колебания содержания неорганического фосфора также зависят от соотношения интенсивности процессов фотосинтеза и биохимического окисления органических веществ (рис. 8.4.13).

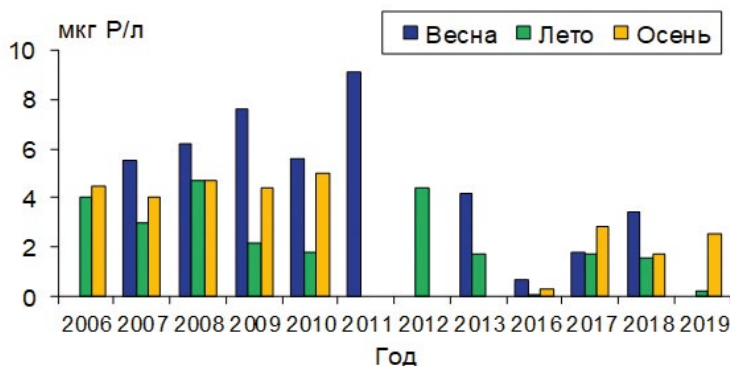


Рис. 8.4.13 – Сезонная динамика средних концентраций неорганического фосфора в воде Ладожского оз.

Предыдущие исследования позволили выделить четыре периода изменения озерной экосистемы за 1976–1989 гг. [Петрова и др., 1992], в которые пространственно-временное распределение минерального фосфора претерпевало значительные количественные изменения. В 1976–1980 гг., в период самых высоких за весь период наблюдений концентраций фосфора в озерной воде, количество минерального фосфора периодически снижалось до аналитического нуля только летом в трофогенном слое. В течение второго периода (1981–1983 гг.), при заметном снижении концентрации общего фосфора в основном за счет уменьшения максимальных величин, средняя концентрация минерального фосфора летом в трофогенном слое не опускались ниже 4–8 мкг·Р/л, т. е. интенсивность его круговорота снизилась. В третий период, 1984–1986 гг., продолжалось постепенное снижение концентрации общего фосфора (до 23 мкг·Р/л) и сохранялось стабильное содержание минерального фосфора летом, не снижавшееся до аналитического нуля, возможно, за счет интенсивной регенерации его в процессе деструкции. В четвертый период (1986–1989 гг.) средняя концентрация общего фосфора снизилась до 20–21 мкг·Р/л, среднее содержание минерального составило 8–9 мкг·Р/л, заметно ниже стало содержание минерального фосфора весной в глубоководных зонах озера, а летом снова стало наблюдаться падение его концентрации в трофогенном слое до аналитического нуля, что свидетельствовало об увеличении напряженности его круговорота.

Продолжая рассматривать дальнейшие изменения в содержании фосфора в воде озера, можно выделить еще три периода. Первый – с 1990 по 2002 г., когда средняя концентрация общего фосфора уменьшилась с 20 до 16 мкг·Р/л, а минерального снизилась до 4–5 мкг·Р/л. Второй, начиная с 2003 г. и до 2009 г., когда средняя концентрация общего фосфора впервые оказывается ниже допустимого для озера значения 15 мкг·Р/л, при этом средняя

концентрация минерального фосфора остается на уровне 4–5 мкг·Р/л. В эти годы сезонное распределение минерального фосфора было схожим с таковым в период 1986–1989 гг. Весной в прогретых водах прибрежной зоны, а летом также и в эпилимнионе, его концентрация в результате потребления биотой часто оказывалась ниже аналитического нуля при сохранении более высоких значений в гипolimнионе. Третий этап начинается с 2010 г., когда среднее содержание общего фосфора лежит в пределах 10–14 мкг·Р/л, а среднее содержание минерального после 2013 г. становится ниже 3 мкг·Р/л. При этом во все сезоны содержание минерального фосфора часто бывает ниже предела обнаружения не только в эпилимнионе, но и в гипolimнионе глубоководных зон. Отмечено, что в последние годы минимальные значения неорганического фосфора фиксируются не в поверхностном слое воды, как это обычно было в предыдущие годы, а в основном на горизонте 10, иногда 25 м. Обычно осенью содержание фосфатов остается на уровне средних летних значений или возрастает и выравнивается по вертикали. В то же время осенняя вспышка развития фитопланктона может привести к снижению его содержания, вплоть до почти полного потребления в трофическом слое на значительных участках озера.

Необычайно низкие концентрации минерального фосфора во все сезоны наблюдались в озере в 2016 г. (рис. 8.4.12 и 8.4.13). В июне 2016 г. заметное его количество отмечалось только в воде Волховской губы, где также было достаточно высокое содержание общего фосфора. В устье Волхова концентрация IP составила 31,3 мкг·Р/л, в устье Сяси 2,0–10,7 мкг·Р/л. В других частях акватории, в том числе и в глубоководных зонах, в большинстве случаев минеральный фосфор оказался ниже или на пределе обнаружения. На тех станциях, где он был обнаружен, концентрация изменялась от 0,1 до 3,6 мкг·Р/л, при этом на горизонтах 5 и 10 м она была ниже предела обнаружения. В сентябре 2016 г. впервые количество минерального фосфора оказалось ниже предела обнаружения практически во всех отобранных пробах воды. В октябре характер его распределения был близок к полученному в июне. В 2017–2018 гг. содержание IP во все сезоны выросло, при этом летние значения приблизилась к таковым, наблюдавшимся в 2010 и 2013 гг., хотя весенние и осенние концентрации оказались все же значительно ниже, чем в предыдущие годы. Летом 2019 г. повторилась картина, наблюдавшаяся в июне и августе 2016 г. (рис. 8.4.12 и 8.4.13). На большинстве станций концентрация минерального фосфора была ниже аналитического нуля по всему столбу воды. В глубоководных зонах минеральный фосфор был обнаружен только на 3 станциях в придонном горизонте в концентрациях 0,2–4,1 мкг·Р/л. В мелководной части озера небольшое количество минерального фосфора присутствовало в Волховской губе (1,2 мкг·Р/л), в Свирской губе (0,5–3,2 мкг·Р/л) и около западного берега (0,2–2,2 мкг·Р/л). В октябре 2019 г. количество минерального фосфора возросло во всех лимнических зонах, и его распределение соответствовало характерному для осеннего сезона, все же в отдельных случаях минимальные значения наблюдались на глубине 10 и 25 м, а в единичном случае – на глубине 50 м.

Таким образом, после 2010 г. наметились изменения в режиме минерального фосфора, связанные с его более интенсивным потреблением. Прак-

тически полное потребление минерального фосфора не только в воде прибрежной зоны и в эпилимнионе, но и в гипolimнионе глубоководных зон озера, впервые заметно проявившееся в 2010 г., отмечается и в настоящее время, хотя в 2017–2018 гг. оно было выражено слабее, чем в 2016 г. и летом 2019 г. Можно предположить, что недостаток минерального фосфора в настоящее время может сказываться на развитии биоты.

Соединения азота. Другим важным биогенным элементом, необходимым для функционирования экосистемы озера, является азот. Содержание нитритов в пробах воды определялось фотоколориметрическим методом с реактивом Грисса; нитратов – тем же методом после восстановления NO_3^- до NO_2^- на кадмиевом редуторе; общего азота (TN) – тем же методом, что и нитратов, после окисления органического азота персульфатом калия в щелочной среде.

Концентрация общего азота в воде притоков озера значительно превышает содержание общего фосфора. В основном, концентрации TN в воде большинства основных притоков лежат в диапазоне 500–850 мкг·N/л (табл. 8.4.2). Межгодовые и сезонные изменения содержания общего азота обычно невелики, однако в июне и августе 2015 г. в реках Паша и Сясь его содержание повысилось до 1080–1720 мкг·N/л, в августе 2016 г. стало еще выше – 1880 мкг·N/л в р. Паша и 1910 мкг·N/л в р. Сясь. Также повышенная концентрация (1030 мкг·N/л) в августе 2016 г. наблюдалась в р. Тулокса. Вероятно, это было связано с дождевыми паводками во время отбора проб.

Повышенное содержание общего азота свойственно воде р. Волхов, концентрации здесь обычно выше 800 мкг·N/л. В периоды наблюдений 2001–2005 гг. и 2007–2011 г. они изменялись, соответственно, от 980 до 1640 мкг·N/л и от 840 до 1220 мкг·N/л [Расплетина и др., 2006; Петрова, Игнатъева, 2013]. В 2012–2018 гг. они лежали в пределах 710–1490 мкг·N/л, при этом наиболее низкие концентрации (710–900 мкг·N/л) в р. Волхов отмечались в 2013 г.

Таблица 8.4.2

Концентрации общего азота (мкг·N/л) в воде притоков и в истоке Невы в разные годы

Река	Год						
	2011–2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Волхов	880–1260	710–900	810–1000	770–1490	900–1370	920–1230	900–1380
Свирь	590–830	590–790	490–700	610–740	650–690	600–710	670–710
Бурная	470–690	490–530	510–580	400–560	530–680	500–700	490–620
Вуокса	690–830	580–690	540–690	590–670	600–800	690–780	620–740
Янис	710–810	490–600	590–610	670–700	660–690	610–690	680–760
Тулема	640–800	790–950	480–720	710–880	700–780	630–790	690–810
Видлица	730–840	570–620	500–690	730–860	760–830	570–800	700–800
Тулокса	710–890	630–700	640–800	790–900	890–1030	580–870	780–900
Олонка	760–870	540–570	660–740	830–920	820–940	630–850	690–890
Оять	590–680	480–620	490–660	570–790	610–740	590–670	620–710
Паша	640–770	490–580	570–890	800–1720	850–1880	690–940	790–1000

Река	Год						
	2011–2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Сясь	710–830	560–690	660–800	890–1080	830–1910	720–780	810–900
Лава	1740–1920	1100–1670	1100–1940	980–1190	1200–1780	1140–2060	1030–1320
Назия	1130–2420	870–1330	830–1720	900–1310	1080–2000	1490–2170	940–1960
Морье	970–1340	1120–1370	1190–1360	1140–1380	1370–3160	1090–1900	1120–1960
Авлога	1670–3400	910–1650	950–1420	2170–3000	1490–3400	1770–4180	1990–2260
Нева	490–640	570–610	560–700	540–610	640–680	530–600	540–630

Еще более высокие концентрации общего азота характерны для вод малых южных притоков. В реках Лава, Назия и Морье содержание TN, как правило, превышает 900 мкг·N/л и может достигать до 2000–3000 мкг·N/л. Особенно высокие концентрации, максимальные значения которых в предыдущие годы в отдельных случаях могли достигать 4900–7000 мкг·N/л, характерны для р. Авлоги [Расплетина и др., 2006; Петрова, Игнатьева, 2013], что является следствием существенного загрязнения вод этой реки. В период 2011–2018 гг. содержание общего азота в этой реке изменялось от 910 до 4180 мкг·N/л.

Диапазон концентраций азота в воде рек водосбора значительно уже, чем у фосфора, максимальные концентрации в воде основных притоков превышают минимальные примерно в 2 раза, с учетом малых рек южного побережья – в 8 раз. Концентрации общего азота в воде зарегулированных рек мало отличается от таковых в воде большинства остальных притоков. Содержание общего азота в истоке р. Невы отражает концентрации, характерные для основной водной массы Ладожского оз., которые составляют 500–600 мкг·N/л. В предшествующий период наблюдений (2001–2005 гг. и 2007–2008 гг.) содержание TN изменялось от 500 до 730 мкг·N/л [Петрова, Игнатьева, 2013], в 2011–2018 гг. оставалось на уровне значений предыдущих лет и составляло 490–700 мкг·N/л.

В течение последних десяти лет (после 2010 г.), в отличие от предыдущего периода наблюдений, заметных изменений в содержании соединений азота в воде Ладожского оз., какие были отмечены для фосфора, не произошло. Максимальные значения превышают минимальные примерно в 1,5 раза. Во временном тренде, включающем весь период исследования, прослеживается незначительное снижение средней за период открытой воды концентрации общего азота (рис. 8.4.14). В 2011–2015 гг. были проведены только весенние и летние наблюдения, поэтому средние значения в эти годы следует считать приблизительными. В 2014 г. наблюдения на большей части акватории не проводились.

Как видно из рис. 8.4.14, наибольшие для периода открытой воды средние концентрации TN (700–760 мкг·N/л) наблюдались в начале 80-х и в конце 90-х годов прошлого века, а наименьшие (540–580 мкг·N/л) отмечены в конце 80-х и в середине 90-х годов [Расплетина, Сусарева, 2002]. В 2000–2005 гг. они изменялись от 600 до 660 мкг·N/л, в 2009–2010 гг. – от 570 до 580 мкг·N/л [Петрова, Игнатьева, 2013]. После относитель-

но низких среднегодовых значений в 2009–2013 гг. (570–600 мкг·N/л) в 2015–2018 гг. отмечено их повышение до 650 мкг·N/л.

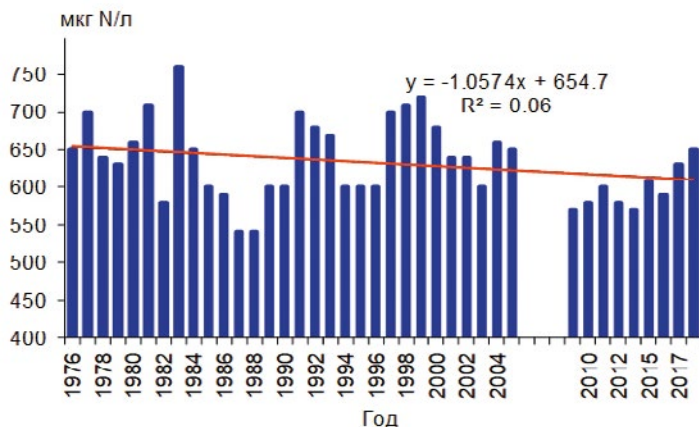


Рис. 8.4.14 – Средневзвешенные концентрации общего азота в воде Ладожского оз. за период открытой воды

Таблица 8.4.3

Среднее содержание и пределы концентраций общего (TN) и нитратного (NO_3^-) азота в воде Ладожского оз. (мкг·N/л)

Год	Сезон	TN	NO_3^-
2013	Весна	<u>583</u> 520–700 (780)	<u>259</u> 120–430
	Лето	<u>550</u> 440–650	<u>203</u> 50–314
2015	Лето	<u>600</u> 540–680 (740)	<u>208</u> 89–282
2016	Весна	<u>630</u> 550–880	<u>285</u> 157–355
	Лето	<u>620</u> 540–700 (720)	<u>224</u> 118–261
	Осень	<u>540</u> 490–670 (740)	<u>254</u> 180–275
2017	Весна	<u>580</u> 540–660 (720)	<u>263</u> 148–306
	Лето	<u>640</u> 480–790	<u>289</u> 120–338
	Осень	<u>660</u> 620–710	<u>278</u> 195–322
2018	Весна	<u>690</u> 580–790	<u>240</u> 184–278
	Лето	<u>630</u> 560–760	<u>220</u> 160–282
	Осень	<u>630</u> 590–760	<u>230</u> 189–274

* Над чертой – средневзвешенные концентрации; под чертой – предельные концентрации; в скобках – концентрация в Волховской губе

Распределение общего азота в воде озера достаточно однородно как в пространственном, так и в сезонном отношении. На протяжении всего предыдущего периода наблюдений более высокие концентрации азота фиксировались в воде Волховской губы. Так, в 2006–2008 гг. концентрация TN достигала здесь 920–1230 мкг·N/л, в 2010–2012 гг. отмечено снижение до 710–810 мкг·N/л, в 2013–2018 гг. на участке, находящемся под влиянием волховских вод, содержание общего азота составляло 450–830 мкг·N/л. В 2016 г. повышенные значения TN отмечались также в Свирской губе – 770–880 мкг·N/л. На остальной акватории в пределах прибрежной зоны содержание общего азота в эти годы изменялось от 440 до 790 мкг·N/л.

Неорганический азот находится в воде озера преимущественно в форме нитратов (NO_3^-). С начала 60-х до конца 70-х годов прошлого века среднегодовая концентрация нитратного азота в воде озера увеличилась со 150 до 230 мкг·N/л [Расплетина, Сусарева, 2002] и с тех пор остается на том же уровне. Весной 2011 г. средняя концентрация в озере составила 277 мкг·N/л, летом 2012 г. – 206 мкг·N/л [Петрова, Игнатьева, 2013]. В 2013–2018 гг. средние значения составляли весной 240–285 мкг·N/л, летом – 203–289 мкг·N/л, осенью 230–278 мкг·N/л. Азот нитратов составлял в 2013–2018 гг. от 11 до 62%, в среднем около 31–38%, от общего содержания азота. Пределы изменения концентрации NO_3^- в воде озера в разные сезоны и средневзвешенные значения представлены в табл. 8.4.3. Снижение концентрации нитратного азота до 50–90 мкг·N/л, связанное с его потреблением биотой, может происходить в прибрежной зоне весной и летом во всей водной толще, в дефлюальной и глубоководных зонах – в прогревом поверхностном слое, при сохранении более высоких весенних значений в гипolimнии.

Повышенное содержание нитритов (NO_2^-) в водоеме свидетельствует об усилении процессов разложения органических веществ в условиях более медленного окисления NO_2^- в NO_3^- , что указывает на загрязнение водного объекта. Поэтому содержание нитритов является важным санитарным показателем. К началу 80-х годов прошлого века незначительное количество нитритов (до 9 мкг·N/л) обнаруживалось в воде озера только летом в период наибольшей интенсивности продукционно-деструкционных процессов [Расплетина, 1982]. По данным наблюдений, проведенных в 2005–2008 гг. [Петрова, Игнатьева, 2013] и в 2013 г., нитриты в воде озера практически не обнаруживались. В большинстве случаев их содержание в 2013 г. было ниже аналитического нуля, и лишь в нескольких пробах оно составляло 2–10 мкг·N/л.

8.5 Взвешенные вещества

Большая часть поступающих в Ладожское оз. с водосбора взвешенных веществ приносится водами рек. Результаты исследования режима взвешенных веществ в 2003–2008 гг. представлены в ряде работ [Расплетина и др., 2006; Петрова, Поздняков, 2013]. В 2011–2019 гг. наблюдения были продолжены, они охватывали 16 притоков озера, среди которых три главных – рр. Свирь, Бурная с северным рукавом р. Вуоксой и Волхов, основные притоки северного (р. Янис), северо-восточного (рр. Тулема, Видлица, Тулокса) и юго-восточного (рр. Олонка, Оять, Паша и Сясь) побережий,

четыре малых притока южной части водосбора (рр. Морье, Авлога, Лава и Назия), кроме того, наблюдения проводились в истоке р. Невы.

Содержание общей взвеси в воде притоков Ладожского оз. изменяется в очень широком диапазоне – от 100 мг/м^3 до десятков г/м^3 , отчетливых сезонных и межгодовых закономерностей не прослеживается. В основном количество взвеси в воде зависит от конкретных условий, предшествующих отбору проб (дождевые паводки, летняя межень, интенсивность развития фито- и зоопланктона, наличие растительных остатков т.д.). Большое влияние на количество взвеси оказывают дождевые паводки, благодаря которым ее количество может резко возрасти. За рассматриваемый период наблюдений на притоках озера резкое увеличение взвешенных веществ, вызванное с паводками, наблюдалось, например, осенью 2012 г., летом и осенью 2015 г. и в августе 2016 г. В силу природных условий для содержания взвеси, как и для многих гидрохимических показателей, характерно увеличение от северных притоков к южным.

Наименьшее количество взвеси характерно для зарегулированных рек с высокой озерностью водосборов, к которым относятся рр. Свирь и Бурная (северный рукав – р. Вуокса), а также р. Янис, и для рек северо-восточной части бассейна – Тулемы и Видлицы. В воде этих рек сезонные изменения концентрации взвеси обычно незначительны, хотя можно отметить, что наиболее низкие значения наблюдаются в зимний период. В воде притоков восточного, юго-восточного и южного побережий количество взвешенных веществ намного выше, при этом диапазон концентраций достаточно широк.

Среди главных притоков наименьшее количество взвеси характерно для рек Бурной и Вуоксы, далее следует р. Свирь. Концентрация взвеси в воде этих рек в 2011–2019 гг. изменялась в основном от 0,5 до $6,7 \text{ г/м}^3$. Периодически фиксировались и более высокие значения, например, в июле 2012 г. и в августе 2015 г., когда содержание взвеси в воде р. Бурной составляло, соответственно, $14,5 \text{ г/м}^3$ и $8,1 \text{ г/м}^3$, а в мае 2014 г. и в октябре 2015 г. концентрация взвеси в р. Свири была, соответственно, $10,3 \text{ г/м}^3$ и $24,0 \text{ г/м}^3$.

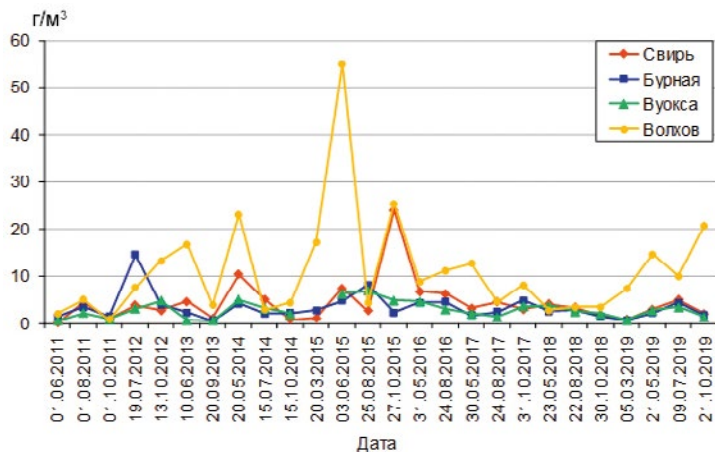


Рис. 8.5.1 – Межгодовые и сезонные изменения содержания взвешенных веществ в воде главных притоков Ладожского оз. в 2011–2019 гг.

Среди главных притоков р. Волхов отличается, как правило, большим количеством взвеси и более широким диапазоном ее концентрации. За время наблюдений 2011–2018 гг. концентрация взвеси в воде Волхова изменялась в основном от 0,8 до 25,4 г/м³. Очень высокие значения – 55,0 г/м³ были отмечены в июне 2015 г., а в 2018 г. содержание взвеси постоянно было низким. В 2019 г. количество взвешенных веществ в воде Волхова было выше, чем в 2016–2018 гг., изменяясь от 7,5 г/м³ в марте до 20,7 г/м³ в октябре. Рис. 8.5.1 иллюстрирует межгодовые изменения в содержании взвешенных веществ в воде главных притоков в период 2011–2019 гг.

Содержание взвеси в воде северного (р. Янис) и северо-восточных (рр. Тулема, Видлица и Тулокса) притоков часто составляет менее 5 г/м³ и близко к содержанию в реках Бурной и Вуоксе (рис. 8.5.2). Как правило, наиболее низкие концентрации характерны для рр. Янис и Тулема, в 2011–2019 гг. они изменялись в основном от 0,3 до 4,9 г/м³ в р. Янис и от 0,1 до 33 г/м³ в р. Тулема, более высокие значения встречались в единичных случаях. В воде р. Видлицы концентрации выше 5,0 г/м³ встречаются чаще, содержание взвеси в эти годы изменялось от 0,2 до 8,6 г/м³. Наиболее высокое, с широким интервалом значений, содержание взвешенных веществ характерно для р. Тулоксы, в основном концентрации изменялись здесь от 0,2 до 10,0 г/м³. Однако во время дождей содержание взвеси в этой реке может существенно повышаться, как это было в июне 2015 г. (11,9 г/м³), а также в августе 2016 г., когда было отмечено наибольшее количество взвеси (16,3 г/м³), что приблизило р. Тулоксу по данному показателю к юго-восточным притокам озера.

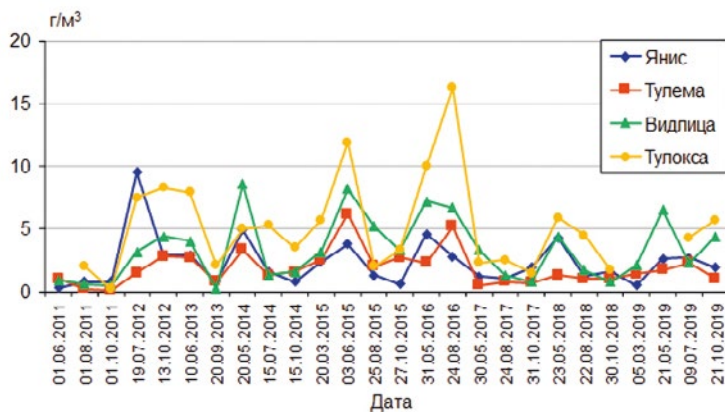


Рис. 8.5.2 – Межгодовые и сезонные изменения содержания взвешенных веществ в воде северного и северо-восточных притоков Ладожского оз. в 2011–2019 гг.

Количество взвешенных веществ в воде рек восточной и юго-восточной частей водосбора (рр. Олонка, Оять, Паша и Сясь) обычно выше, а разброс значений больше, чем в реках северной части бассейна. В большинстве случаев концентрации находятся в пределах от 1 до 10 г/м³, хотя в межень могут понижаться до 0,1 г/м³ или в дождливый период повышаться до 20–30 г/м³. Так, в р. Паше в октябре 2017 г. количество взвеси составляло 37,2 г/м³, в р. Оять повышенная концентрации (25,8 г/м³) отмечалась в июне 2015 г.

В р. Олонке в июне 2015 г. также наблюдалось очень высокое содержание взвеси, максимальное для всех рек в рассматриваемый период. Как отмечалось выше, большое содержание взвеси в это время обусловлено дождевым паводком. В 2017–2019 гг. концентрация взвеси в этих реках была невысокой, значительно ниже значений, встречавшихся в 2015–2016 гг. (рис. 8.5.3).

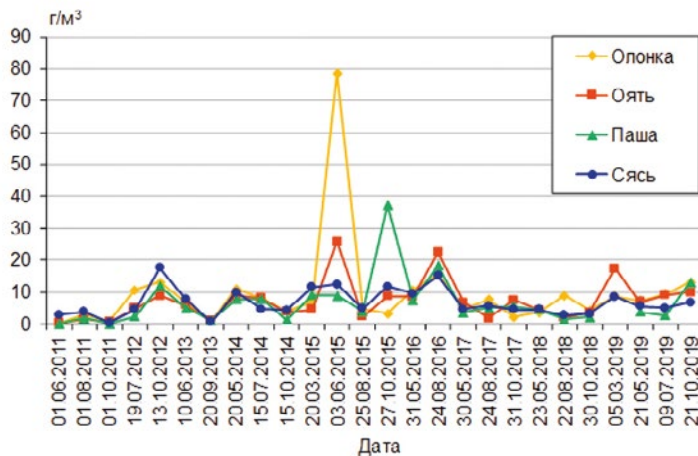


Рис. 8.5.3 – Межгодовые и сезонные изменения содержания взвешенных веществ в воде восточных притоков Ладожского оз. в 2011–2019 гг.

Для вод малых притоков чаще всего характерны повышенные концентрации взвешенных веществ и широкий интервал значений. В 2011–2019 гг. содержание взвеси в этих реках изменялось от 0,4 до 37,0 г/м³. Дождевые паводки наиболее заметно сказываются на увеличении количества взвеси в малых реках. В 2018–2019 гг. отмечено сужение диапазона концентраций взвеси по сравнению с периодом 2011–2017 гг. (рис. 8.5.4).

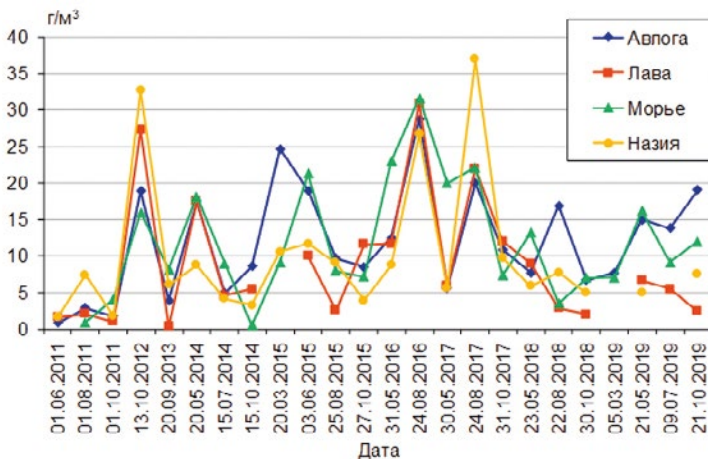


Рис. 8.5.4 – Межгодовые и сезонные изменения содержания взвешенных веществ в воде малых южных притоков Ладожского оз. в 2011–2019 гг.

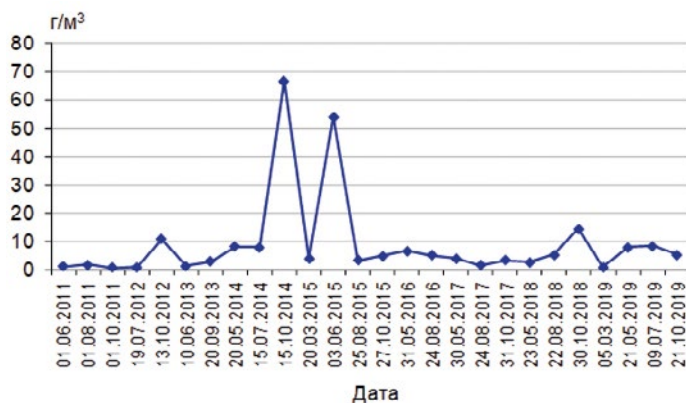


Рис. 8.5.5 – Межгодовые и сезонные изменения содержания взвешенных веществ в истоке р. Невы в 2011–2019 гг.

Количество взвешенных веществ в истоке р. Невы обычно соответствует ее содержанию в воде бухты Петрокрепость, которое в 2003–2018 гг. в основном составляло от 0,3 г/м³ до 6,3 г/м³, при средней концентрации 1,8 г/м³. Динамика концентрации взвеси в истоке р. Невы представлена на рис. 8.5.5. В 2011–2019 гг. количество взвешенных веществ в истоке Невы в большинстве случаев изменялось от 0,8 до 10,8 г/м³. В октябре 2014 г. и в июне 2015 г. было отмечено экстремально высокое для реки содержание взвеси – соответственно, 66,7 г/м³ и 54,2 г/м³. Это могло быть связано с ветровым взмучиванием верхнего слоя донных отложений в бухте Петрокрепость непосредственно перед отбором проб.

Постоянные наблюдения за пространственно-временной динамикой содержания взвешенных веществ в воде Ладожского оз. проводились Институтом озераведения РАН с 1976 по 1993 г. и с 2003 г. по настоящее время. Выявленные закономерности в распределении и количестве содержащейся в озере взвеси в период до 2010 г. были подробно описаны в ряде работ [Егоров и др., 1982; Юдин, 1987; 1992; Петрова, Поздняков, 2013; Юдин, Петрова, Атлас..., 2015]. Поскольку основные черты характера этого распределения сохраняются на протяжении всего периода наблюдений, в настоящей работе основное внимание уделено изменению количественных показателей содержания взвеси, произошедших в период 2011–2019 гг.

Характерные для Ладожского оз. резкие контрасты в распределении взвеси объясняются сезонными факторами и природой их формирования. Образование взвеси в центральном и северном глубоководных районах озера происходит в основном летом за счет продуктов жизнедеятельности фито- и зоопланктона, поэтому доля органической взвеси здесь может достигать 90%. В прибрежной мелководной зоне в формировании пула взвешенных веществ большую роль также играют воды притоков, поверхностно-склоновый сток и взмучивание донных отложений во время штормов в свободный ото льда период.

За все время наблюдений в озере было отмечено несколько периодов повышения и снижения средних за период открытой воды концентраций

взвеси. В 1979–1981 гг. среднее содержание общей взвеси составляло 1,1–1,8 г/м³, затем, в 1982–1990 гг. ее содержание снизилось до 0,70–0,95 г/м³, при этом наименьшие значения (0,7–0,8 г/м³) были в 1983–1985 гг., в 1991–1993 гг. концентрация вновь увеличилась до 1,0–1,3 г/м³ [Петрова, Поздняков, 2013; Юдин, Петрова, 2015]. Наиболее высокая средняя концентрация (2,0 г/м³) была зафиксирована в 2003 г. После 2005 г. средние концентрации общей взвеси в озере в большинстве случаев были ниже наблюдавшихся ранее и составляли от 0,4 до 1,1 г/м³, в основном находясь в диапазоне 0,5–0,7 г/м³ (рис. 8.5.6). Из-за отсутствия данных за осенний период в 2011–2013 и 2015 гг. рассчитанные средние концентрации в эти годы могут быть несколько завышены, поскольку осенью содержание взвеси в озере всегда ниже, чем в летне-осенний период.

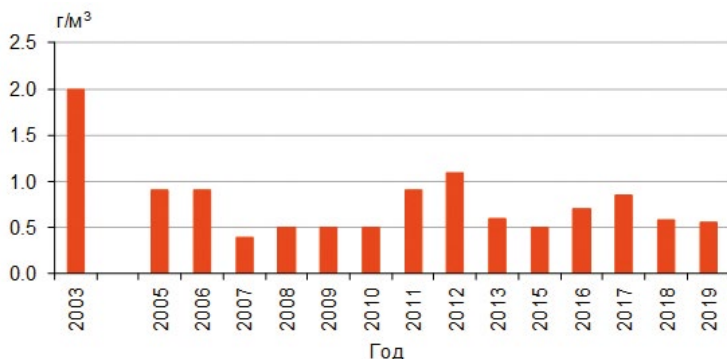


Рис. 8.5.6 – Динамика средневзвешенных за период открытой воды концентраций общей взвеси в воде Ладожского оз. в 2003–2019 гг.

Исследования предыдущих лет показали, что изменение количества взвеси зависит в большей степени от ее органической составляющей, чем от минеральной. Доля среднегодовой концентрации органической взвеси от концентрации общей взвеси в 1979–1993 гг. составляла в основном 54–91%, только в 1984–1985 гг., когда отмечалось низкое содержание общей взвеси, она составляла 45–50%. После 2003 г. она изменялась от 33 до 78%, при этом высокие значения – 70–78% – отмечались только в 2003 и 2005 гг., в дальнейшем значения не превышали 66% и часто были ниже 50%. Поскольку основная масса органической взвеси формируется за счет продукции фитопланктона, колебания ее среднегодового содержания зависят от соотношения продукционно-деструкционных процессов. К концу 70-х годов увеличилась концентрация фосфора в воде озера и резко выросла первичная продукция фитопланктона, что привело к увеличению концентрации органической взвеси, в 1979–1980 гг. в период открытой воды она составляла в среднем 0,9–1,0 г/м³. Затем, в результате интенсивной деструкции, величина органической составляющей взвеси в 1981–1983 и 1986–1993 гг. снижается до 0,6–0,8 г/м³. Наиболее низкие значения (0,4 г/м³) отмечались в 1984–1985 гг. Высвободившиеся в результате минерализации органического вещества биогенные элементы вновь потребляются фитопланктоном, что приводит к росту его численности,

и ситуация может повторяться [Петрова, Поздняков, 2013]. До 2007 г. отмечалось снижение концентрации органической взвеси после наиболее богатого 2003 г., при этом в 2007 г. среднее за период открытой воды количество органической взвеси было наименьшим и составляло $0,2 \text{ г/м}^3$, в дальнейшем оно немного возросло – до $0,27\text{--}0,34 \text{ г/м}^3$ (рис. 8.5.7). Начиная с 2007 г. наблюдается наименьшее за весь период наблюдений с 1979 г. содержание органической взвеси в озере, при этом среднее за период открытой воды значение испытывает лишь незначительные флуктуации.

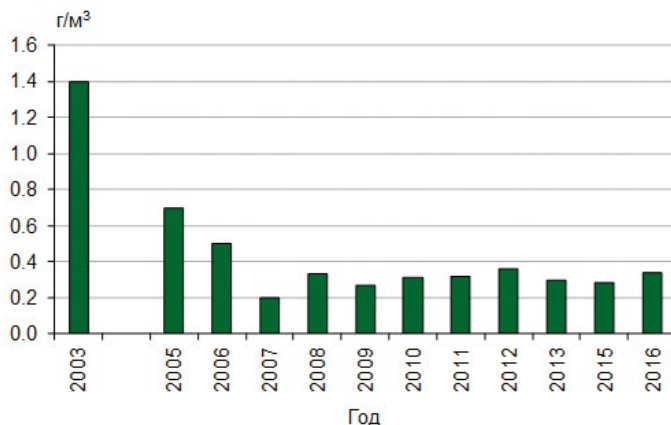


Рис. 8.5.7 – Динамика средневзвешенных за период открытой воды концентраций органической взвеси в воде Ладожского оз. в 2003–2019 гг.

Как правило, более высокое содержание общей взвеси в озере наблюдается весной и летом за счет большего количества органической взвеси. Осенью снижается активность жизнедеятельности биоты, в результате снижается количество органической взвеси и общее содержание взвешенных веществ (рис. 8.5.8 и 8.5.9). Доля средневзвешенной концентрации органической взвеси составляет весной 36–64%, летом 50–70% и осенью 30–75%.

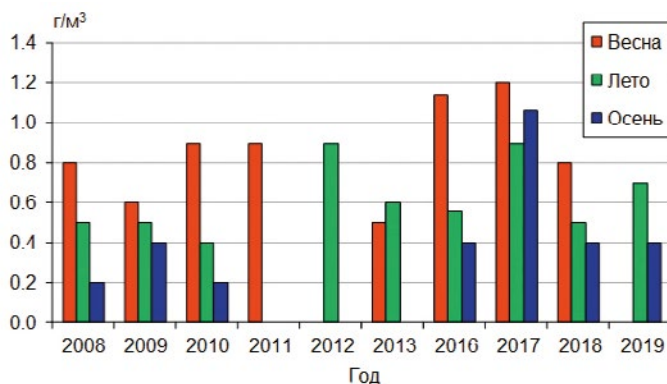


Рис. 8.5.8 – Сезонная динамика средневзвешенных концентраций общей взвеси в воде Ладожского оз.

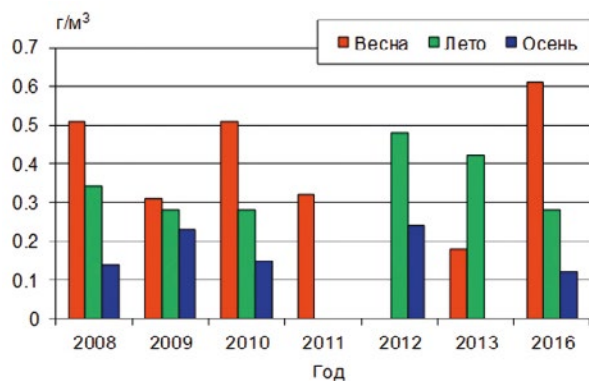


Рис. 8.5.9 – Сезонная динамика средневзвешенных концентраций органической взвеси в воде Ладожского оз.

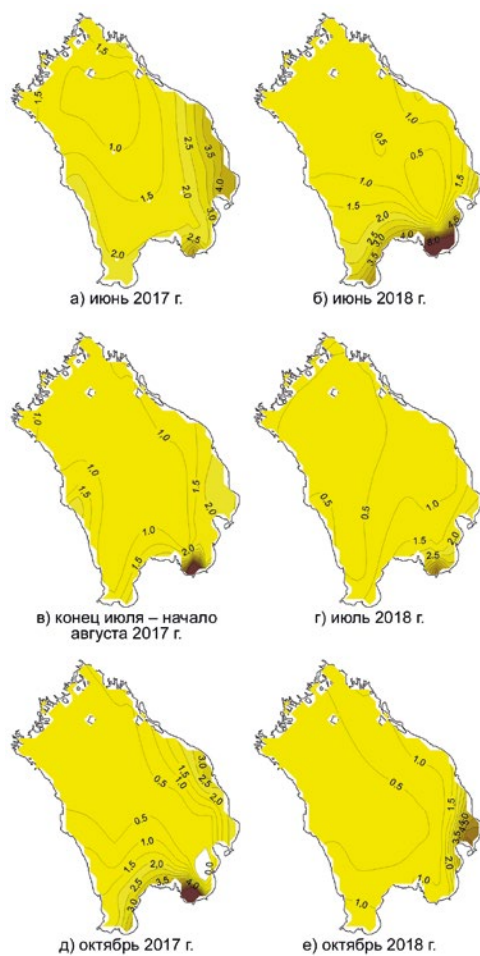


Рис. 8.5.10 – Распределение средневзвешенной концентрации взвеси (г/м³) в воде Ладожского оз. в разные сезоны в 2017–2018 гг.

На рис. 8.5.10 представлено пространственное распределение общей взвеси по акватории в разные сезоны за последние годы, построенное на основе средневзвешенных по глубине концентраций взвеси на каждой станции. В данном распределении не наблюдается принципиальных отличий от аналогичного распределения в предыдущие годы.

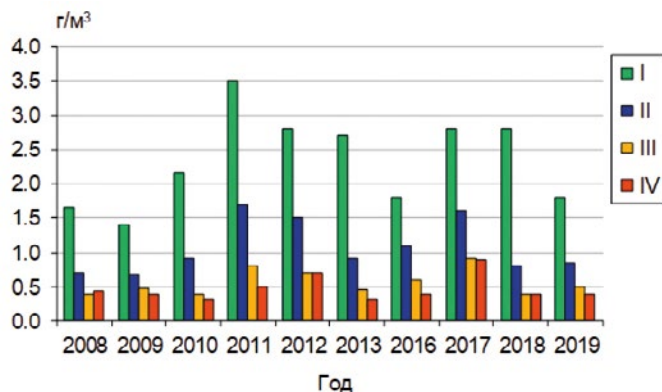


Рис. 8.5.11 – Средняя за период открытой воды концентрация общей взвеси в лимнических зонах Ладожского оз. в 2008–2019 гг. Лимнические зоны озера: I – Прибрежная, II – Деклиная, III – Профундальная, IV – Ультрапрофундальная

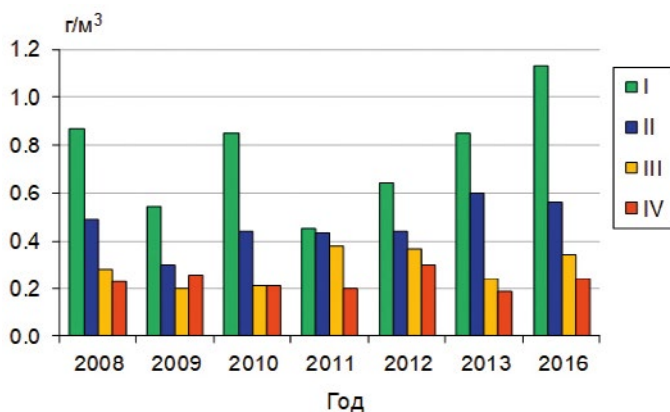


Рис. 8.5.12 – Средняя за период открытой воды концентрация органической взвеси в лимнических зонах Ладожского оз. в 2008–2016 гг. Лимнические зоны озера: I – прибрежная, II – деклиная, III – профундальная, IV – ультрапрофундальная

Как для большинства гидрохимических показателей, для взвешенных веществ наиболее высокие концентрации и наибольший их диапазон в течение всего периода открытой воды характерны для прибрежной зоны озера, особенно для ее южной и юго-восточной частей. Максимальные концентрации приурочены к участкам, расположенным вблизи устьев рек. Особенно высоким содержанием взвеси обычно отличаются воды Свирской и Волховской губ. Вертикальное распределение взвеси в воде прибрежной и часто деклиной зон достаточно равномерное, что связано с хорошей ветровой пе-

ремешиваемостью воды. Деклинальная зона по содержанию взвеси является промежуточной между прибрежной и глубоководными зонами. В глубоководных (профундальной и ультрапрофундальной) зонах озера содержание взвеси значительно ниже и диапазон намного уже, чем в прибрежной зоне. Летом более высоким содержанием взвеси отчетливо выделяется поверхностный слой глубиной до 10 м, что связано с развитием биоты. Изменения средних за период открытой воды концентраций общей и органической взвеси в лимнических зонах озера в последние годы представлены на рис. 8.5.11 и 8.5.12.

Результаты гидрохимических исследований последнего десятилетия подтвердили, что основная роль в формировании химического состава воды Ладожского оз. принадлежит речному стоку. Поэтому минерализация озера в основном зависит от минерализации воды трех главных притоков озера – рек Свири, Бурной и Волхова, объем водного стока которых в сумме дает около 80% речного притока в озеро. Так же, как и воды основных притоков, вода Ладожского оз. характеризуется гидрокарбонатно-кальциевым составом. Наибольшие значения суммы главных ионов за период наблюдений с 1960-х были отмечены в 2001–2004 гг. (до 71,6 мг/л), после чего наметилась тенденция к уменьшению до уровня 1990-х гг. В 2019 г. среднее значение суммы ионов в воде озера в летне-осенний период составляло 64,8 мг/л.

Если в 2000–2005 гг. для большей части притоков озера было характерно увеличение значений водородного показателя и расширение их диапазона по сравнению с 60-ми годами прошлого века, что связывалось с их эвтрофированием, то в период наблюдений 2013–2019 гг. отмечено незначительное снижение значений pH в устьях основных притоков и в истоке р. Невы. Аналогичный тренд наблюдается и в озере. В период 2016–2018 гг. увеличение pH в юго-восточной части озера было, как правило, незначительным (до 7,5) при повышенном (>100%) относительном содержании растворенного кислорода, свидетельствующем об интенсивно протекающем фотосинтезе.

Как и в предшествующие годы, для Ладожского оз. характерно высокое содержание растворенного в воде кислорода. Как правило, кислородный дефицит не достигает критических значений, наиболее низкое относительное содержание O_2 отмечалось в Волховской губе осенью 2019 г., оно составляло 70%. Исключением являются заливы в северной части озера, отличающиеся от основной водной массы как уровнем антропогенной нагрузки, так и степенью изолированности от неё. Так, в 2018–2019 гг. в мелководной части Сортавальского залива относительное содержание кислорода в придонном слое в летний период снижалось до 24% (2,8 мг/л).

В силу природных особенностей водосборов притоки Ладожского оз. богаты темноокрашенными органическими веществами, поэтому цветность и содержание общего органического углерода в воде рек, как правило, высоки. В 2011–2019 гг. значения этих показателей в воде рек мало отличались от данных, полученных в 2001–2008 гг. Наиболее низкие значения цветности и содержания органического вещества характерны для зарегулированных рек с высокой озерностью водосборов, при этом межгодовые колебания значений этих показателей невелики. Вода р. Волхов содержит большее количество окрашенных органических веществ, чем воды двух других главных притоков, цветность волховской воды и содержание ТОС обычно изменяется

в более широких пределах. В 2017 г. от весны к осени при постоянном значении цветности воды концентрация ТОС в этой реке увеличилась в полтора раза, что может быть связано с загрязнением сточных водами.

В слабо зарегулированных притоках цветность воды и содержание ТОС могут изменяться на порядок от низких значений в межень до очень высоких в периоды летних дождевых паводков. Наблюдения показали, что среди рек северо-восточной части бассейна в наиболее широком диапазоне концентрация ТОС изменяется в р. Олонке. Из рек юго-восточной части побережья бассейн р. Сясь является одной из наиболее освоенных частей Ладожского водосбора. Во многих случаях содержание углерода в ней было выше, что связано с большей антропогенной нагрузкой. Малые притоки южного и юго-западного побережья обычно характеризуются наиболее высокими показателями цветности и ТОС среди всех притоков озера. Самая низкая цветность воды и концентрация ТОС обычно отмечаются в р. Авлоге, самые высокие значения этих показателей – в р. Морье.

Цветность воды и содержание органического вещества в истоке р. Невы обычно близки значениям, характерным для юго-западной части прибрежной зоны Ладожского оз. В отдельные периоды наблюдалось синхронное увеличение цветности воды и содержания ТОС, что обусловлено действием природных факторов.

Цветность воды основной водной массы Ладожского оз. отличается высокой устойчивостью, в настоящее время она осталась в тех же пределах, что и в начале 60-х годов прошлого века. Интенсивно окрашенные воды поступают в озеро с притоками, поэтому цветность воды в прибрежной зоне может изменяться в широких пределах. Наиболее высокие ее значения характерны для Волховской губы, куда поступают воды рр. Волхова и Сяси. В бухте Петрокрепость и вдоль открытого западного побережья, до устья р. Вуоксы, значения цветности обычно ниже, при этом интервал значений намного уже. Иногда наблюдается влияние более окрашенных вод Волховской и Свирской губ в юго-восточной части деklinальной зоны.

Межгодовые изменения средних концентраций общего и лабильного углерода в воде Ладожского оз. начали происходить с 1981 г. и продолжают по настоящее время, что может говорить о дисбалансе продукционно-деструкционных процессов в водоеме. За этот период выделялись годы как повышенных, так и пониженных концентраций ТОС. Период 2005–2013 гг. характеризовался наиболее низкими (6,4–7,4 мг·С/л) средними за период открытой воды концентрациями ТОС, в 2016–2020 гг. отмечен их рост до 7,6–8,4 мг·С/л, произошедший в основном за счет увеличения концентрации в глубоководных зонах. С осени 2006 г. до весны 2011 г. наблюдалась тенденция увеличения концентрации лабильного углерода во всех лимнических зонах озера, в том числе глубоководных, не только в поверхностном, но и в придонном горизонте. После 2012 г. высоких значений LOC в воде глубоководных зон не отмечалось. В 2016–2019 гг. содержание лабильного углерода в воде всех лимнических зон снизилось по сравнению с предыдущими годами. В 2009–2010 гг. доля лабильного углерода от общего его содержания была достаточно высокой – обычно 10–16%, в некоторых случаях 25–27%. Увеличение доли LOC отмечалось не только в мелководных,

но и в глубоководных зонах озера по всему столбу воды. Начиная с 2011 г. концентрация ЛОС и его доля в общем органическом углероде начинают постепенно снижаться во всех лимнических зонах озера, и в настоящее время доля ЛОС составляет в основном менее 10% ТОС.

Природные условия водосборного бассейна Ладожского оз. обуславливают небольшое количество фосфора в поверхностных водах. Содержание его в воде рек постепенно увеличивается по мере продвижения от северных притоков к югу. Два из трех главных притоков озера – реки Свирь и Бурная (северный рукав – р. Вуокса), а также реки северной и северо-восточной частей водосборного бассейна, постоянно характеризуются наименьшим содержанием фосфора. Наиболее высокие значения ТР наблюдаются в воде малых рек южного побережья. Хозяйственная деятельность на территории водосбора может приводить к росту концентрации фосфора в реках. Благодаря особенностям природных условий, а также высокой хозяйственной освоенности южной части водосбора, р. Волхов всегда отличалась повышенным содержанием фосфора в воде по сравнению с реками Свирь и Вуокса, претерпевшим в течение многолетнего периода наблюдений значительные колебания. В июне 2015 г. и в октябре 2017 г. в Волхове были отмечены разовые значительные повышения концентрации ТР, которые могли быть результатом антропогенного воздействия. Среди притоков озера самыми высокими концентрациями фосфора в воде в результате сбросов хозяйственно-бытовых сточных вод отличается р. Авлога. Хотя содержание ТР в водах этой реки в настоящее время существенно снизилось по сравнению с началом 2000-х гг., в отдельные сроки наблюдений отмечалось заметное повышение концентрации. В период 2011–2019 гг. слабо выраженный тренд снижения концентраций общего фосфора наблюдался в рр. Свирь, Бурная, Вуокса, Янис, Тулема, Паша, Авлога, Назия и Морье. Напротив, в воде рр. Тулоксы и Олонки наблюдается тенденция роста концентрации ТР, очень слабый рост отмечен также в воде Волхова и Лавы. В истоке р. Невы содержание общего фосфора обычно близко к его содержанию в прибрежной зоне Ладожского оз., в бухте Петрокрепость. Наиболее высокие значения были зафиксированы в 2013–2014 г., причем в октябре 2014 г. отмечалось экстремально высокое содержание фосфора, которое могло быть связано с действием антропогенного фактора.

В период с конца 70-х годов прошлого века до начала 2000-х гг. отмечено снижение средней за период открытой воды концентрации общего фосфора в озере. После 2003 г. ТР ни разу не превышала значения допустимой концентрации 15 мкг·Р/л, оставаясь в 2009–2019 гг. в пределах 10–14 мкг·Р/л, при этом в отдельные годы снижаясь до минимальных для всего периода наблюдений с 1976 г. значений и приближалась к значениям 1959–1962 гг.

С начала 80-х гг. прошлого столетия в воде озера наблюдается отчетливый тренд снижения средних за период открытой воды концентраций неорганического фосфора. В эпилимнионе потребление фосфора биотой часто приводит к уменьшению концентрации Р до аналитического нуля при сохранении более высоких значений в гиполимнионе. Однако после 2010 г. процесс практически полного потребления фосфатов часто происходит не только в воде прибрежной зоны и в эпилимнионе, но и в гиполимнионе глубоководных зон. В 2017, 2018 и 2019 гг. он был выражен слабее, чем

в 2016 г., когда необычайно низкие концентрации IP наблюдались в озере во все сезоны. В сентябре 2016 г. впервые количество минерального фосфора оказалось ниже предела обнаружения во всех отобранных пробах воды как по вертикали, так и по акватории, что свидетельствовало об очень интенсивном обороте этого элемента в водоеме.

По сравнению с предыдущими годами существенных изменений в содержании общего азота в воде притоков озера в 2011–2018 гг. не зафиксировано. Повышенное содержание общего азота характерно для рек южного побережья – Волхова, Лавы, Назиы, Морье, а также Авлоги, что является следствием ее загрязнения. Межгодовая и сезонная динамика содержания TN выражена очень слабо.

Диапазон концентраций общего азота по акватории озера гораздо уже, чем для фосфора, – максимальные значения превышают минимальные примерно в 1,5 раза. В характере многолетней динамики содержания TN за весь период исследований (с середины 70-х гг. прошлого столетия) прослеживается незначительное снижение концентраций, однако после относительно низких среднегодовых значений в 2009–2013 гг. (570–600 мкг·N/л) в 2015–2018 гг. отмечено их повышение до 650 мкг·N/л. Сезонные изменения в содержании TN отчетливо не выражены, вертикальное распределение общего азота достаточно равномерное.

Неорганический азот находится в воде озера преимущественно в форме нитратов. С начала 60-х до конца 70-х годов прошлого века среднегодовая концентрация нитратного азота в воде озера увеличилась со 150 до 230 мкг·N/л и с тех пор остается на том же уровне. Нитратный азот составляет в среднем около 30% от концентрации общего азота. Азот нитритов в воде озера практически не обнаруживается.

Содержание общей взвеси в воде притоков Ладожского оз. изменяется в очень широком диапазоне – от 0,1 до десятков г/м³. В большинстве случаев количество взвешенных веществ в воде притоков Ладожского озера в 2011–2019 гг. лежало в границах значений, характерных для прошлых лет. Большое влияние на количество взвеси оказывают дождевые паводки, благодаря которым ее количество может резко возрасти.

При рассмотрении данных всего многолетнего ряда наблюдений за взвешенным веществом в воде озера можно отметить неярко выраженную тенденцию снижения средних за период открытой воды концентраций. После 2006 г. средние концентрации общей взвеси в озере в большинстве случаев оказались ниже наблюдавшихся ранее. Изменение количества взвешенного вещества в воде озера зависит в большей степени от органической составляющей, чем от минеральной. В последние годы наблюдается наименьшее за весь период наблюдений с 1979 г. содержание органической взвеси в озере. Поскольку основная масса органической взвеси формируется за счет продукции фитопланктона, значительное уменьшение ее количества может косвенно свидетельствовать о снижении интенсивности продукционных процессов или преобладании процессов деструкции. В пространственно-временном распределении взвешенных веществ в воде озера в последние годы принципиальных отличий по сравнению с более ранними исследованиями не наблюдается.

Глава 9. Гидробиологический режим Ладожского озера и его притоков под воздействием природных и антропогенных факторов

Гидробионты имеют огромное значение в жизни экосистемы крупнейшего европейского озера, они определяют его экологическое состояние, формируя свою среду обитания. Развитие сообществ гидробионтов зависит от множества факторов, среди которых одними из ведущих являются климатические и антропогенные воздействия. Регулярные исследования основных биологических сообществ (фитопланктон, макрофиты, водные грибы, бактериопланктон, зоопланктон, макро- и мейобентос) Ладожского оз. наглядно демонстрируют основные тенденции изменения его экосистемы. В настоящей главе представлена картина современного развития основных сообществ гидробионтов на фоне происходящих климатических изменений и современного уровня антропогенного воздействия. Анализ полученных материалов показывает, что в настоящее время вектор развития экосистемы озера определяется в основном естественными факторами природной среды в конкретных климатических условиях. Вместе с тем в ряде районов озера отмечаются определенные нарушения в развитии биологических сообществ, вызванные негативными антропогенными воздействиями. Необходимо особо подчеркнуть, что ни в коем случае нельзя допускать увеличения антропогенной нагрузки на озеро, его загрязнения, поскольку этот огромный водоем имеет большую инерционность и, если произойдет сдвиг в его экологическом состоянии в худшую сторону, то возврат озера в благоприятное состояние при принятии даже всех необходимых мер займет не менее 2–3 десятилетий.

Схемы расположения станций наблюдений на акватории Ладожского оз. представлены на рис. 8.2 и 8.3 в Главе 8.

9.1 Фитопланктон

Структурно-функциональные показатели фитопланктона являются одним из основных элементов экологического мониторинга любого водоема. Структура биомассы и величины функциональных характеристик планктонных водорослей определяют трофический статус озерных экосистем, а его изменение в течение того или иного отрезка времени является следствием изменения абиотических факторов среды и в первую очередь обеспеченности сообщества питательными веществами.

До второй половины прошлого века Ладожское оз. было типичным олиготрофным водоемом с господством диатомовых водорослей в течение всего вегетационного периода и с одним четко выраженным пиком развития весной в прибрежной зоне [Балахонцев, 1909; Петрова, 1968]. К началу 70-х годов резко возрастает антропогенная нагрузка на водоем, и, соответственно, увеличиваются концентрации соединений фосфора в воде [Антропогенное

эвтрофирование..., 1982; Современное состояние..., 1987; Ладожское озеро..., 1992]. Это привело к изменениям в комплексе массовых видов, особенно летнего фитопланктона. Рост плотности популяций и особенно цианобактерий (синезеленых водорослей) летом, уровень первичной продукции [Petrova, 1987; Петрова и др., 1992] свидетельствовали о переходе ранее олиготрофного состояния экосистемы в мезотрофную. При этом количество обнаруженных видов водорослей практически не изменилось, а соотношение количества видов в основных систематических отделах (*Chlorophyta*, *Bacillariophyta*, *Cyanophyta*) стабильно до настоящего времени.

За период с 1992 по 2019 г. в планктоне встречено 257 таксонов водорослей рангом ниже рода. Как и прежде, наиболее разнообразно представлены зеленые, диатомовые водоросли и цианобактерии (табл. 9.1.1). Анализ списков водорослей, существующих для Ладожского оз., показал, что 90% всех видов относятся к редким и случайным, поэтому присутствие или отсутствие их в тот или иной период исследований не являются показателями изменения среды. Основное ядро фитопланктона, которое включает в себя около 50 видов, не претерпело изменений на протяжении всего периода изучения видового состава фитопланктона.

Таблица 9.1.1

Систематический состав фитопланктона озера на разных этапах его исследования

Отдел водорослей	Балахонцев, 1909	Петрова, 1990	Данные ИНОЗ
Cyanophyta	29	41	38
Cryptophyta	–	–	7
Dinophyta	13	9	9
Chrysophyta	19	7	23
Bacillariophyta	65	82	42
Xanthophyta	1	4	6
Raphidophyta	–	–	1
Euglenophyta	–	1	1
Chlorophyta	81	70	117
Количество видов	208	214	257

Помимо массового развития цианобактерий, их содоминантами стали криптофитовые водоросли, которые по сути являются одной из лидирующих групп в составе современного фитопланктона с середины июня до середины сентября. Обилие криптонад резко возросло к середине 80-х годов прошлого столетия [Ежегодник..., 1987; 1988]. Присутствие представителей рода *Cryptomonas* в составе фитопланктона озера отмечалось еще Е. Н. Балахонцевым [1909], однако увеличение роли этих водорослей в составе сообщества, вероятно, шло постепенно. Тем не менее столь резкое увеличение популяции этих организмов в течение последних 30 лет является подтверждением изменившихся условий среды. Начиная с 1992 года, происходит снижение антропогенной нагрузки на водоем и, соответственно, уменьшение концентраций соединений фосфора в воде [Расплетина, Сусарева, 2002; Петрова, Игнатьева, 2013], однако адекватной реакции

фитопланктона до сих пор не наблюдается. Возможно, это связано с более глубокой трансформацией растворенного органического вещества водного гуминового комплекса. В результате этого процесса из его состава выделяются биогенные элементы и низкомолекулярные органические соединения [Коркишко и др., 2000] в форме, доступной для усвоения некоторыми водорослями, в частности, криптомонадами. Процветанию этих организмов способствует нетребовательность их к минеральным формам биогенных элементов и способность получать вещества и энергию благодаря миксотрофному типу питания и подвижности [Klaveness, 1991].

Анализ результатов 2013–2019 гг. исследований фитопланктона в основные периоды вегетационного сезона (весна, лето, осень) позволяет оценить современное состояние фитопланктона. Пробы воды для определения видового состава, численности и биомассы водорослей отбирались батометром из поверхностного слоя воды. Пробы воды фиксировались раствором Люголя с последующим добавлением формалина. После отстаивания и концентрации каждой пробы часть ее просчитывалась в камере Нажотта (0,05 мл) под световым микроскопом [Гусева, 1959]. Биомасса водорослей определялась расчетным способом с использованием индивидуальных весов водорослей, полученных для Ладожского оз. Содержание фотосинтетических пигментов определялось спектрофотометрическим методом в ацетоновых экстрактах. При фильтрации проб использовались мембранные фильтры с размером пор 0,9–1,05 мкм. При расчете концентраций пигментов использовались формулы UNESCO [UNESCO/SCOR, 1966].

Весной в Ладожском оз. существуют по сути два района – с температурой воды выше 4 °С (теплоактивная область) и отделенный термобаром глубоководный район с температурой воды ниже 4 °С (теплоинертная область). Все весенние наблюдения последних лет (2013, 2017 и 2018 гг.) были проведены в первой половине июня, когда границы теплоактивной области уже находились в районе средних глубин. В теплоинертной области находились глубоководные станции центрального района озера, станции на северо-востоке, северо-западе озера и весь северный глубоководный район озера (рис. 9.1.1, г, д, е, ж). В первой половине июня по всей акватории озера преобладали диатомовые (11–97% от общей биомассы фитопланктона) водоросли. На большинстве станций в теплоактивной области озера в структурообразующий комплекс фитопланктона входили криптофитовые (до 48% от общей биомассы фитопланктона) водоросли, а в районе бухты Петрокрепость также золотистые (21–36% от общей биомассы фитопланктона) водоросли. По всему озеру доминировал характерный для Ладожского оз. вид *Aulacoseira islandica* (O. Mull.) Sim. (до 85% от общей биомассы фитопланктона). На станциях, расположенных в Волховской губе, в доминантный комплекс фитопланктона входил также другой вид рода *Aulacoseira* – *A. subarctica* (O. Mull.) Haworth. Кроме того, на большинстве станций, расположенных в теплоактивной области озера, в массе развивался более теплолюбивый вид диатомей – *Asterionella formosa* Hass. (до 44% от общей биомассы фитопланктона). Вид *Tabellaria fenestrata* (Lyngb.) Kutz. (до 20% от общей биомассы фитопланктона) также массово развивался на некоторых станциях теплоактивной области озера.

Из криптонад доминировали виды р. *Cryptomonas* (*Cr. erosa* Ehr., *Cr. sp.*) и *Rhodomonas lacustris* Pasch. Et Ruttn. Из золотистых водорослей в бухте Петрокрепость *Uroglena americana* Calk. и *Dinobryon divergens* Imh. На некоторых исследованных станциях в структурообразующий комплекс фитопланктона входила крупная хлорококковая водоросль *Botryococcus braunii* Kutz. В качестве субдоминанта в бухте Петрокрепость, в Волховской и Свирской губах стоит упомянуть желтозеленую водоросль *Tribonema affine* West.

Как видно из рис. 9.1.1, весной фитопланктон активно развивался в теплоактивной области озера вне зависимости от района озера, а минимальные величины биомассы и хлорофилла-а наблюдались в теплоинертной области озера (в северном глубоководном районе, на центральных глубоководных станциях, на северо-востоке и северо-западе озера). Величины продуктивности фитопланктона в весенний период на станциях, расположенных в теплоактивной области, соответствуют мезотрофным и слабomezотрофным условиям, а теплоинертная область имеет показатели продуктивности ультраолиготрофных вод. Летний период наступает в озере после исчезновения термобара, выравнивания поверхностных температур воды и формирования гомотермного эпилимниона. Как правило, этот период продолжается с середины июля до начала сентября. В начале августа 2013 г. практически по всему озеру преобладали криптофитовые водоросли (11–62% от общей биомассы фитопланктона) и цианобактерии (12–56% от общей биомассы фитопланктона) (рис. 9.1.2). Доминировали виды рода *Cryptomonas* (*Cr. erosa*, *Cr. sp.*), *R. lacustris*, из цианобактерий – *Aphanizomenon flos-aquae* (L) Ralfs, *Anabaena spiroides* Kleb., *A. circinalis* (Kutz.) Hansg., *A. flos-aquae* (Lyngb.) Breb. Наибольшую роль в структуре сообщества криптомонады играли на северо-западе и на востоке озера, а наименьшую – в приустьевых участках рр. Волхов и Бурная. Больше всего цианобактерий было отмечено в районе Волховской губы, в бухте Петрокрепость, в центре и на западе озера.

Также в некоторых районах озера в число доминант входили золотистые водоросли с видом *U. americana* (11–27% от общей биомассы фитопланктона) – это центр озера и западный район озера.

На некоторых станциях Волховской губы диатомовые водоросли с доминантами *A. subarctica* и *A. islandica* достигали 60% от общей биомассы фитопланктона. На большинстве исследованных станций представитель зеленых водорослей *B. braunii* входил в структуру фитопланктона в качестве субдоминанта или доминанта (до 17% от общей биомассы фитопланктона). Следует отметить, что в 2013 г. вклад в общую биомассу фитопланктона характерной для Ладожского озера желтозеленой водоросли *T. affine* ни на одной из исследованных станций не превышал 5%.

Величины биомасс и концентраций хлорофилла-а на исследованных станциях изменялись от 0,79 г/м³ и 1,72 мг/м³ до 4,05 г/м³ и 10,80 мг/м³ соответственно. Минимальные значения биомассы и хлорофилла-а наблюдались в северном глубоководном районе озера, максимальные – были отмечены в Волховской губе. Средние значения биомассы и хлорофилла-а для всего озера в первой декаде августа 2013 г. составляли 2,06 г/м³ и 5,87 мг/м³, что позволяет охарактеризовать Ладожское оз. как мезотрофный водоем.

Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата

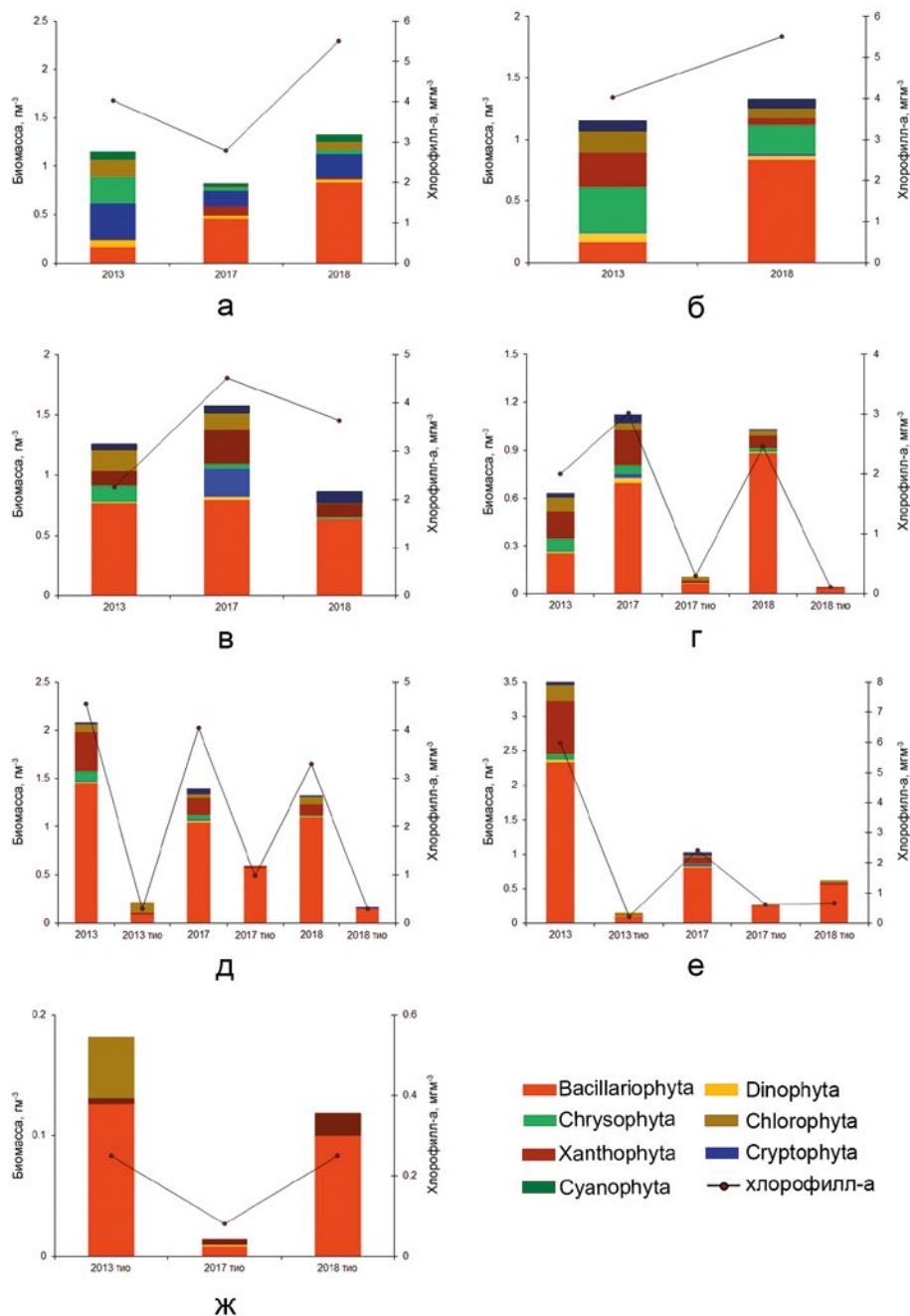


Рис. 9.1.1 – Усредненные по районам значения биомассы фитопланктона и хлорофилл-а в поверхностном слое Ладожского оз. в весенний период (ТИО – теплоинертная область). а – бухта Петрокрепость; б – Волховская губа; в – Свирская губа; г – западный район; д – восточный район; е – центр озера; ж – северный глубоководный район озера

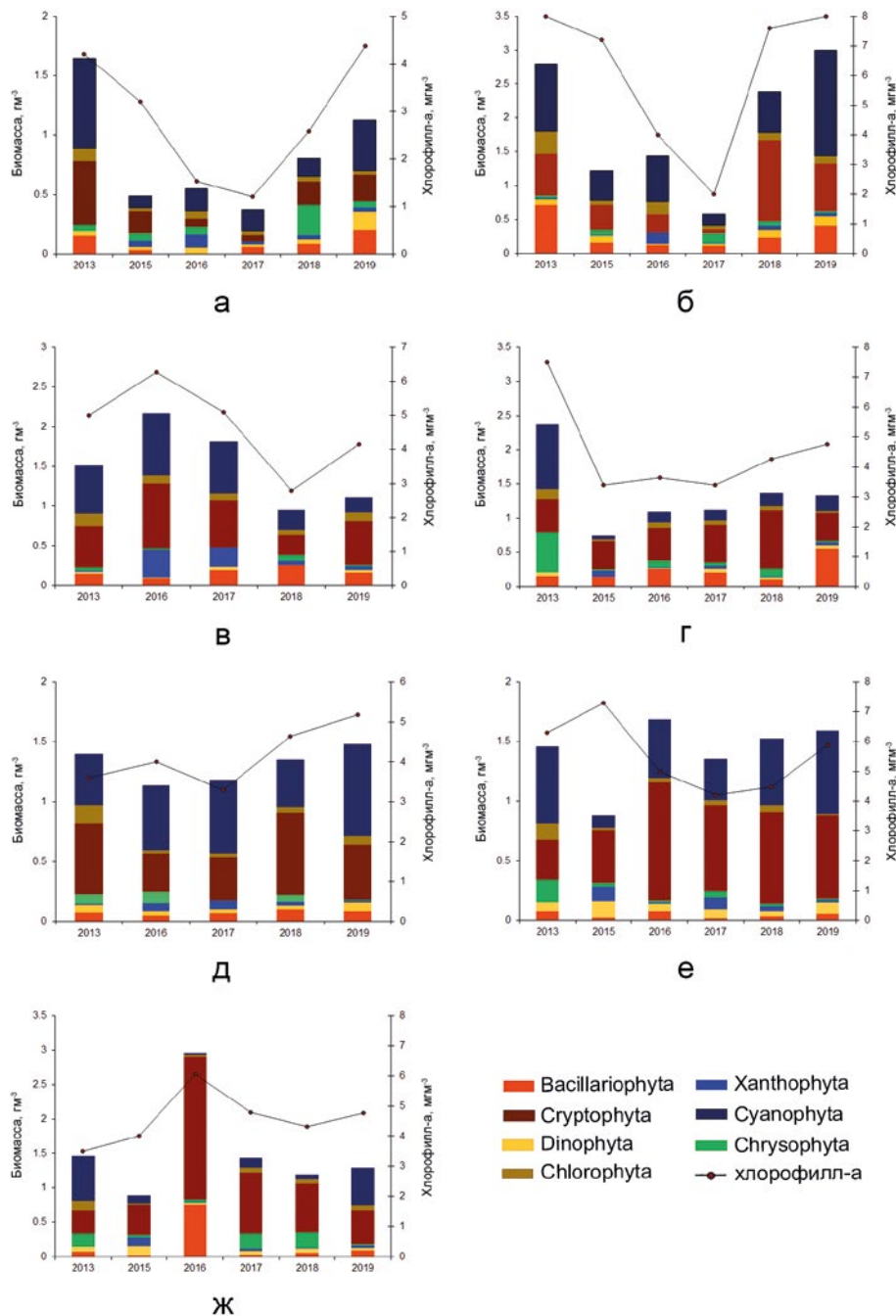


Рис. 9.1.2 – Усредненные по районам значения биомассы фитопланктона и хлорофилла-а в поверхностном слое Ладожского оз. в летний период. а – бухта Петрокрепость; б – Волховская губа; в – Свирская губа; г – западный район; д – восточный район; е – центр озера; ж – северный глубоководный район озера

В начале августа 2015 г. на всех исследованных станциях доминировали криптофитовые водоросли (17–82% от общей биомассы фитопланктона) с характерными для летнего ладожского планктона видами *Cr. erosa* и *R. lacustris*. Цианобактерии входили в доминантный комплекс фитопланктона в бухте Петрокрепость (до 44% от общей биомассы), в Волховской губе (13–42%) и в центре озера (до 59%). В бухте Петрокрепость доминировали *Aph. flos-aquae* и *A. circinalis*.

В Волховской губе основную роль играли виды рода *Microcystis* (*M. wessenbergii* (Kom.) Starmach, *M. grevillei* (Hass.) Elenk., *M. reinboldii* (Richter) Forti) и *Aph. flos-aquae*. В центре озера преобладали виды рода *Anabaena* (*A. circinalis*, *A. flos-aquae*, *A. spiroides*). Почти во всех районах озера обильно развивалась желтозеленая водоросль *T. affine*, составляя до 35% от общей биомассы фитопланктона. Диатомеи, с преобладанием *T. fenestrata* были многочисленны преимущественно вдоль западного берега, достигая до 36% от общей биомассы фитопланктона. Золотистые водоросли (виды *Ur. americana* и *D. divergens*) входили в доминантный комплекс фитопланктона в бухте Петрокрепость, составляя до 27% от общей биомассы. Динофитовые водоросли играли важную роль в Волховской губе (до 28% от общей биомассы фитопланктона) и в северном глубоководном районе озера (15%). В Волховской губе доминировал крупный вид *Ceratium hirundinella* (O. F. M.) Bergh, а в глубоководном районе – *Peridinium cinctum* (O. F. M.) Ehr.

Биомасса фитопланктона в целом изменялась от 0,17 до 2,74 г/м³. Минимальная биомасса наблюдалась в бухте Петрокрепость, а максимальная – в Волховской губе. В среднем для озера биомасса составила 0,85 г/м³. Эта усредненная для озера величина летней биомассы фитопланктона оказалась минимальной для последних 24 лет наблюдений. Концентрация хлорофилла-а изменялась от 1,17 до 16,4 мг/м³. Так же, как и биомасса, минимальные величины наблюдались в бухте Петрокрепость, а максимальные – в Волховской губе. Среднее значение хлорофилла-а для озера составляло 5,1 мг/м³, что находится в пределах многолетних колебаний этих параметров. В августе 2015 г. отмечено высокое содержание хлорофилла-а в единице биомассы (от 0,32 до 0,92%), в среднем 0,62% (например, в августе 2013 г. содержание хлорофилла-а в единице биомассы колебалось от 0,18 до 0,45%, и в среднем составляло 0,3%). Как известно, на содержание хлорофилла в биомассе водорослей оказывают влияние такие факторы, как гидродинамические условия, поступление аллохтонного органического вещества, физиологическое состояние самого фитопланктона и его видовой состав. Возможно, более высокая доля хлорофилла в фитопланктоне была связана с наличием хлорофиллсодержащего детрита в воде озера в 2015 г. [Никулина и др., 1999].

Осенью наблюдается снижение общей продуктивности фитопланктона. В середине сентября 2016 г. при температуре 11–13 °С по всей акватории Ладожского оз. преобладали диатомовые (10–64%), цианобактерии (10–45%), желтозеленые (до 25%), криптофитовые (до 14%), а на отдельных станциях озера также зеленые водоросли. Диатомеи были обильны в южных губах (рис. 9.1.3), доминировал весенний вид *A. islandica*. Видовой состав цианобактерий, желтозеленых, криптофитовых и зеленых водорослей был таким же, как и летом. Величины биомасс и концентраций хлорофилла-а на исследу-

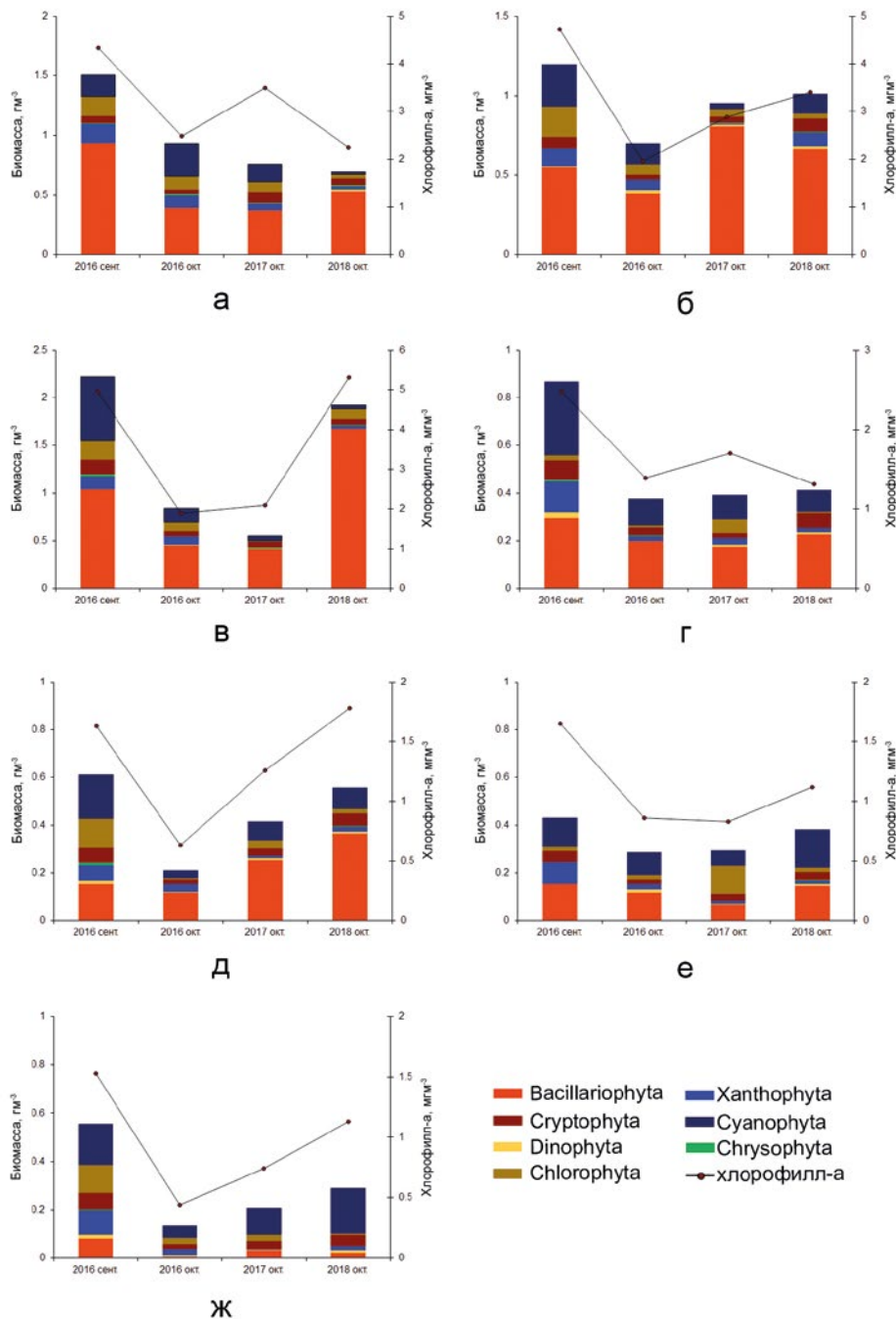


Рис 9.1.3 – Усредненные по районам значения биомассы фитопланктона и хлорофилл-а в поверхностном слое Ладожского оз. в осенний период. а – бухта Петрокрепость; б – Волховская губа; в – Свирская губа; г – западный район; д – восточный район; е – центр озера; ж – северный глубоководный район озера

дованных станциях в сентябре 2016 г. изменялись от 0,37 г/м³ и 1,3 мг/м³ до 2,22 г/м³ и 6,3 мг/м³ соответственно. Минимальные значения биомассы и хлорофилла-а наблюдались в северном глубоководном районе, а максимальные – в Свирской (биомасса) и Волховской (хлорофилл-а) губах. Средние величины продуктивности фитопланктона для всего озера составили: биомасса – 0,95 г/м³, а хлорофилл-а – 2,96 мг/м³.

В середине октября 2016, 2017 и в 2018 гг. температура поверхностных вод Ладожского оз. изменялась от 6,5° в Волховской губе до 10 °С в центральном районе озера. На большинстве исследованных станций преобладали преимущественно диатомовые водоросли. Их вклад в общую биомассу фитопланктона составлял от 10 до 66% в 2016 г, от 11 до 91% в 2017 г. и от 10 до 87% в 2018 г. и был наибольшим в прибрежной, мелководной части озера (в бухте Петрокрепость, Волховской и Свирской губах, в приустьевых участках западного берега). Доминировали виды *A. islandica*, *A. subarctica* и *T. fenestrata*. В центральном и северном глубоководном районах озера структура сообщества оставалась летняя, без четко выраженного преобладания тех или иных видов. Количественные показатели водорослей, в центральном и северном глубоководном районах озера по сути находились на уровне весенних значений теплоинертной области озера и соответствовали олиготрофному типу вод (рис. 9.1.3, е, ж).

Таким образом, тип структурно-функциональной организации фитопланктона в основные фазы вегетационного сезона, как в последние годы, так и в течение всего периода наших исследований озера [Летанская, Протопопова, 2012], носил стабильный характер. Активная вегетация водорослей начиналась с диатомовых (май – июнь) в прибрежье, в июле – августе преимущественное развитие получали цианобактерии и криптофитовые водоросли по всей акватории озера, а в октябре снова наблюдалась вегетация весенних диатомовых на мелководье. На основной акватории озера происходило постепенное затухание вегетации позднелетнего комплекса водорослей.

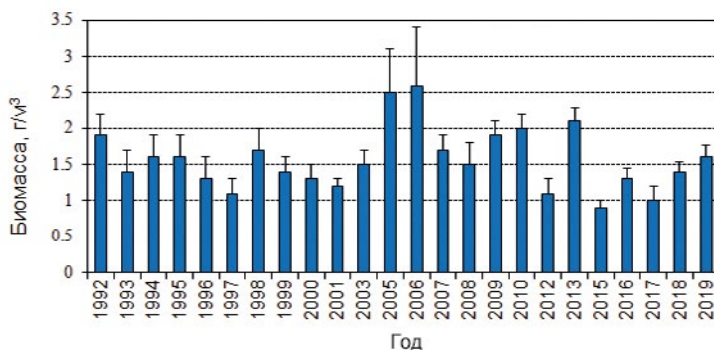


Рис. 9.1.4 – Межгодовые колебания средних величин биомассы фитопланктона в поверхностном слое воды для всей акватории Ладожского оз. (июль – август, 1992–2019 гг.)

В период 1992–2019 гг. наблюдения проводились в годы с разными климатическими условиями. Начало исследований приходилось на пик многоводной фазы, продолжение – на начало маловодной фазы, пик которой пришелся

на 2005–2006 гг. Последнее десятилетие 21 века также приходится на многоводную фазу. В рамках настоящего исследования изучен отклик фитопланктона Ладоги на изменение водности. На рис. 9.1.4 и 9.1.5 представлены средние величины биомассы и концентрации хлорофилла-а за этот период.

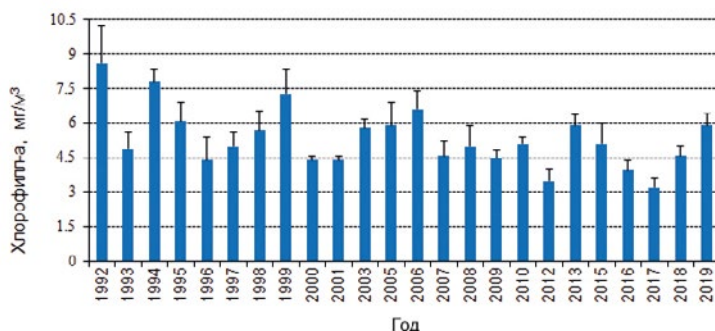


Рис. 9.1.5 – Межгодовые колебания средних величин концентрации хлорофилла-а в поверхностном слое воды для всей акватории Ладожского оз. (июль – август, 1992–2019 гг.)

Таблица 9.1.2

Средние и максимальные значения биомассы (В), содержания хлорофилла-а (Chl-a) в поверхностном слое Ладожского оз. (июль – август, 1973–2019 гг.)

Год	Поверхность						Источник
	В, г/м³		Chl-a, мг/м³		В	Chl-a	
	Среднее	Максимальное	Среднее	Максимальное	количество измерений		
1973	2,1	8,2	4,6	10	10	10	[1]
1976–79	–	–	2,8	38,9	–	–	[2]
1987	1,1	3,1	5,5	39,5	14	38	[3]
1990	1,7	2,9	5,6	10,2	6	98	[4]
1992–95	1,6	6,6	6,8	18,6	79	79	[5]
1996–97	1,1	3	5	10,3	23	23	[6]
1998–99	1,6	5,1	6	11,8	24	24	[6]
2000–12	1,7	12,6	4,8	22,6	196	196	наши данные
2013–19	1,5	4,2	5,2	16,4	136	136	

1 – [Пырина, Трифонова, 1979]; 2 – [Petrova, 1987]; 3 – [Ежегодник..., 1988]; 4 – [Lepisto, 1997]; 5 – [Holopainen, 1999]; 6 – [Летанская, 2000]

Отчетливого тренда в изменении характеристик фитопланктона нет. Однако некоторая тенденция к увеличению общей биомассы отмечена на пике маловодной фазы, что связано с ростом вклада цианобактерий в общую величину биомассы. В 2005–2006 гг. в пятнах «цветения» цианобактерий их собственная биомасса достигала 4–6 г/м³, и подобные величины больше не наблюдались за весь период исследований озера. Напротив, максимальные величины хлорофилла-а отмечены на пике многоводной фазы в конце 20 века при абсолютном господстве криптофитовых водорослей, что связа-

но с большим процентным содержанием хлорофилла-а в этих организмах. В целом колебания количественных параметров летом связаны с внутрисезонной сукцессией видов в фитопланктоне и климатическими условиями соответствующих лет наблюдений [Летанская, 2003]. Анализ данных по состоянию летнего фитопланктона с соответствующими результатами по литературным источникам (табл. 9.1.2) показал, что, несмотря на меняющиеся условия среды в водоеме, продуктивность фитопланктона достаточно стабильна.

Являясь крупным глубоководным водоемом с замедленным водообменом, озеро изначально обладает высокой устойчивостью к внешним воздействиям, а внутриводоемные процессы играют доминирующую роль в функционировании экосистемы. Структурные перестройки, которые произошли в сообществе лидирующих видов водорослей, а именно массовое развитие криптоноад, также способствуют поддержанию гомеостаза системы [Stewart, 1986]. Таким образом, проведенные исследования фитопланктона Ладожского оз. позволяют сделать вывод о его стабильном состоянии в последнее десятилетие 21 века. Озеро по-прежнему, в целом, является мезотрофным водоемом.

9.2 Перифитон

Диатомовые водоросли являются важнейшим компонентом сообщества перифитона в литоральной зоне озер. Благодаря большому разнообразию диатомовой флоры, объединяющей виды с различной степенью толерантности к содержанию минеральных и органических веществ, диатомовые водоросли перифитона успешно используются для оценки качества озерных вод [Smol, 2010]. В большинстве исследований, посвященных изучению распределения диатомовых водорослей на литорали больших озер, первостепенное внимание уделяется влиянию антропогенного эвтрофирования [Davydova et al., 1999; Pla et al., 2005; Kireta et al., 2007; Рычкова, 2011]. За рубежом специалистами установлено, что диатомовые водоросли дают более устойчивую интегральную оценку качества воды по сравнению с изменчивыми гидрохимическими показателями [Reavie et al., 2006]. В то же время опыт применения европейских индексов качества воды показал, что индикационные показатели диатомовых водорослей, установленные в Западной и Центральной Европе, малоприменимы в Ладожском бассейне [Русанов, Станиславская, 2011]. Межрегиональные различия видового состава и влияние региональных факторов приводят к необходимости разработки индикаторных систем, специфичных для конкретных географических регионов [Kelly et al., 1998]. Несмотря на продолжительную историю изучения бентосных диатомовых водорослей в Ладожском оз. [Давыдова, 1968], индикаторная система на основе диатомовых водорослей до сих пор отсутствует. Известно, что водоросли имеют определяемые оптимумы на градиенте условий среды, которые могут быть использованы для экологической интерпретации пространственно-временных изменений видовой структуры [Potapova, 2007; Rusanov et al., 2009]. Целью данной работы являлось определение индикаторных показателей диатомовых водорослей Ладожско-

го оз., в основе которых лежат закономерности изменения пространственной структуры сообщества в зависимости от антропогенных факторов.

Пробы перифитона отбирали на 29 литоральных станциях Ладожского оз. в июле – августе 2014 и 2019 гг. Исследование охватывало все три геоморфологических района Ладоги: северный шхерный район, район открытых берегов восточного и западного побережья и мелководный южный район. Пробы перифитона отбирали с погруженных частей тростника [Станиславская, 1984]. Одновременно с отбором проб перифитона отбирались пробы воды для определения концентрации общего фосфора ($P_{\text{общ.}}$), нитратов (NO_3), общего азота ($N_{\text{общ.}}$) и цветности воды. При помощи зонда в полевых условиях проводили измерения температуры воды, pH, удельной электропроводности (УЭП), общей минерализации (ОМ), окислительно-восстановительного потенциала (ОВП), концентрации HCO_3 , O_2 и мутности воды.

Обработку диатомовых водорослей проводили по методу холодного сжигания хромовой смесью [Балонов, 1975]. Постоянные препараты диатомовых водорослей исследовали с помощью светового микроскопа Carl Zeiss AxioImager. D1. Для идентификации диатомовых водорослей использовали современные определители и таксономические сводки [Lange-Bertalot et al., 2017; Peeters, Ector, 2017; 2018; 2019; Wetzel et al., 2019]. В каждом препарате просчитывалось не менее 100 створок диатомовых водорослей. В качестве показателя обилия видов использовали относительную численность.

Из 202 видовых и внутривидовых таксонов для статистического анализа было отобрано 110 видов диатомовых водорослей с относительным обилием 0,1 % хотя бы на одной станции и встречаемостью ≥ 2 станции. Относительная численность видов была подвергнута arcsin-трансформации; факторы среды – log-трансформации для приведения к нормальному распределению и гомогенности данных [Sokal, 1981]. Анализ соответствия с удаленным трендом (detrended correspondence analysis, DCA) использовался для выявления основных направлений изменчивости видовой структуры диатомовых водорослей. Интерпретация осей DCA проводилась по результатам корреляционного анализа между координатами станций на первых двух осях ординации, факторами среды и географическими координатами станций. DCA был выполнен с использованием статистического пакета *vegan* 2,5–6 [Oksanen et al., 2019] в среде R 3,6,3 [R Development Core Team, 2016].

Оценка экологических оптимумов для 110 видов диатомовых водорослей перифитона по отношению к гидрохимическим параметрам ($P_{\text{общ.}}$ и УЭП) проведена при помощи метода взвешенного усреднения [ter Braak, 1989]. Оптимум u_i вида вычислялся как среднее арифметическое значений гидрохимической переменной во всех пробах, где встречался вид, взвешенное на относительное обилие вида

$$u_i = \sum_{k=1}^n y_{ik}x_k / \sum_{k=1}^n y_{ik}, \quad (9.2.1)$$

где y_{ik} – относительное обилие (удельная биомасса) i -го вида в k -й пробе, x_k – значение гидрохимической переменной в k -й пробе, n – общее число проб диатомового перифитона. Оценки экологических оптимумов видов

и расчетные значения $P_{\text{общ}}$ на станциях отбора проб получены с использованием программы C2 [Juggins, 2007].

В составе перифитона литоральной зоны Ладоги было выявлено 202 видовых и внутривидовых таксонов диатомовых водорослей. Среди наиболее обильных видов были *Achnanthes minutissimum* (Kützing) Czarnecki (среднее относительное обилие 45,4%), *Cocconeis placentula* Ehrenberg (5,2%), *Fragilaria gracilis* Østrup (4,4%), *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kützing (2,7%), *T. fenestrata* (Lyngbye) Kützing (2,0%) и *A. anastasiae* (Kaczmarek) Chaudev & Gololobova (1,5%).

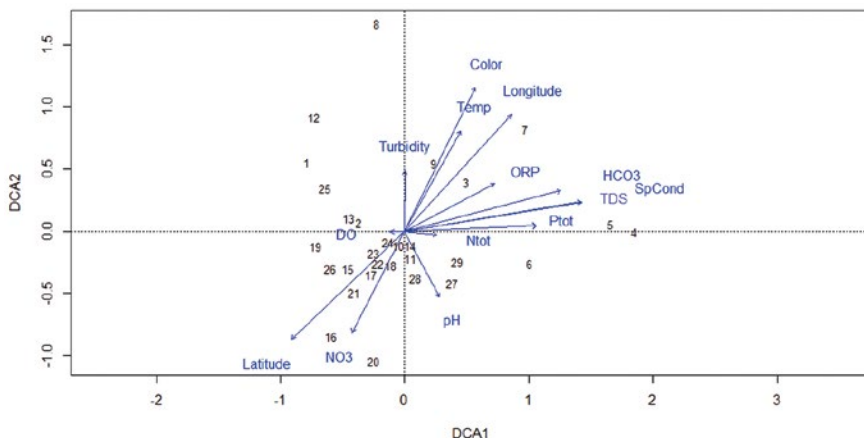


Рис. 9.2.1 – Ординационная диаграмма анализа соответствий с удаленным трендом (DCA) станций отбора проб диатомового перифитона и факторов среды в пространстве первых двух осей DCA. Станции: 1 – р. Назия, 2 – р. Кобона, 3 – дер. Дубно, 4 – устье р. Волхов, 5 – Волховская губа (2 км западнее), 6 – Волховская губа (4 км западнее), 7 – устье р. Сясь, 8 – дер. Вороново, 9 – Свирская губа, 10 – б. Андрусовская, 11 – о. Мантинсари, 12 – з-в Уксулаhti, 13 – г. Питкяранта, 14 – з-в Импилахти, 15 – з-в Хауккалаhti, 16 – п. Ляскеля, 17 – м. Умопиуми, 18 – п-о Рауталаhti, 19 – арх. Валаам; оз. Сисьярви, 20 – арх. Валаам; Никольский скит, 21 – о. Путсари, 22 – з-в Якимварский, 23 – о. Хаукасари, 24 – г. Приозерск; завод, 25 – г. Приозерск; устье р. Вуоксы, 26 – з-в Щучий, 27 – б. Владимирская, 28 – б. Далекая, 29 – м. Осиновец. Факторы среды: Temp – температура, SpCond – удельная электропроводность, TDS – общая минерализация, pH, ORP – окислительно-восстановительный потенциал, DO – концентрация O_2 , Turbidity – мутность, Color – цветность, P_{tot} – общий фосфор, N_{tot} – общий азот, NO_3 , HCO_3 , Latitude – широта, Longitude – долгота

DCA выявил две основные оси изменчивости видовой структуры сообщества (рис. 9.2.1). Первая ось DCA в основном коррелировала с удельной электропроводностью (УЭП), общей минерализацией, HCO_3 и $P_{\text{общ}}$, а также с географической широтой станций отбора проб (табл. 9.2.1). Таким образом, первая ось DCA отражала изменения в структуре диатомового сообщества, связанные с увеличением минерализации и эвтрофирования.

Максимальными положительными координатами на первой оси DCA характеризовались станции, испытывающие влияние загрязненных вод рр. Волхов (№ 4–6) и Сясь (№ 7) в Волховской губе южного района Ладоги (рис. 9.2.1). Для этих станций характерно увеличение обилия *Cocconeis pediculus* Ehrenberg, *C. placentula*, *Encyonema caespitosum* Kützing, *Fragilaria*

vaucheriae (Kützing) J.B. Petersen, *Navicula oppugnata* Hustedt, *Nitzschia paleacea* (Grunow) Grunow, *Placoneis clementispronina* Lange-Bertalot & Wojtal, *Planothidium straubianum* C.E. Wetzel, B. Van de Vijver & L. Ector, *Rhoicosphenia abbreviata* (C. Agardh) Lange-Bertalot и *Staurosira tabellaria* (W. Smith) Leuduger-Fortmorel (рис. 9.2.2, табл. 9.2.2). Все эти виды отличаются высокими оптимумами $P_{\text{общ.}}$ и УЭП, лежащими в основном в диапазоне 52–71 мкг·Р/л и 152–250 мкСм/см, соответственно (табл. 9.2.2). Максимальные отрицательные координаты на первой оси DCA получили станции № 19 (арх. Валаам, оз. Сисьярви) и 26 (з-в Щучий) из северного шхерного района Ладоги, № 25 (г. Приозерск; устье р. Вуоксы) из района открытых берегов, а также ст. № 1 (р. Назия) в бухте Петрокрепость из южного района Ладоги (рис. 9.2.1). Эти станции отличались увеличением обилия *Fragilaria gracilis*, *F. tenera* (W. Smith) Lange-Bertalot, *Diatoma moniliformis* (Kützing) D.M. Williams и *Tabellaria flocculosa*, для которых характерны низкие оптимумы $P_{\text{общ.}}$ и УЭП, варьирующие в диапазоне 16–20 мкг·Р/л и 82–103 мкСм/см, соответственно (рис. 9.2.2, табл. 9.2.2).

Таблица 9.2.1

Коэффициенты линейной корреляции факторов среды с первой и второй осью анализа соответствий с удаленным трендом (DCA).

Параметр	DCA1	DCA2	R ²	P
Температура (Temp)	0,489	0,873	0,285	<0,05
Удельная электропроводность (SpCond)	0,987	0,162	0,698	<0,001
Общая минерализация (TDS)	0,986	0,166	0,699	<0,001
pH	0,468	–0,883	0,119	0,192
Окислительно-восстановительный потенциал (ORP)	0,885	0,465	0,224	<0,05
O ₂ (DO)	–0,999	–0,037	0,005	0,913
Мутность (Turbidity)	0,002	0,999	0,079	0,361
Цветность (Color)	0,440	0,898	0,554	<0,001
Общий фосфор (P _{tot})	0,935	0,353	0,072	0,360
Общий азот (N _{tot})	0,993	–0,114	0,023	0,747
NO ₃	–0,464	–0,885	0,282	<0,05
HCO ₃	0,968	0,251	0,566	<0,001
Широта (Latitude)	–0,724	–0,689	0,529	<0,001
Долгота (Longitude)	0,676	0,737	0,543	<0,001

Вторая ось DCA коррелировала положительно с цветностью, отражая влияние речных вод на ст. № 12 (р. Уксунйоки, з-в Уксунлахти), 8 (р. Вороньжа, дер. Вороново) и 7 (р. Сясь) (рис. 9.2.1). На этих станциях отмечено увеличение обилия бентосных *Tabellaria fenestrata* (Lyngbye) Kützing, *Staurosira venter* (Ehrenberg) Cleve & J.D. Möller, *Eunotia bilunaris* (Ehrenberg) Schaarschmidt, *E. minor* (Kützing) Grunow, *E. rhomboidea* Hustedt, а также планктонных центрических *Aulacoseira* spp. (рис. 9.2.2, табл. 9.2.2). Отрицательная корреляция второй оси DCA с концентрацией NO₃ выражалась в увеличении обилия *Didymosphenia geminata* (Lyngbye) Mart. Schmidt, *Diatoma tenue* C. Agardh и *Nitzschia fonticola* (Grunow) Grunow на ст. № 16 (п. Ляскеля) и 20 (арх. Валаам; Никольский скит), указывая на связанное с сельскохозяйственной деятельностью загрязнение воды нитратами.

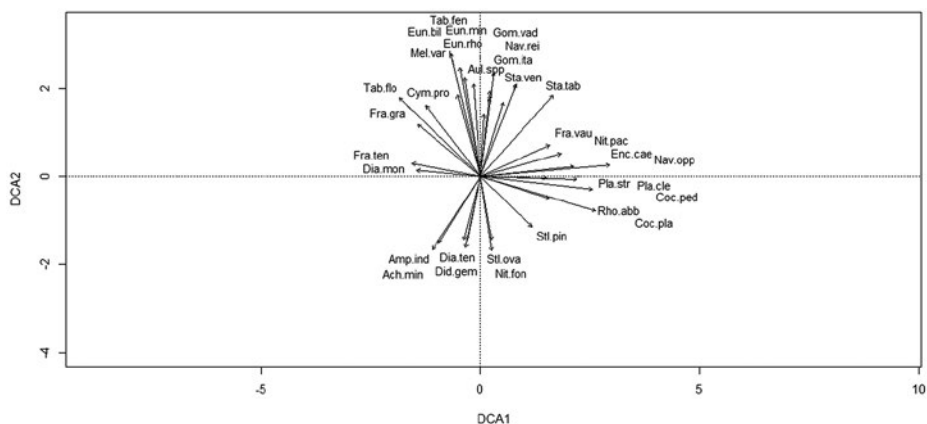


Рис. 9.2.2 – Ординационная диаграмма анализа соответствий с удаленным трендом (DCA) видов диатомовых водорослей, показавших статистически значимую ($p < 0,05$) корреляцию с первыми двумя осями DCA. Виды: Ach. min – *Achnanthes minutissimum*, Amp. ind – *Amphora indistincta*, Aul. spp – *Aulacoseira* spp., Coc. ped – *Cocconeis pediculus*, Coc. pla – *C. placentula*, Cym. pro – *Cymbella proxima*, Dia. mon – *Diatoma moniliformis*, Dia. ten – *D. tenuis*, Did. gem – *Didymosphenia geminata*, Enc. cae – *Encyonema caespitosum*, Eun. bil – *Eunotia bilunaris*, Eun. min – *E. minor*, Eun. rho – *E. rhomboidea*, Fra. gra – *Fragilaria gracilis*, Fra. vau – *F. vaucheriae*, Fra. ten – *F. tenera*, Gom. ita – *Gomphonema italicum*, Gom. vad – *G. varioreduncum*, Mel. var – *Melosira varians*, Nav. opp – *Navicula oppugnata*, Nav. rei – *N. reichardtiana*, Nit. fon – *Nitzschia fonticola*, Nit. pac – *N. paleacea*, Pla. cle – *Placoneis clementispronina*, Pla. str – *Planothidium straubianum*, Rho. abb – *Rhoicosphenia abbreviata*, Sta. tab – *Staurosira tabellaria*, Sta. ven – *S. venter*, Stl. ova – *Staurosirella ovata*, Stl. pin – *S. pinnata*, Tab. fen – *Tabellaria fenestrata*, Tab. flo – *T. flocculosa*

Полученные методом взвешенного усреднения оптимумы 110 видов диатомовых водорослей по отношению к $P_{\text{общ}}$ использовались для расчета значений $P_{\text{общ}}$ на каждой станции. Полученные на основе видовой структуры «подправленные» значения $P_{\text{общ}}$ использовались для классификации станций по степени эвтрофирования (рис. 9.2.3). Связь оцененных взвешенным усреднением значений $P_{\text{общ}}$ (P_{est}) с измеренными значениями (P_{obs}) аппроксимировалась следующей линейной зависимостью: $P_{\text{est}} = 5,81 + 0,78 P_{\text{obs}}$ ($r^2 = 0,776$).

Таблица 9.2.2

Коэффициенты линейной корреляции видов диатомовых водорослей с первой и второй осью DCA и значения оптимумов видов по отношению к $P_{\text{общ}}$ (Opt P, мкг/л) и удельной электропроводности (Opt EI, мкСм/см)

Вид	Opt P	Opt EI	DCA1	DCA2	R ²	P
<i>Achnanthes minutissimum</i>	19	99	–0,552	–0,834	0,337	<0,01
<i>Amphora indistincta</i>	21	103	–0,204	–0,979	0,184	<0,05
<i>Aulacoseira</i> spp.	28	113	0,059	0,998	0,172	<0,05
<i>Cocconeis pediculus</i>	71	231	0,994	–0,112	0,559	<0,001
<i>C. placentula</i>	64	188	0,958	–0,286	0,634	<0,001

Вид	Opt P	Opt EI	DCA1	DCA2	R ²	P
<i>Cymbella proxima</i>	21	101	–0,612	0,791	0,354	<0,01
<i>Diatoma moniliformis</i>	20	103	–0,996	0,094	0,182	<0,05
<i>D. tenuis</i>	22	103	–0,260	–0,966	0,188	<0,05
<i>Didymosphenia geminata</i>	21	88	–0,208	–0,978	0,231	<0,05
<i>Encyonema caespitosum</i>	52	166	0,994	0,111	0,391	<0,01
<i>Eunotia bilunaris</i>	21	98	–0,186	0,983	0,542	<0,01
<i>E. minor</i>	20	100	–0,159	0,987	0,445	<0,01
<i>E. rhomboidea</i>	22	103	–0,079	0,997	0,381	<0,05
<i>Fragilaria gracilis</i>	19	101	–0,771	0,637	0,294	<0,05
<i>F. vaucheriae</i>	69	173	0,910	0,414	0,255	<0,05
<i>F. tenera</i>	16	100	–0,981	0,193	0,214	<0,05
<i>Gomphonema italicum</i>	24	118	0,113	0,994	0,324	<0,05
<i>G. varioreduncum</i>	27	123	0,129	0,992	0,479	<0,01
<i>Melosira varians</i>	26	95	–0,275	0,961	0,318	<0,05
<i>Navicula oppugnata</i>	78	190	0,996	0,090	0,740	<0,01
<i>N. reichardtiana</i>	26	128	0,358	0,934	0,431	<0,01
<i>Nitzschia fonticola</i>	27	105	0,149	–0,989	0,246	<0,05
<i>N. paleacea</i>	58	250	0,962	0,274	0,307	<0,05
<i>Placoneis clementispronina</i>	101	196	0,999	–0,028	0,412	<0,01
<i>Planothidium straubianum</i>	37	152	0,997	–0,014	0,194	<0,05
<i>Rhoicosphenia abbreviata</i>	38	185	0,954	–0,299	0,228	<0,05
<i>Staurosira tabellaria</i>	56	199	0,746	0,666	0,522	<0,01
<i>S. venter</i>	44	184	0,296	0,955	0,266	<0,05
<i>Staurosirella ovata</i>	25	116	0,174	–0,985	0,181	<0,05
<i>S. pinnata</i>	32	134	0,718	–0,696	0,225	<0,05
<i>Tabellaria fenestrata</i>	21	95	–0,236	0,972	0,703	<0,001
<i>T. flocculosa</i>	16	82	–0,716	0,698	0,564	<0,001

По величине значений P_{est} литоральные станции Ладожского озера разделились на три группы, соответствующие олиготрофным, мезотрофным и эвтрофным условиям (рис. 9.2.3). В первую группу с олиготрофным статусом ($< 20 \text{ мкг} \cdot \text{P/л}$) вошло 16 станций, из которых большинство (восемь) станций находятся в северном шхерном районе (№ 13, 15–19, 21, 22), пять станций – в районе открытых берегов восточного и западного побережья (№ 10–12, 28, 29) и три станции – в южном районе (№ 1, 2, 9). Во вторую группу с мезотрофным статусом ($21–50 \text{ мкг} \cdot \text{P/л}$) вошло десять станций. Из них четыре станции находятся в северном шхерном районе (№ 14, 20, 23, 26), три станции – в районе открытых берегов (№ 24, 25, 27) и три стан-

ции – в южном районе (№3, 6, 8). В третью группу с эвтрофным статусом (51–100 мкг·Р/л) вошло всего три станции. Все эти станции располагаются в южном районе (Волховская губа) и находятся под влиянием загрязненных вод р. Волхов (№4, 5) и р. Сясь (№7).

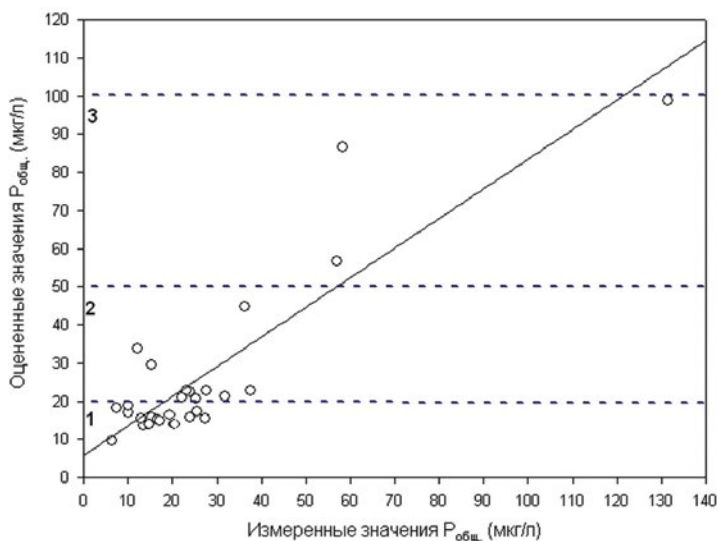


Рис. 9.2.3 – График зависимости между измеренными и рассчитанными средневзвешенными значениями $P_{общ}$. 1–3 – области концентрации $P_{общ}$, соответствующие олиготрофным (1), мезотрофным (2) и эвтрофным (3) условиям

В целом проведенное исследование показало, что гидрохимические показатели антропогенного загрязнения ($P_{общ}$, УЭП) тесно связаны с пространственным изменением видовой структуры диатомовых водорослей перифитона Ладожского оз. Установленные зависимости позволяют использовать полученные индикаторные коэффициенты видов для оценки пространственно-временной изменчивости трофических условий и качества воды в литоральной зоне Ладоги. В то же время для увеличения надежности индикации по диатомовым водорослям параллельный отбор проб перифитона и параметров качества воды необходимо проводить не только в конце летнего сезона, но и в весенний период, когда развитие сообщества не испытывает ограничения элементами минерального питания. Принимая во внимание особенности сукцессии диатомового перифитона, определение индикаторных показателей на ранних стадиях развития сообщества позволит уменьшить смещение оценки оптимума видов в олиготрофную сторону.

9.3 Высшая водная растительность озера под воздействием природных и антропогенных факторов

Ладожское оз. относится к озерам со слабым развитием водной растительности, что обусловлено неблагоприятными для развития макрофитов гидродинамическими и эдафическими особенностями литоральной зоны

водоема [Распопов, 1985]. С отрицательным воздействием прибоя связано ограниченное развитие сообществ макрофитов и, как следствие, низкое разнообразие в составе растительных ассоциаций на прибойной каменистой и песчаной литорали, имеющей широкое распространение в озере. Наиболее приемлемые условия для развития водной растительности создаются на изолированных от волнового воздействия мелководьях в заливах шхерной части Ладожского оз. и под защитой каменных гряд и банок в мелководных заливах южной части озера.

По характеру высшей водной растительности Ладожское оз. подразделяется на три геоботанических района: северный шхерный район, район открытых берегов и мелководный южный район [Распопов, 1968]. Среди геоботанических районов озера наибольшим разнообразием по составу растительных ассоциаций обладает шхерный район, включая Валаамский архипелаг. Во многом высокое разнообразие растительных группировок в шхерном районе обусловлено более широким распространением защищенной от воздействия прибоя илистой литорали, являющейся основным местом произрастания макрофитов. Преобладание каменистых и песчаных отложений в литоральной зоне западного и восточного побережья Ладоги обуславливает значительно более низкое разнообразие группировок макрофитов в районе открытых берегов. Более благоприятные условия для произрастания макрофитов существуют на затишной мелкопесчаной литорали, повсеместно встречающейся вдоль всей береговой линии Ладожского озера в бухтах и вершинах заливов.

Гидрохимический режим вследствие большой динамичности вод Ладоги не играет определяющей роли в пространственном распределении высшей водной растительности [Распопов, 1985]. Однако на участках затишной литорали, где влияние прибоя на развитие макрофитов менее выражено, эвтрофирование приводит к заметным изменениям в составе водной растительности. Реки являющиеся основными поставщиками биогенных соединений в Ладожском оз. Благодаря интенсивной хозяйственной деятельности на водосборе р. Волхов, воды Волховской губы в южном районе Ладоги значительно отличаются от остальных районов более высоким содержанием фосфора [Петрова, Игнатьева, 2013]. Вследствие этого в Волховской губе развиваются характерные для эвтрофных условий виды водных растений [Русанов, 2011].

Зависимость видового состава макрофитов от изменений трофического статуса озер показана многими исследованиями [Toivonen, Huttunen, 1995; Lehmann, Lachavanne, 1999; Clayton, Edwards, 2006]. Трансформация сообществ макрофитов при эвтрофировании происходит за счет агрессивного распространения толерантных к эвтрофированию видов, вытесняющих менее конкурентоспособные виды [Keddy et al., 1997]. Ухудшение условий подводной освещенности, вызванное увеличением биомассы фитопланктона при эвтрофировании, приводит к замещению экологически требовательных видов на более адаптированные к высокой мутности воды [Sand-Jensen et al., 2000]. Благодаря эмпирически установленным зависимостям встречаемости макрофитов на градиенте концентрации биогенных веществ, макрофиты находят широкое применение в индикации степени эвтрофирования озерных систем [Willby et al., 2000; Penning et al., 2008].

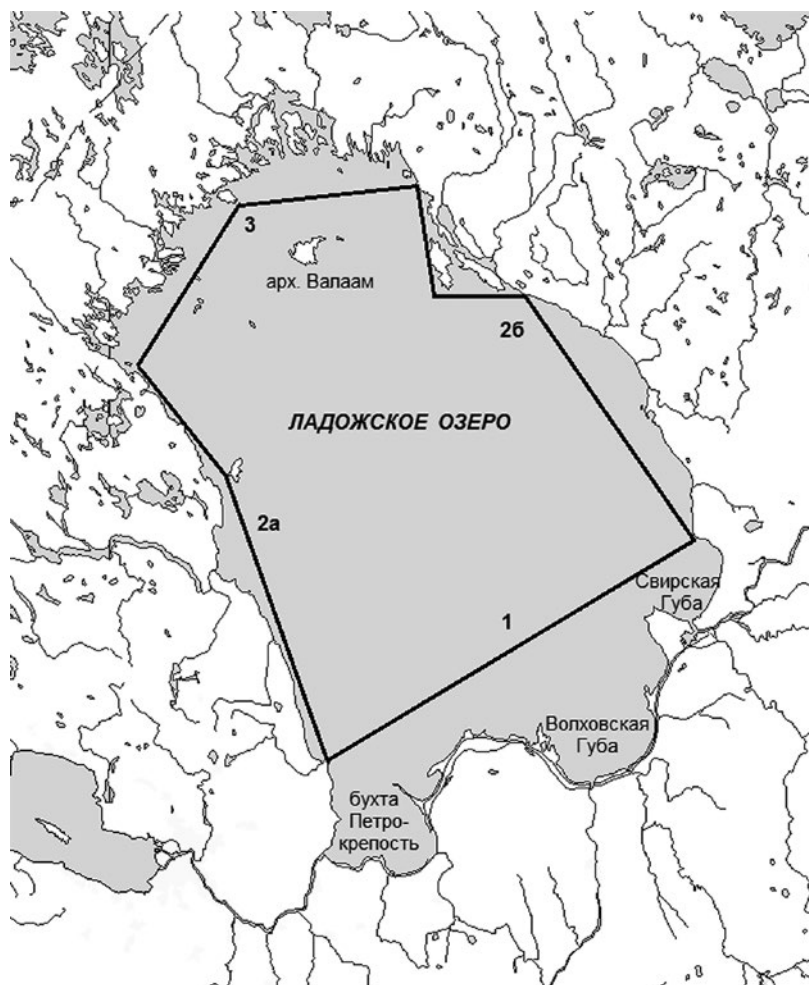


Рис. 9.3.1 – Геоморфологические районы Ладожского озера. 1 – южный район; 2а – западное побережье; 2б – восточное побережье; 3 – шхерный район

Исследование особенностей зарастания макрофитами литорали Ладожского оз. проводилось в ходе литорального рейса в июле – августе 2019 г. Описание водной растительности проводилось методом глазомерного картирования в ходе объезда на лодке береговой линии длиной 300–500 м до глубины распространения погруженной растительности [Катанская, 1981]. Изучено 29 станций, расположенных во всех трех геоморфологических районах Ладоги: южном мелководном районе (9 станций), районе открытых берегов восточного и западного побережья (8 станций) и северном шхерном районе (12 станций) (рис. 8.3). По характеру донных отложений исследованные станции подразделялись на биотопы каменисто-песчаной, мелкопесчаной, илистой и глинистой литорали (табл. 9.3.1). Для характеристики растительных сообществ были использованы списки видов-индикаторов [Toivonen, Huttunen, 1995; Willby et al., 2000; Penning et al., 2008].

Таблица 9.3.1

**Местоположение, географические координаты,
удельная электропроводность (УЭП, мкСм/см) и характер грунтов
на станциях описания водной растительности в Ладожском оз.**

№	Местоположение	Координаты	УЭП	Тип грунта
Южный район				
1	пос. им. Морозова	59.973017 N, 31.069033 E	87	заиленный песок
2	р. Назия	59.905733 N, 31.37415 E	95	мелкопесчаный
3	р. Кобона	60.020633 N, 31.543517 E	98	мелкопесчаный
4	устье р. Волхов	60.11725 N, 32.326417 E	235	заиленный песок
5	Выход из устья р. Волхов	60.129317 N, 32.323817 E	144	мелкопесчаный
6	2 км западнее устья р. Волхов	60.1273 N, 32.294483 E	130	мелкопесчаный
7	4 км западнее устья р. Волхов	60.126033 N, 32.262483 E	149	мелкопесчаный
8	дер. Вороново	60.2729 N, 32.626533 E	221	заиленный песок
9	устье р. Свирь	60.497367 N, 32.814983 E	54	мелкопесчаный
Район открытых берегов (восточный берег)				
10	бухта Андрусовская	60.979067 N, 32.604517 E	90	каменисто-песчаный
11	о-в Мангинсари	61.342017 N, 31.663817 E	74	каменисто-песчаный
12	з-в Уксунлахти	61.400433 N, 31.67495 E	82	мелкопесчаный
Северный шхерный район				
13	г. Питкяранта	61.565333 N, 31.467283 E	88	заиленный песок
14	з-в Импилахти	61.6213 N, 31.1719 E	85	мелкопесчаный
15	з-в Хауккалаhti	61.635367 N, 31.187367 E	70	глинисто-песчаный
16	пос. Ляскеля	61.706867 N, 31.001133 E	62	мелкопесчаный
17	мыс Умоппиуми	61.680933 N, 31.092833 E	74	глинисто-песчаный
18	п-о. Раутолахти	61.750983 N, 30.878317 E	76	глинисто-песчаный
19	вблизи г. Сортавала	61.745483 N, 30.804083 E	81	мелкопесчаный
20	о. Путсари	61.514367 N, 30.529717 E	82	мелкопесчаный
21	з-в Якимварский	61.48595 N, 30.230267 E	88	глинисто-песчаный
22	з-в Якимварский, с. Соролла	61.481583 N, 30.227267 E	86	заиленный песок
23	о. Койеонсари (у о. Хауккасари)	61.283983 N, 30.147933 E	89	каменисто-песчаный
24	з-в Щучий	61.083767 N, 30.092717 E	98	мелкопесчаный
Район открытых берегов (западный берег)				
25	г. Приозерск	61.044067 N, 30.1786 E	64	мелкопесчаный
26	бухта Владимирская	60.836717 N, 30.470583 E	95	мелкопесчаный
27	з-в Тайпаловский, устье р. Бурной	60.619567 N, 30.52725 E	75	мелкопесчаный
28	бухта Далекая	60.572 N, 30.675867 E	79	каменисто-песчаный
29	м. Осиновец	60.10925 N, 31.08625 E	90	каменисто-песчаный

На обследованных станциях было обнаружено 60 видов макрофитов (табл. 9.3.2). К наиболее распространенным высшим водным растениям относятся тростник южный (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), рдест пронзеннолистный (*Potamogeton perfoliatus* L.) и камыш озерный (*Scirpus lacustris* L.). Очень редкими являются полушник озерный (*Isoëtis lacustris* L.), лужница водяная (*Limnosella aquatica* L.), ситняг игольчатый (*Eleocharis acicularis* (L.) Roem. et Schult.), стрелолист плавающий (*Sagittaria natans* Pall.), рдест альпийский (*Potamogeton alpinus* Balb.) и шелковник не-вский (*Batrachium nevense* Tzvel.). Из них полушник озерный и стрелолист плавающий включены в Красную книгу природы Ленинградской области [Красная книга..., 2000].

Таблица 9.3.2

Видовой состав и экологические группы (Гр) макрофитов литоральной зоны Ладожского оз. Группы макрофитов: гд – погруженные укореняющиеся и свободно плавающие в толще воды гидрофиты; пг – укореняющиеся гидрофиты с плавающими на воде листьями и гидрофиты, свободно плавающие на поверхности воды; гл – гелофиты; гг – гигрогелофиты. Районы: ЮР – южный район, ЗП – западное побережье, ВП – восточное побережье, ШР – шхерный район

Таксон	Гр	Районы литоральной зоны			
		ЮР	ЗП	ВП	ШР
CHAROPHYTA					
Nitellaceae					
<i>Nitella</i> sp.	гд	+	+		+
BRYOPHYTA					
Fontinaliaceae					
<i>Fontinalis antipyretica</i> Hedw.	гд	+			
LYCOPODIOPHYTA					
Isoëtaceae					
<i>Isoëtis lacustris</i> L.	гд				+
EQUISETOPHYTA					
Equisetaceae					
<i>Equisetum fluviatile</i> L.	гл	+	+		+
MAGNOLIOPHYTA					
Liliopsida					
Typhaceae					
<i>Typha angustifolia</i> L.	гл	+			+
<i>Typha latifolia</i> L.	гл	+	+		+
Sparganiaceae					
<i>Sparganium angustifolium</i> Michx.	гл				+
<i>Sparganium emersum</i> Rehm.	гл	+	+		+
<i>Sparganium glomeratum</i> (Laest.) L. Neum.	гл				+
<i>Sparganium gramineum</i> Georgi	гл	+			
<i>Sparganium minimum</i> Wallr.	гл	+			+

Таксон	Гр	Районы литоральной зоны			
		ЮР	ЗП	ВП	ШР
Potamogetonaceae					
<i>Potamogeton alpinus</i> Balb.	ГД				+
<i>Potamogeton compressus</i> L.	ГД				+
<i>Potamogeton gramineus</i> L.	ГД	+	+	+	+
<i>Potamogeton lucens</i> L.	ГД				+
<i>Potamogeton natans</i> L.	ГД	+			+
<i>Potamogeton pectinatus</i> L.	ГД	+			
<i>Potamogeton perfoliatus</i> L.	ГД	+	+	+	+
<i>Potamogeton pusillus</i> L.	ГД				+
Alismatacea					
<i>Alisma plantago-aquatica</i> L.	ГЛ	+	+		+
<i>Sagittaria natans</i> Pall.	ПГ				+
<i>Sagittaria sagittifolia</i> L.	ГЛ	+		+	+
Butomaceae					
<i>Butomus umbellatus</i> L.	ГЛ	+			+
Hydrocharitaceae					
<i>Elodea canadensis</i> Michx.	ГД		+		+
<i>Hydrocharis morsus-ranae</i> L.	ПГ	+			+
<i>Stratiotes aloides</i> L.	ПГ				+
Poaceae					
<i>Glyceria fluitans</i> (L.) R. BR.	ГЛ				+
<i>Glyceria maxima</i> (C. Hartm.) Holmb.	ГЛ				+
<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud.	ГЛ	+	+	+	+
<i>Scolochloa festucacea</i> (Willd.) Link	ГЛ				+
Cyperaceae					
<i>Carex acuta</i> L.	ГЛ				+
<i>Carex aquatilis</i> Wahlenb.	ГЛ				+
<i>Carex nigra</i> (L.) Reichard	ГГ			+	
<i>Eleocharis acicularis</i> (L.) Roem. et Schult.	ГГ	+	+	+	+
<i>Eleocharis palustris</i> (L.) Roem. et Schult.	ГЛ		+	+	+
<i>Scirpus lacustris</i> L.	ГЛ	+			+
Lemnaceae					
<i>Lemna minor</i> L.	ПГ	+			+
<i>Lemna trisulca</i> L.	ГД				+
Iridaceae					
<i>Iris pseudacorus</i> L.	ГГ	+			+
MAGNOLIOPHYTA					
Magnoliopsida					
Polygonaceae					
<i>Persicaria amphibia</i> (L.) S. F. Gray	ПГ	+	+	+	+

Таксон	Гр	Районы литоральной зоны			
		ЮР	ЗП	ВП	ШР
<i>Persicaria minor</i> (Huds.) Opiz	ГГ			+	+
<i>Rumex aquaticus</i> L.	ГГ	+			
Nymphaeaceae					
<i>Nuphar lutea</i> (L.) Smith	ПГ	+		+	+
<i>Nymphaea candida</i> J. Presl.	ПГ	+			
Ranunculaceae					
<i>Batrachium dichotomum</i> (Schmalh.) Trautv.	ГД				+
<i>Batrachium floribundum</i> (Bab.) Dumort.	ГД		+		+
<i>Batrachium nevense</i> Tzvel.	ГД		+		
<i>Ranunculus reptans</i> L.	ГГ			+	+
Callitrichaceae					
<i>Callitriche hermaphroditica</i> L.	ГД		+		+
<i>Callitriche palustris</i> L.	ГД				+
Lythraceae					
<i>Lythrum salicaria</i> L.	ГГ	+	+	+	+
Haloragaceae					
<i>Myriophyllum alterniflorum</i> DC.	ГД	+			+
<i>Myriophyllum spicatum</i> L.	ГД				+
<i>Myriophyllum verticillatum</i> L.	ГД		+		+
Apiaceae					
<i>Cicuta virosa</i> L.	ГГ				+
Primulaceae					
<i>Lysimachia vulgaris</i> L.	ГГ				+
<i>Naumburgia thyrsiflora</i> (L.) Reichenb.	ГЛ				+
Boraginaceae					
<i>Myosotis palustris</i> L.	ГГ			+	+
Scrophulariaceae					
<i>Limnosella aquatica</i> L.	ГГ		+		
Lentibulariaceae					
<i>Utricularia vulgaris</i> L.	ГД	+			+

Проведенное исследование показало, что видовое богатство и разнообразие высшей водной растительности Ладожского оз. зависит от гидродинамических условий на литорали. Минимальное разнообразие водной растительности отмечалось на открытой прибойной литорали, где доминировали заросли тростника и рдеста пронзеннолистного. Выраженные пространственные изменения видового состава водной растительности наблюдались вдоль градиента трофического статуса. Ненарушенные природные местообитания характеризовались развитием комплекса придонных растений – полушника озерного, ситняга игольчатого, лютика стелющегося (*Ranunculus reptans* L.) и таких видов-индикаторов чистых условий среды, как уруть оче-

реднолистная (*Myriophyllum alterniflorum* DC.), ежеголовник узколистый (*Sparganium angustifolium* Michx.), рдест альпийский (*Potamogeton alpinus* Balb.), шелковник дихотомический (*Batrachium dichotomum* (Schmalh.) Trautv.) и стрелолист плавающий. Данные растительные сообщества характерны для открытых волновому воздействию станций северного шхерного района. Закрытые от волнения станции с илистыми и глинистыми грунтами в шхерном районе характеризовались развитием растений, адаптированных к повышенному содержанию элементов минерального питания и органического вещества в донных осадках – урути мутовчатой (*Myriophyllum verticillatum* L.), манника большого (*Glyceria maxima* (C. Hartm.) Holmb.), телореза азловидного (*Stratiotes aloides* L.), ежеголовника всплывающего (*Sparganium emersum* Rehm.), стрелолиста обыкновенного (*Sagittaria sagittifolia* L.) и кубышки желтой (*Nuphar lutea* (L.) Smith). Влияние антропогенного эвтрофирования на видовой состав макрофитов различалось в зависимости от геоботанических районов. На подверженных антропогенному влиянию участках в северном районе (г. Питкяранта, Якимварский залив) развивались ценозы таких видов-индикаторов эвтрофирования, как уруть колосистая (*Myriophyllum spicatum* L.), рдест маленький (*Potamogeton pusillus* L.) и манник большой, а в южном районе (Волховская губа) – рогоз узколистый (*Typha angustifolia* L.), сусак зонтичный (*Butomus umbellatus* L.) и рдест гребенчатый (*Potamogeton pectinatus* L.). Зависимость пространственной структуры сообщества макрофитов от степени антропогенного нарушения указывает на потенциальную возможность использования макрофитов в биоиндикации уровня антропогенной нагрузки на литорали Ладожского оз. [Русанов, 2011].

9.4 Бактериопланктон

Ладожское оз. относится к водоемам замедленного водообмена, наполнение которого происходит преимущественно за счет речного стока с его бассейна, соответственно, формирование водных масс в озере зависит от особенностей вод, поступающих в него притоков. Поэтому в исследованиях ИНОЗ РАН уделяется внимание оценке качества вод по микробиологическим показателям как самого озера, так и его притоков. Благодаря широкому диапазону адаптационных возможностей и высоким скоростям роста микроорганизмы являются одним из наиболее информативных компонентов экосистем, способным реагировать на малейшие изменения экологических условий. Общая численность бактерий в воде является одним из показателей чистоты вод [Романенко, 1979; Руководство по методам ..., 1982] и трофического статуса водоемов [Романенко, 1979; Гак, 1975; Локк, 1986; Тифенбах, 1986; Дзюбан и др., 2007], а также в большой степени характеризует интенсивность процессов самоочищения вод.

Бактериопланктон притоков Ладожского оз. Первые микробиологические данные Института озераведения, касающиеся некоторых притоков озера, были получены при проведении работ Ладожской экспедицией на протяжении вегетационного сезона 1987 г. Следующие достаточно подробные микробиологические исследования выполнялись в конце 90-х годов

XX – начале XXI века [Чеботарев, 2013]. В 2013 и 2014 гг. микробиологические данные были собраны для некоторых притоков, в основном в летний период (табл. 9.4.1).

Таблица 9.4.1

Общая численность бактерий (N, млн·кл./мл) в притоках Ладожского оз. летом 1987, 1998, 2005, 2013 и 2014 гг.

Река	N					
	1987 (июль)	1998* (июль)	2005* (июль)	2013 (июнь)	2013 (август)	2014 (июль)
Волхов	2,40	2,04	1,90	5,6	3,6	–
Свирь	1,70	1,22	1,48	3,1	4,2	2,74
Сясь	1,00	1,21	1,56	5,2	4,2	–
Паша	3,40	1,20	1,45	–	–	1,75
Оять	2,30	0,95	1,34	–	–	3,54
Олонка	1,90	1,76	1,55	–	–	–
Янис	1,10	1,13	1,35	–	–	–
Бурная	2,00	1,51	2,44	–	1,7	–
Авлога			1,1	–	1,2	–

*– [Чеботарев, 2013]

В 1987, 1998 и 2005 гг. все притоки по уровню трофии относились к олиго-мезотрофным (0,2–1,4 млн·кл./мл) и мезотрофным (0,9–5,9 млн·кл./мл) водотокам. Судя по данным, полученным в 2013 и 2014 гг., рр. Волхов, Свирь, Сясь и Оять являлись скорее мезотрофными и мезотрофно-эвтрофными (эвтрофные водоемы – 4,2–12,9 млн·кл./мл) [Копылов, 2007], тогда как вплоть до 2005 г. их статус был типично мезотрофным. Это может свидетельствовать об интенсификации хозяйственной деятельности на водосборе этих рек в период 2005–2013 гг. Бурная и Авлога, как и в предыдущие годы, имели типично мезотрофный статус. В конце лета и осенью 2013 г., а также весной и летом 2014 г. были проведены 4 объезда притоков Ладожского оз. с целью санитарно-микробиологической характеристики различных водотоков и выявления участков, подвергающихся антропогенному воздействию. В результате были получены данные за весь вегетационный сезон, что позволило адекватно оценить внутригодовую динамику величин выбранных параметров и повысило надежность сделанных выводов.

Определялись следующие санитарно-микробиологические показатели: 1) общее микробное число (ОМЧ) [Корш, 1978; СанПиН 2.1.4.1074–01, 2001]; 2) количество общих колиформных бактерий (ОКБ) (метод мембранной фильтрации); 3) количество термотолерантных колиформных бактерий (ТКБ) [МУК 4.2.1884–04–2004, 2004].

ОМЧ характеризует численность так называемых сапрофитных бактерий и является показателем общего загрязнения водоемов органическими веществами различного происхождения. ОКБ является индикатором любого фекального загрязнения, а их количество указывает на степень загрязнения и, следовательно, на степень угрозы для здоровья человека [Меди-

цинская..., 1999]. Термотолерантные колиформные бактерии (типичный представитель – *E. coli*) входят в состав общих колиформных бактерий, являются индикатором свежего фекального загрязнения и могут долгое время (несколько месяцев) оставаться в воде жизнедеятельными [Wang, 1998; Дармаева, 2007]. Общее микробное число и особенно численность общих колиформных бактерий являются обязательными санитарно-гигиеническими показателями качества воды любого водоема [Корш, 1978; СанПиН 2.1.5.980–00, 2001].

Для оценки степени хозяйственно-бытового (в том числе фекального) загрязнения водных объектов часто применяется гигиеническая классификация. Она построена на основе органолептических, токсикологических, санитарных и бактериологических показателей состояния водоема. Характеристикой состояния водного объекта по микробиологическим показателям служит степень его загрязнения по четырем градациям (индексы загрязнения: 0, 1, 2, 3) [Опекунов, 2001]. Для вод, используемых для рекреации, а также для водоемов в черте населенных мест установлены более жесткие, чем в гигиенической классификации, санитарные нормы – численность общих колиформных бактерий не должна быть более 500 КОЕ/100 мл, а термотолерантных колиформных бактерий – не более 100 КОЕ/100 мл [СанПиН 2.1.5.980–00, 2001].

Анализ данных по численности общих колиформных бактерий показал, что воды подавляющего большинства исследованных притоков соответствовали нулевому классу загрязнения, т.е. были пригодны для всех видов использования, в том числе и для рекреации. Летом 2013 г. по численности ОКБ выделялись устье р. Волхов и р. Тулокса. Качество воды этих водотоков по гигиенической классификации соответствовало классу загрязнения 1. В вышеуказанных водотоках наблюдалось существенное фекальное загрязнение. В осенний период качество воды всех исследованных притоков соответствовало нулевому классу загрязнения (табл. 9.5.2) [Опекунов, 2001].

Весной 2014 г. численность ОКБ во многих притоках Ладожского оз. была значительно выше, чем летом и осенью 2013 г. (табл. 9.5.2). Воды почти всех притоков в это время соответствовали 1–2-му классам загрязнения [Опекунов, 2001]. Исключение составляли реки Морье, Бурная, Вуокса, Сясь и Назия. Возможно, такие высокие величины вышеуказанного показателя в весенний период были связаны с поступлением в притоки терригенного стока с водосбора во время половодья. Однако в данном случае речь идет только о фекальном загрязнении, так как численность сапрофитных бактерий (ОМЧ) весной 2014 г. в реках практически не увеличилась по сравнению с летом и осенью 2013 г. В летний период 2014 г. в отдельных реках летом происходило повышение численности ОКБ по сравнению с весенним периодом, иногда весьма существенное (до 15,4 раза), как, например, в Бурной, Вуоксе, Свири, Морье, Сяси, Ояти, устье Волхова. Особенно оно было выражено в Свири и Сяси. В реках Вуоксе и Морье весной рост общих колиформных бактерий вообще не регистрировался, тогда как в июле отмечалось высокое содержание этих бактерий. В некоторых притоках – реках Олонка, Авлога, Видлица, Лава – напротив, численность ОКБ резко снижалась (табл. 9.4.2). По-видимому, в эти водотоки фекальное загрязнение по-

ступало только с терригенным стоком, т. е. здесь не было других постоянных источников загрязнения. Об этом дополнительно свидетельствовали низкая численность или отсутствие роста этой группы бактерий в вышеуказанных притоках летом и осенью 2013 г. Превышение норматива, установленного для рекреации (500 КОЕ/100 мл) в 2013 г., наблюдалось только летом в устье Волхова и в Тулоксе. В 2014 г., напротив, в подавляющем большинстве рек наблюдалось превышение норматива ОКБ для водоемов, используемых для рекреации. Весной исключением были реки Бурная, Вуокса, Морье, Сясь, Назия, а в летний период – Тулокса, Авлога и Назия. При оценке фекального загрязнения воды важно не только количество общих колиформных бактерий, но и численность отдельных групп этих бактерий. Как упоминалось выше, в эту группу входят термотолерантные колиформные бактерии.

Таблица 9.4.2

Численность общих колиформных (ОКБ, КОЕ/100 мл) и сапрофитных бактерий (ОМЧ, КОЕ/мл) в воде притоков Ладожского оз. в 2013–2014 гг.

Водоем	2013 г.				2014 г.			
	Лето		Осень		Весна		Лето	
	ОКБ	ОМЧ	ОКБ	ОМЧ	ОКБ	ОМЧ	ОКБ	ОМЧ
Сарья	100	49	–	–	–	–	900	–
Тулема	нет роста	97	–	–	7900	180	1 727	1 880
Лава	нет роста	143	нет роста	100	6 800	320	900	660
Вуокса, г. Приозерск	181	118	нет роста	139	300	64	1 700	1 984
Вуокса, п. Лосево	–	–	нет роста	444	нет роста	16	1 000	–
Волхов (устье)	2 363	185	90	137	4 273	196	5 273	сплошной рост
Свирь (п. Свирица)	200	134	100	63	1 500	128	сплошной рост	3 536
Морье	200	82	нет роста	49	нет роста	52	1 200	1 304
Тулокса	3 200	680	–	–	1 273	39	нет роста	1 688
Видлица	нет роста	1 220	–	–	18 600	640	10 000	сплошной рост
Сясь	181	604	нет роста	78	91	100	1 400	1 184
Паша	100	48	нет роста	14	3 000	160	1 400	1 816
Бурная	нет роста	214	нет роста	384	–	–	–	1 200
Олонка	400	101	нет роста	71	15 300	520	5 800	1 592
Кокколан	400	744	–	–	–	–	–	–
Тохма	нет роста	191	–	–	–	–	–	–
Авлога	нет роста	38	310	1 456	2 100	956	455	1 264
Назия	400	376	нет роста	124	300	80	нет роста	688
Уксун	нет роста	60	–	–	–	–	7 000	–
Оять	200	37	18	36	1 164	99	2 400	912
Янис	290	182	нет роста	12	сплошной рост	992	1 545	280

В летний период 2013 г. в устье р. Волхов и в р. Сясь колонии ТКБ составляли подавляющее большинство от выросших колоний ОКБ, а в р. Нази – 40%. В этих водотоках, по-видимому, присутствовало свежее фекальное загрязнение, несмотря на то, что только в устье р. Волхов отмечалась очень высокая численность общих колиформных бактерий. Осенью 2013 г. во всех исследованных притоках, за исключением р. Авлога, роста ТКБ не отмечалось. В Авлоге количество ТКБ составляло почти 90% от численности ОКБ, что свидетельствовало о свежем фекальном загрязнении. Весной 2014 г. высокой численностью ТКБ (25–67% от численности ОКБ) вновь отличалась р. Авлога, а также Свирь у п. Свирица. В летний период повышенные численности ТКБ и высокий процент ТКБ от ОКБ (26–50%) наблюдались во многих притоках Ладожского оз.: в Тулеме, Олонке, Свири вблизи г. Лодейное поле, Паше, устье Волхова. В Свири у п. Свирица летом отмечался сплошной рост колиформных бактерий на фильтрах, что не позволило точно определить точное количество ТКБ, но свидетельствовало об очень высокой их численности так же, как весной.

В большинстве исследованных водотоках величины ОМЧ в 2013 г. были невелики (табл. 9.5.2), особенно осенью при низких температурах воды, и не превышали аналогичных величин, характерных для открытых незагрязненных районов Ладожского оз. – не более 200–300 КОЕ/мл [Капустина, 1992]. Для оценки качества природных вод применялась классификация, основанная, в частности, на численности сапрофитных бактерий в воде [ГОСТ 17.1.3.07–82, 1982; Руководство по методам..., 1982]. Согласно вышеуказанной классификации, в 2013–2014 гг. подавляющее большинство исследованных рек являлись «чистыми» и «очень чистыми». Среди притоков Ладожского оз. в 2013 г. наилучшим качеством воды по величинам ОМЧ (на уровне питьевой воды) обладали Сарья, Паша, Авлога (только летом), Оять, Янис (осенью). Относительно повышенными значениями ОМЧ в летний период 2013 г. выделялись следующие реки: Тулокса, Видлица, Сясь. Из них только в Тулоксе значительное количество сапрофитов совпадала с очень высокой численностью ОКБ, что свидетельствовало о загрязнении реки. В воде р. Сясь численность сапрофитных бактерий была относительно повышена, скорее всего, из-за попадания в реку стоков Сяьского целлюлозно-бумажного комбината. Весной 2014 г. величины ОМЧ в притоках озера примерно соответствовали таковым в 2013 г. Наилучшим качеством воды по этому показателю в это время обладали рр. Морье, Бурная, Вуокса и Назия. В летний период 2014 г. численность сапрофитных бактерий в притоках повысилась, тем не менее качество водных масс почти всех притоков Ладожского оз. не выходило за пределы категории «чистые воды». Высокие величины ОМЧ в Видлице и Волхове совпадали с высокой концентрацией в них ОКБ, что, по-видимому, означало наличие хозяйственно-бытового загрязнения, тем более что летом 2013 г. в Видлице также отмечалась относительно повышенная величина ОМЧ.

По результатам сезонных исследований, к наиболее чистым по обоим санитарно-микробиологическим показателям (ОМЧ и ОКБ) притокам Ладожского оз. относились рр. Морье, Бурная, Вуокса, Оять, Паша, Лава и особенно Назия, где фекальное загрязнение практически отсутствовало на протяже-

нии 2013–2014 гг. Водные массы р. Свири относились к категории «очень чистые» по численности сапрофитов, хотя в некоторых точках отбора проб и особенно в устье отмечались значения численности ОКБ, превышающие установленный норматив [СанПиН 2.1.5.980–00, 2001]. На основании полученных данных были выявлены притоки, подвергающиеся антропогенному воздействию, водные массы которых были загрязненными. Это рр. Янис, Тулема, Видлица, Тулокса, Оять, Авлога (только весной), Свирь, особенно в районе п. Свирица, и Волхов. По-видимому, на водосборе рек Янис, Тулема, Видлица, Тулокса, Оять, Авлога нет постоянных источников загрязнения, а сезонное повышение численности общих колиформных бактерий связано с терригенным стоком во время весеннего половодья, а также с сельскохозяйственной деятельностью и повышенной рекреационной нагрузкой в летний период. На Волхове и Свири расположены довольно крупные населенные пункты, постоянно загрязняющие водные массы этих рек.

Бактериопланктон Ладожского оз. В работе [Капустина, 2013] изложены основные закономерности пространственно-временного распределения бактериопланктона Ладожского оз., а также проведена оценка количественного развития и активности бактериального сообщества за более чем 30-летний период, начиная с конца 70-х годов прошлого столетия. В настоящей монографии представлена оценка количественного развития бактериопланктона и определен трофический статус Ладожского оз. по общей численности микроорганизмов в настоящее время. Одной из задач исследования было выявление тенденции динамики численности бактериопланктона Ладоги в летние периоды 2009–2019 гг. (в 2014 г. исследования не проводились). Пробы воды отбирались на различных горизонтах, в зависимости от глубин станций. Определялась общая численность бактериопланктона (ОЧБ) [Hobbie et al., 1977], численность сапрофитных микроорганизмов на питательной среде ГРМ-агар [Кузнецов, Дубинина, 1989] в 2009, 2017–2018 гг. и соотношение различных морфотипов бактериальных клеток в 2017–2019 гг.

Были установлены пределы колебаний численности бактерий, характерные для водоемов с различным уровнем трофии [Сорокин, 1973; Копылов, 2007]. Эти данные хорошо согласуются с величинами численности микроорганизмов, рассчитанными по уравниванию зависимости между концентрациями бактериопланктона и хлорофилла-а [Boulion, 2003], так как определение трофического уровня водоемов производится в первую очередь по количеству фосфора и уровню развития фитопланктона и может не всегда совпадать с таковым по микробиологическим параметрам. По данным ИНОЗ, наиболее интенсивный уровень развития бактериопланктона в Ладожском оз. по всем показателям за весь период исследований (42 года) наблюдался в летний период. Поэтому наиболее репрезентативными для выявления тенденций развития бактериального сообщества считаются данные, полученные в летний период при максимальных температурах воды и наличии устойчивой температурной стратификации.

В последние 10 лет отмечалась достаточно интенсивная межгодовая динамика средневзвешенных летних величин общей численности бактериопланктона, максимальный разброс данных величин за период 2009–2019 гг. в эпи- и гипolimнионе составлял 2,2 и 2,7 раза соответственно (рис. 9.4.1).

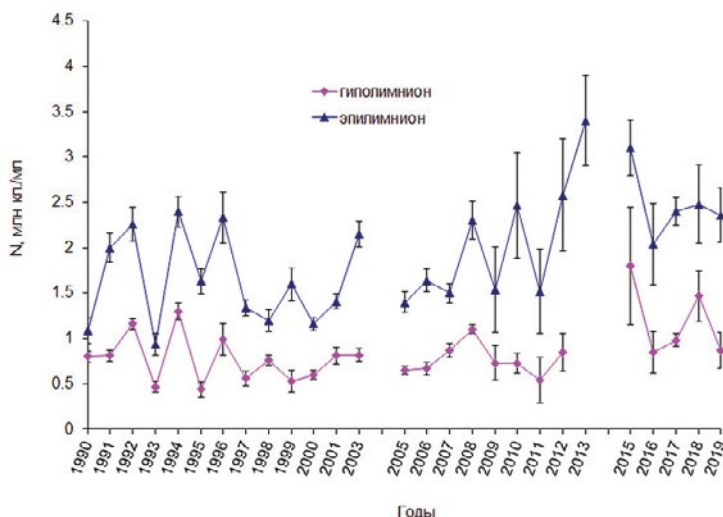


Рис. 9.4.1 – Динамика общей численности бактериопланктона (N, среднелетние величины) в эпи- и гипоплимнионе Ладожского оз. в летний период

Для оценки наличия или отсутствия различий между отдельными годами (2009–2019 гг.) по величинам общей численности бактерий использовался Н-критерий Краскела – Уоллиса. Выяснилось, что между годами существуют различия ($n=416$, различия статистически достоверны при $p < 0,05$). Однако данный критерий не дает возможности определить, в чем именно различия, т.е. какие именно группы (годы) отличаются друг от друга. Для решения данной проблемы был применен критерий достоверно значимой разности Тьюки, который выявил разницу между 2009, 2011, 2013 и 2015 гг. и остальными годами. В 2009 и 2011 гг. наблюдались минимальные за период исследований среднелетние величины общей численности бактериопланктона, как в эпи-, так и в гипоплимнионе, а в 2013 г., напротив, были найдены максимальные среднелетние концентрации бактерий, но только в эпилимнионе. В 2015 г. высокая ОЧБ наблюдалась как в эпи-, так и в гипоплимнионе. По-видимому, отчасти эти различия были вызваны природными факторами, например, температурными условиями, интенсивностью развития фитопланктона, концентрацией органического углерода, уровнем воды в озере и др. Однако возможно также влияние других факторов. Так, в 2011 г. пробы отбирались в начале гидрологического лета (начало июня) когда в озере еще существовал термобар. Местонахождение только некоторых станций из исследованных в 2013 г. приблизительно совпадало с местоположением мониторинговых станций, исследуемых каждый год. Кроме того, для подсчета общего количества бактерий в пробах, начиная с 2013 г., использовался более современный люминесцентный микроскоп, разрешающая способность которого выше, чем у использовавшегося ранее. Возможно, поэтому в 2013 г. наблюдалось резкое повышение общей численности бактериопланктона по сравнению с предыдущими годами. В 2016 г. наблюдалось снижение среднелетних величин ОЧБ в эпи- и гипоплимнионе по сравнению с 2015 г.

Пробы в 2016 г. отбирались в июне, тогда как в 2015 г. в разгар лета – в августе, вследствие чего годы статистически отличаются друг от друга. На основании полученных результатов понятно, что срок отбора проб является очень важным фактором, влияющим на интерпретацию данных натурных наблюдений. Производить отбор проб необходимо во время одних и тех же гидрологических сезонов. Выявление общей тенденции динамики общей численности бактериопланктона было проведено путем сглаживания ряда данных с помощью 3-летнего скользящего среднего. Полученная кривая продемонстрировала стабильность среднелетних величин общей численности бактериопланктона, рассчитанных для всего озера, подтвердив тенденцию их некоторого снижения (рис. 9.4.2).

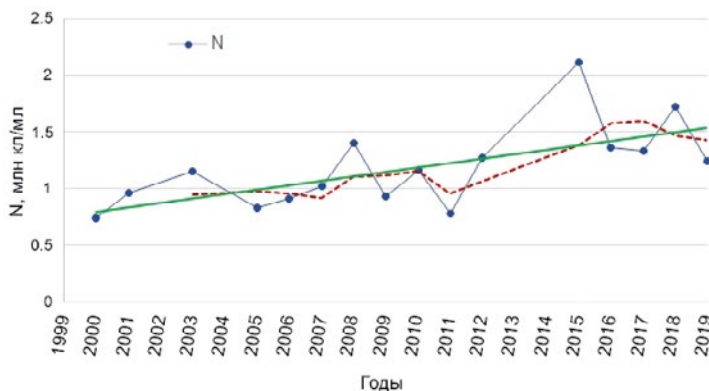


Рис. 9.4.2 – Динамика общей численности бактериопланктона (N, средневзвешенные величины) в Ладожском оз. в летний период. Бордовая пунктирная линия – скользящая средняя с интервалом 3 года. Зеленая линия – линия тренда

Температура воды обычно прямо влияет на интенсивность развития бактериопланктона. Наиболее высокие медианные величины концентрации микроорганизмов в эпилимнионе в исследуемый период соответствовали максимальным значениям температуры воды (2010, 2013, 2015 и 2018 гг.) (рис. 9.4.1, табл. 9.4.3). Кривая межгодовой динамики концентрации микроорганизмов в гиполимнионе повторяла таковую в эпилимнионе, однако соответствия медианных значений температур воды и численности бактерий по годам здесь не наблюдалось (табл. 9.4.3). По всей вероятности, основным лимитирующим фактором для микроорганизмов гиполимниона, адаптированным к низким температурам воды, является концентрация лабильного органического вещества.

Лабильный органический углерод представляет собой легкодоступную для водных микроорганизмов фракцию общего органического углерода, которая в первую очередь быстро может быть утилизирована ими в процессе биохимического окисления. Обычно доля лабильного углерода от общего углерода выше в поверхностных слоях воды и в относительно мелководных зонах озера. За последнее десятилетие концентрация лабильного органического вещества в озере постоянно колеблется, как в эпи-, так и в гиполим-

нионе, что, возможно, является одной из причин существенных колебаний летних величин ОЧБ. Начиная с 2013 г. пределы колебаний уменьшаются по сравнению с периодом 2008–2012 гг. (0,46–0,60 мг·С/л и 0,70–1,00 мг·С/л соответственно). А в 2016–2019 гг. пределы колебаний становятся еще меньше – 0,46–0,55 мг·С/л (Гл. 8, настоящая монография), в эти же годы происходит относительная стабилизация концентрации микроорганизмов после существенных подъемов в 2010, 2012–2013 и 2015 гг. (рис. 9.4.1).

Таблица 9.4.3

Медианные значения температур воды (°С) и общей численности бактериопланктона (млн·кл./мл) в эпи- и гипolimниионе в летний период за 2009–2019 гг.

Год	Медианы температур воды		Медианы общей численности бактериопланктона	
	эпилимнион	гиполимнион	эпилимнион	гиполимнион
2009	15,7±2,24	4,91±5,04	1,30±0,52	0,70±0,21
2010	20,6* ± 6,00	4,48±7,76	2,10 ±0,75	0,82±0,21
2011	9,03±5,28	3,79±4,93	1,03±0,67	0,65±0,15
2012	17,0±3,57	4,77±5,50	1,58±1,02	0,82±0,25
2013	19,9 ±1,57		3,75 ±1,24	
2015	17,5 ±1,38	4,50±3,83	3,00 ±0,81	1,30±0,47
2016	14,2±5,34	4,47±6,05	2,01±0,88	0,85±0,33
2017	17,0±0,52	4,29±3,10	2,40±0,62	1,15±0,44
2018	19,0 ±4,45	4,60±6,93	2,70 ±1,10	1,46±0,44
2019	16,0±1,07	4,60±2,41	2,44±0,59	0,93±0,28

*– жирным шрифтом выделены максимальные величины температуры воды и ОЧБ, соответствующие друг другу.

Корреляционный анализ (коэффициент Спирмена) всех летних данных, как за каждый отдельный год, так и за весь исследованный период, показал линейную положительную связь между ОЧБ и температурой воды от поверхности до дна (эпи- и гиполимнион). Коэффициенты корреляции в 2009, 2010, 2011, 2012, 2015, 2016, 2017, 2018 и 2019 гг. были равны 0,69, 0,81, 0,60, 0,77, 0,77, 0,84, 0,78, 0,63 и 0,75 соответственно, значимы при $p < 0,05$. Значение коэффициента Спирмена для всего массива данных составляет 0,76, $n=407$, значим при $p < 0,05$. Поскольку корреляция между температурой воды и концентрацией микроорганизмов выявлялась во всем столбе воды, а в 2013 г. пробы из гиполимниона не отбирались, данный год в ряду отсутствует. Нужно отметить, что для большинства лет не выявилось значимой корреляции общей численности бактериопланктона с температурой воды в эпилимнионе (10–15 м), видимо, из-за небольшого градиента температур вследствие прогрева поверхностных слоев воды по всей акватории озера. Тем не менее в отдельные годы (2010, 2011, 2012 и 2016 гг.) в эпилимнионе озера такая корреляция (положительная) обнаруживалась ($r=0,46$, 0,62, 0,63, 0,78 соответственно, значимы при $p < 0,05$). В вышеуказанные годы на акватории озера отмечались наибольшие градиенты температур по срав-

нению с годами, в которые корреляция не была выявлена. В 2011 и 2016 гг. пробы отбирались в июне, когда эпилимнион еще не был прогрет настолько, насколько это обычно происходит в разгар лета, а в 2011 г. во время отбора проб в озере еще существовал термобар. В 2010 и 2012 гг. пробы отбирались в августе, однако в 2010 г. при самой большой за десятилетний период медиане температуры воды (20,6 °C) (табл. 9.4.3) разброс температур в эпилимнионе был очень велик. В 2012 г. ни медианное значение, ни градиент температур в эпилимнионе не выделялись среди остальных лет.

Абсолютные величины общей численности бактериопланктона за исследованный период варьировали в интервале 0,45–6,40 млн кл./мл в гипolimнионе глубоководной части озера (придонный слой, глубина > 200 м) и в мелководном южном районе (Волховская губа) соответственно. Минимальное значение в гипolimнионе (0,45 млн кл./мл) отмечалось в 2019 г. в глубоководном районе, а максимальное (1,52 млн кл./мл) – в 2018 г. в придонном горизонте воды глубоководной зоны. Минимальное и максимальное значения ОЧБ в эпилимнионе были найдены в 2011 г. (0,62 млн кл./мл, глубина > 100 м) и в 2013 г. (6,40 млн кл./мл, глубина 10 м) соответственно. Судя по величинам общей численности бактериопланктона, Ладога не выходила за границу мезотрофного состояния. Ее трофический статус изменялся от олиго-мезотрофного в гипolimнионе глубоководных районов до типично мезотрофного в мелководном южном прибрежном районе [Соколин, 1973; Драбова, 1981; Копылов, 2007].

Характер пространственно-временного распределения микробиологических параметров характеризовался определенной стабильностью и определялся в основном особенностями гидрофизического режима и развития фитопланктона озера. Во все годы в летний период максимальные величины микробиологических параметров отмечались в мелководном прибрежном районе (особенно в зонах влияния крупных притоков), где обычно отмечаются наиболее высокие температуры воды, минимальные – чаще всего в наиболее глубоководной части озера (табл. 9.4.4). Однако в некоторые годы при высоких температурах воды и интенсивном развитии фитопланктона пространственное распределение микроорганизмов по акватории могло быть более равномерным (2015 и 2018 гг.) и максимальная ОЧБ наблюдалась в ультрапрофундальной зоне, как, например, в 2013 г. (табл. 9.4.4). Все вышеупомянутые годы отличались относительно высокими температурами воды по сравнению с другими (табл. 9.4.3).

Пространственное распределение сапрофитных бактерий, адаптированных к относительно высоким концентрациям органического вещества, не всегда полностью совпадало с таковым для общей численности бактериопланктона. Концентрация бактерий данной физиологической группы существенно зависит от концентрации лабильного органического углерода и обычно значительно снижается с глубиной, так как фитопланктон (источник легко окисляемого органического вещества) в Ладожском оз. сосредоточен в верхнем 10-метровом слое из-за небольшой прозрачности воды. Рассматривая распределение средних величин ОМЧ в различных районах в летний период, в большинстве случаев можно отметить максимальные значения в профундальной и ультрапрофундальной зонах (табл. 9.4.5).

По-видимому, это связано с интенсивным развитием альгоценозов во время летнего пика фитопланктона именно в области больших глубин из-за относительно более высокой прозрачности воды в этих районах по сравнению с мелководной частью Ладоги.

Таблица 9.4.4

Средневзвешенные величины общей численности бактерий (млн·кл./мл) в различных районах Ладожского оз. в летний период 2009–2013, 2015–2019 гг.

Год	Район			
	Прибрежный	Деклинальный	Профундальный	Ультра-профундальный
2009 (август)	1,45±0,49	1,22±0,47	1,13±0,73	0,94±0,40
2010 (август)	2,48±0,86	1,24±0,36	1,37±0,77	1,46±0,88
2011 (июнь)	2,05±0,50	1,03±0,33	0,87±0,14	0,64±0,08
2012 (август)	2,15±0,91	1,23±0,53	—	1,41±1,35
2013 (август, эпилимнион)	3,60±1,20	3,00±0,80	3,10±1,00	4,10±0,81
2015 (август)	3,00±0,83	2,30±0,82	2,00±0,44	2,03±1,31
2016 (июнь)	2,57±0,62	2,20±0,43	1,70±0,54	1,60±0,95
2017 (август)	2,67±0,88	2,02±0,60	1,90±0,87	1,55±0,89
2018 (июль)	3,18±1,36	2,21±0,70	2,27±1,29	1,77±0,64
2019 (август)	2,25±0,66	1,81±0,81	1,98±1,02	1,29±0,79

Таблица 9.4.5

Средние величины численности бактерий, растущих на РПА (средневзвешенное в столбе воды, тыс. кл./мл) в различных районах Ладожского оз. в летний период

Район	2009 г.	2010 г.	2017 г.*	2018 г.
	конец августа	начало августа	конец июля – начало августа	июль
Прибрежный	0,11±0,04	0,25±0,12	2,74±2,57	0,38±0,22
Деклинальный	0,06±0,02	0,19±0,07	2,29±1,38	0,79±0,47
Профундальный	0,06±0,03	0,21±0,09	2,15±1,50	0,66±0,60
Ультрапрофунд.	0,13±0,06	0,27±0,11	1,26±1,15	0,78±0,32

* – в 2017 г. определялась численность бактерий, растущих на ГРМ-агаре, разбавленном в 10 раз.

Бактериопланктон играет основную роль в минерализации органического вещества, а также является важным связующим звеном между детритом, растворенным органическим веществом и более высокими трофическими уровнями в экосистеме водоемов [Кузнецов, 1970; Pomeroy, 1974; Cole et al., 1988; Currie, 1990]. Поэтому величины микробиологических параметров обязательно должны приниматься во внимание при оценке качества воды. Чаще всего для определения качества воды используется процентное соотношение количества сапрофитных бактерий и общего количества бактерий. В зависимости от величины этого показателя воды относят к одной из ус-

ловных групп: «особо чистые», «чистые», «грязные», «особо грязные» [Романенко, 1979]. Были рассчитаны процентные соотношения численности сапрофитных бактерий и общей численности бактериопланктона в отдельных районах Ладожского оз. за разные периоды. Судя по величинам этих соотношений, во все исследованные периоды водные массы всех районов озера летом относились к условным категориям «чистые» и «особо чистые». В 1990–2000 гг. и 2001–2010 гг. воды зон с небольшими и средними глубинами квалифицировались как «чистые», а наиболее глубоководных зон – как «особо чистые». В 2017–2018 гг. водные массы всей акватории относились к условной категории «особо чистые» (табл. 9.4.6).

Таблица 9.4.6

Процентное соотношение численности сапрофитов и общей численности бактериопланктона в различных районах Ладожского оз. в летний период

Район	1990–2000 гг.	2001–2010 гг.	2017–2018 гг.
Прибрежный	0,005±0,002	0,004±0,002	0,0006±0,002
Деклинальный	0,004±0,001	0,005±0,004	0,0008±0,003
Профундальный	0,004±0,001	0,003±0,002	0,0008±0,002
Ультрапрофунд.	0,003±0,001	0,003±0,002	0,0006±0,001

Микрофлора воды была представлена в основном палочковидными и кокковидными формами бактерий. Крайне редко встречались азотобактероподобные клетки, нитевидные формы, вибрионы и спириллы, как правило, в юго-восточном побережье в зонах влияния вод основных притоков озера – рек Волхова и Свири. Соотношение различных морфотипов микроорганизмов может служить косвенным показателем антропогенного воздействия на водоем. Преобладание палочковидных форм свидетельствует о более высокой концентрации и низкой степени минерализации органического вещества в воде [Кожова, 1989; Киреева, 2007]. При загрязнении водоема органическим веществом доля палочковидных форм часто возрастает (до 80%), в значительном количестве появляются вибрионы (10% и более), численность кокков снижается до 10% и менее [Кондакова, 2007].

Практически на всех станциях в 2017–2019 гг. преобладали кокковидные формы микроорганизмов, что вполне объяснимо, так как содержание органического вещества в Ладожском оз. относительно невелико, а легкоокисляемое органическое вещество фитопланктона очень быстро минерализуется. Процентное содержание палочек по всей акватории за годы исследований колебалось от 26,4% на выходе из Волховской губы в 2018 г. до 52,5% в деклинальной зоне недалеко от западного берега озера в 2017 г., процентное содержание кокковидных форм варьировало в пределах 47,5 (2017 г., деклинальная зона) – 71,0% (2019 г., Свирская губа). В 2017–2018 гг. относительно низкий процент палочковидных форм бактерий отмечался на станциях Волховской губы. Возможно, в момент отбора проб в эти годы летний пик фитопланктона в южном побережье уже прошел. В 2019 г. процент палочковидных бактериальных клеток в Волховской губе был не ниже, чем на большинстве других станций. Различные соотношения морфотипов

бактериальных клеток, по-видимому, определяются вариабельностью состояния сообщества фитопланктона, как основного источника лабильного органического углерода для бактерий в крупных, глубоких водоемах. Средний процент палочек в различных районах озера за три года варьировал в довольно узких пределах (32,8–44,4%). Среднее содержание палочковидных форм бактерий в разные годы колебалось незначительно и составляло в 2017, 2018 и 2019 гг. $42,4 \pm 5,10$, $35,6 \pm 4,50$ и $38,9 \pm 4,60\%$ соответственно. Несколько иные значения среднелетних соотношений различных бактериальных морфотипов были обнаружены в Ладожском оз. летом в предыдущие 10 лет – палочковидные формы составляли 52,0–57,6%, кокковидные – 42,1–47,8% [Капустина, 2013]. Как уже упоминалось в главе 8 настоящей монографии, в 2012–2019 гг. средняя за период открытой воды концентрация лабильного углерода в озере снижается по сравнению с предыдущим периодом 2000–2010 гг. Возможно, в связи с этим в последнее десятилетие процент палочковидных форм в Ладожском оз. снизился. Пространственное распределение различных морфотипов микроорганизмов часто аналогично таковому сапрофитных бактерий, численность которых прямо зависит от концентрации легкоокисляемого органического вещества в воде.

В 2009–2019 гг. в Ладожском оз. наблюдалась достаточно интенсивная межгодовая динамика средневзвешенных летних величин общей численности бактериопланктона в эпилимнионе со значительными подъемами в 2010, 2012 и 2013 гг., в гиполимнионе этот процесс был менее выражен. В последние годы (2016–2019 гг.) произошла стабилизация концентрации бактериопланктона на более высоком по сравнению с предыдущим десятилетием уровне. Возможно, это обусловлено не только природными факторами, но и использованием более точного метода подсчета бактерий в пробах воды. Была выявлена линейная положительная связь между температурой воды и общей численностью бактерий, как для каждого отдельного года, так и для всего исследуемого периода. Температура воды является фактором, существенно влияющим на уровень количественного развития и пространственное распределение бактериопланктона в Ладожском оз. Обычно максимальные концентрации микроорганизмов, равно как максимальные температуры воды, отмечались в мелководном прибрежном районе, а минимальные – в глубоководной части озера. Однако иногда, при высоких температурах воды и интенсивном развитии фитопланктона в пелагиали, пространственное распределение микроорганизмов по акватории было более равномерным (2015 и 2018 гг.), а в 2013 г. максимальная величина ОЧБ наблюдалась в наиболее глубоководной зоне. Трофический статус озера по общей численности бактериопланктона не изменился по сравнению с первым десятилетием XXI века и варьировал в 2009–2019 гг., судя по летним данным, от олиго-мезотрофного в гиполимнионе глубоководных районов до типично мезотрофного в мелководном южном прибрежном районе. В 1990–2010 гг. водные массы различных зон озера по величинам соотношений численности сапрофитных бактерий и общей численности микроорганизмов соответствовали категориям «чистые» и «особо чистые». В 2017–2019 гг. воды всех озерных районов соответствовали категории «особо чистые», что свидетельствовало о стабильно высоком качестве вод Ладожского оз. В 2017–2019 гг.

в воде озера кокковидные формы бактериальных клеток преобладали над палочковидными – 57,6–64,4% и 35,6–57,6% соответственно, что косвенно также подтверждает чистоту озерных водных масс.

9.5 Водные грибы

Все водные грибы являются гетеротрофными организмами. Они участвуют в минерализации органических субстратов и способны разлагать наиболее консервативные компоненты растворенного органического вещества, а уровень заспоренности воды их спорами (грибные споры гиф и споры различных типов) является показателем трофии водоема. В условиях антропогенного воздействия на водоем они могут быть использованы в качестве индикаторов степени загрязнения водоема. Грибы являются необычайно пластичной и экологически подвижной группой живых организмов с высокими адаптационными способностями, занимая самые разнообразные экологические ниши и играя значительную роль в биоценозах [Дудка, 1974]. Развитие водной микофлоры в Ладожском оз. связано с возникновением дефицита биологически доступного (минерального) фосфора [Петрова и др., 2010].

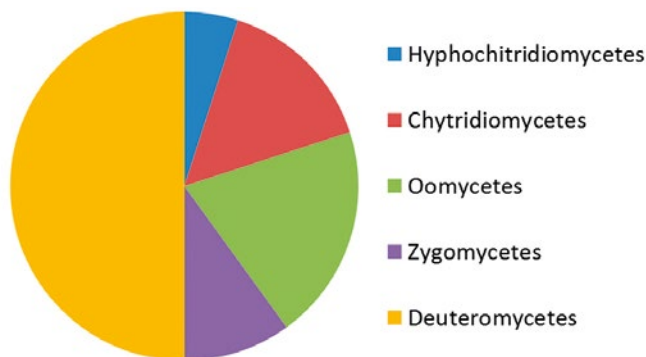


Рис. 9.5.1 – Встречаемость таксономических групп водных грибов в Ладожском оз. (%) в 2013–2019 гг.

Пробы воды отбирались с поверхности и у дна. Определялась общая численность микопланктона и видовой состав. Для выделения водных грибов был использован метод глубинного посева воды. Объем пробы в опытах был 5 мл, использовалась агаризованная питательная среда – сусло-агар. С целью задержки роста бактерий к среде добавляли смесь антибиотиков [Литвинов, 1977]. Опыты проводились в чашках Петри. Засеянные чашки Петри инкубировались в течение недели при температуре 18–24 °С, выросшие колонии подсчитывали, а представителей отличающихся колоний отсевали в пробирки со скошенным агаром того же состава [Гарибова, 2005]. Видовое определение культур осуществлялось согласно требованиям определителей [Lodder, 1970] и [Пидопличко, Милько, 1975, Пидопличко, 1977].

Качественный анализ показал, что все выделенные виды в период 2013–2019 гг. являются постоянными обитателями водных экосистем. Состав водных грибов был представлен: Hyphochytridiomycetes, Chytridiomycetes,

Oomycetes, Zygomycetes, Deuteromycetes (рис. 9.5.1). Из Oomycetes наиболее распространенными были *Saprolegnia ferax* (Gruith) и *Leptomytus lacteus* (Ag). Из Zygomycetes отмечается высокая встречаемость грибов *Mucor circinelloides* (Tieghem) и *Rhizopus nigrican* (Ehrenberg). Deuteromycetes представлен родами *Penicillium*, *Trichoderma*, *Candida* и *Rhodotorula*. Широко распространенные в воде дрожжевые организмы были разделены по окраске штриха на окрашенные и бесцветные. Бесцветные формы отнесены по основным признакам к двум видам – *Candida krusei* (Berhout) и *Torulopsis candida* (Saito) Lodder. Все цветные формы принадлежат виду *Rhodotorula rubra* (Schimon) F. C. Harrison, Nouveau Traité Méd. В 2017 году, в первые за последнее десятилетие, были выделены представители рода *Cladosporium*. Начиная с 2013 г. отмечалось изменение качественного состава микопланктона в сторону увеличения численности дрожжевых грибов, которые образовывали доминирующий комплекс. И только в 2017 г. в доминирующий комплекс вошли несовершенные грибы родов *Cladosporium* и *Penicillium*. Доминирующую роль среди дрожжевых грибов сохранил вид *Candida krusei* (Berhout). Эта же тенденция сохранилась в 2019 г.

Все выделенные виды по такому показателю, как частота встречаемости, можно условно разделить на 3 группы: постоянные, периодические и редкие виды [Семенова, 1994]. Группа постоянных обитателей представлена видами, чье развитие было стабильным на протяжении многолетних наблюдений, колебалась лишь численностью того или иного вида (родов *Mucor*, *Trichoderma*, *Penicillium*). Вторая – встречающиеся периодически по всей акватории или в отдельных районах озера. К этой группе относятся представители родов *Achlya*, *Chytridium*, *Aspergillus*. Третья группа, виды, встречающиеся эпизодически и имеющие очень низкую численность. Это представители родов *Fusidium*, *Rhizophidium*, *Woronina* и др. Можно отметить, что первые две группы составляют устойчивый комплекс мицелиальных грибов, участвующий в деструкционных процессах.

В период исследования 2013–2019 гг. максимальная численность водных грибов регистрировалась в 2013 г. и составляла 7000 п./литр, что, вероятно, было вызвано осенней вспышкой диатомовых водорослей и последствием этапа интенсивной перестройки озерной биоты. Исследования 2015 г. показали самые низкие значения микопланктона с 2009 г., при этом произошла видовая перестройка доминирующего комплекса, возможно, вызванная ростом объема новообразованного органического вещества [Петрова и др., 2010] (рис. 9.5.2).

Анализ сезонного распределения микопланктона показал, что количественный и качественный состав наиболее беден весной по всей акватории озера за исключением ст. 105, где в 2013 г. зарегистрирована максимальная численность водных грибов за все годы исследования в поверхностном слое (рис. 9.5.3). В летний сезон видовой состав разнообразен, и максимальная численность зарегистрирована в 2018 г. в ультрапрофундальной зоне Ладожского оз. на ст. 86 (5800 п/л) в поверхностном горизонте (рис. 9.5.4). Осенние наблюдения показали, что наибольшие значения фиксировались в 2017 г. в прибрежной зоне на ст. 1 и G (4000 п/л) и в ультрапрофундальной зоне на ст. П1 и 204 (4000 п/л) на поверхности (рис. 9.5.5).

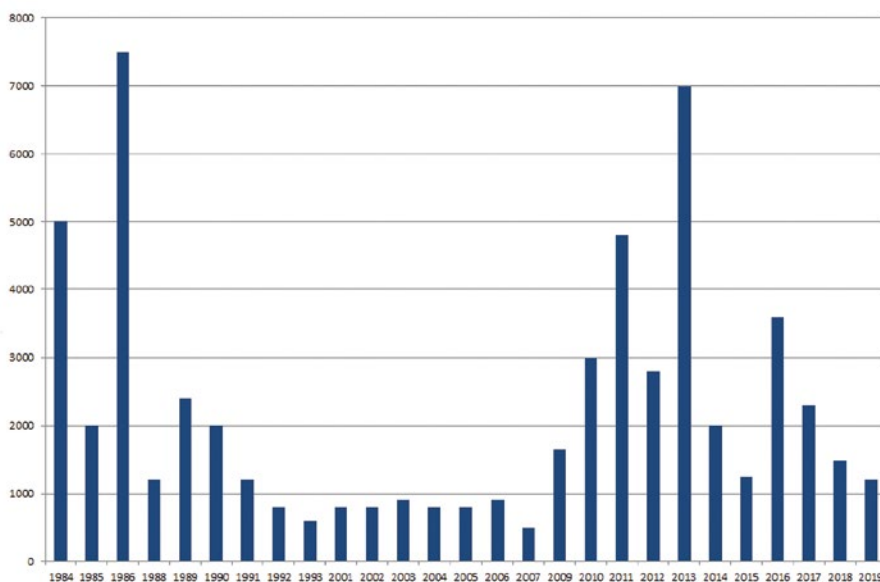


Рис. 9.5.2 – Численность водных грибов по акватории Ладожского оз. (п/л)

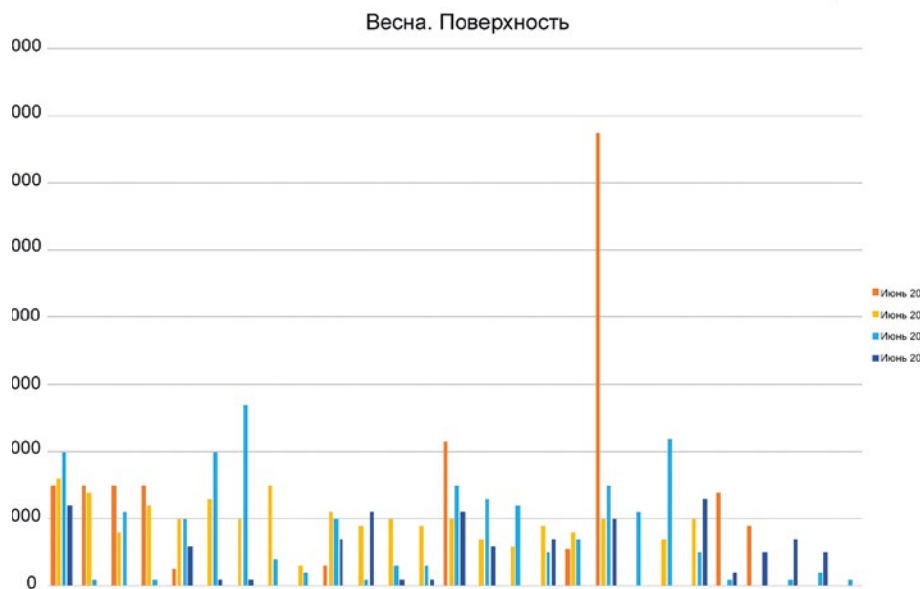


Рис. 9.5.3 – Сравнительная численность микофлоры 2013–2018 гг. на поверхности (весна)

Вертикальное распределение водной микофлоры в водной толще демонстрирует, что большинство видов не имеют четкой приуроченности к какому-либо горизонту и сезону. Несмотря на то что в 2013 г. регистрировались максимальные значения в поверхностном горизонте, придонные значения не превышали средних. Наибольшая численность отмечались на ст. 1

(2800 п/л) в прибрежной зоне. В 2018 г. высокая численность наблюдались в придонном горизонте в ультрапрофундальной зоне на ст. 204 (5000 п/л). Максимальные значения в летний сезон отмечались в основном в прибрежном районе. В 2015 г. на ст. 1 (2000 п/л), в 2016 г. наст. G (2000 п/л), в 2017 г. на ст. 1 (4000 п/л) и только в 2018 г. в ультрапрофундальной зоне на ст. П₁ и соответствовали 7000 п/л в придонном горизонте.

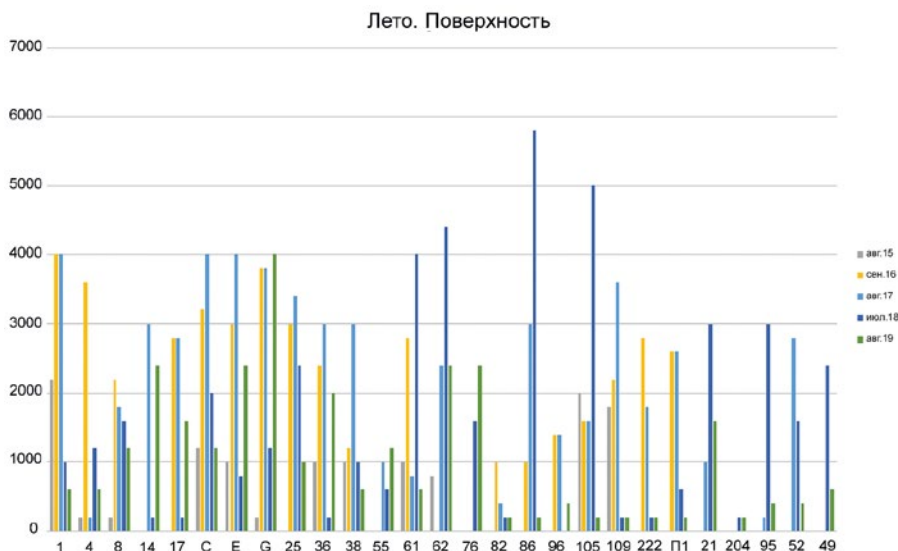


Рис. 9.5.4 – Сравнительная численность микофлоры 2015–2019 гг. на поверхности (лето)



Рис. 9.5.5 – Сравнительная численность микофлоры 2016–2019 гг. на поверхности (осень)

Период осенних наблюдений во все годы исследований характерен общим снижением количественного состава по сравнению с летним. Максимальные значения не превышали 3 600 п/л, которые были зарегистрированы в 2017 г. в прибрежном (ст. 1 и 8) и ультрапрофундальном (ст. П₁) районах озера у дна. На протяжении всех лет исследований в прибрежном районе озера отмечался высокий количественный и качественный состав, что связано с паводками, поступлением хозяйственно-бытовых стоков и вод притоков. В этом районе были выделены виды, развитие которых зависит от повышенного содержания органического вещества в воде и антропогенного загрязнения – *Cladosporium sp.*, *Saprolegnia ferax* (Gruith), *Leptomyces lacteus* (Ag.). Причем на грибах рода *Saprolegnia* был обнаружен паразитирующий *Woronina polycystis* Cornu. В Волховской и Петрокрепостной губах выделялись дрожжевые грибы *Rhodotorula rubra* (Schimon) F.C. Harrison, Nouveau Traité Méd. и *Torulopsis candida* (Saito) Lodder, что указывает на локальное техногенное воздействие [Терехова, 2007]. В профундальном районе отмечались единичные экземпляры *Rhizophidium planctonicum* Canter, паразитирующие на водорослях *A. Formosa*, *Olpidiopsis sp.* на водорослях рода *Zygnema*.

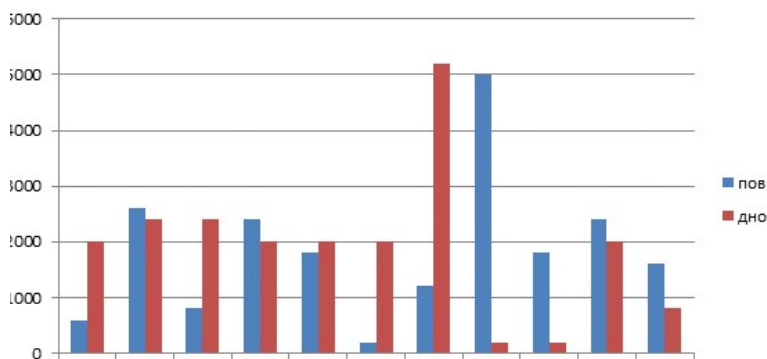


Рис. 9.5.6 – Численность микрофлоры (п/л) шхерной части Ладожского оз. в 2018 г. (поверхностный и придонный горизонты)

Летом 2018 г. были проведены исследования шхерной части Ладожского оз. Как видно из рисунка 9.5.6, все исследованные районы испытывают на себе антропогенное воздействие. Наибольшая интенсивность отмечена в Сортавальских шхерах. Здесь отмечаются самые высокие значения численности микопланктона, особенно в придонном горизонте. Видовой состав разнообразен. Помимо типичных озерных представителей, были выделены виды, характерные для районов с повышенным содержанием органического вещества и антропогенного загрязнения – *S. ferax* (Gruith), *Leptomyces lacteus* (Ag) [Коколия, 1967].

Высокая численность микопланктона в Питкярантских шхерах зарегистрирована на всех трех станциях в придонном горизонте (2 400 п/л) при относительно невысокой на поверхности. Качественный состав типичен для локальных техногенных районов с хозяйственно-бытовыми стоками. В Ляскельском районе распределение микопланктона было однородным по всей толще воды, доминировали дрожжевые грибы, что связано с работой цел-

люлозно-бумажного завода. Неравномерное распределение водных грибов было зафиксировано в Якимварских шхерах (невысокая численность на поверхности (1200 п/л), с озерными формами на станции 3 Як. и доминирующими видами, развитие которых связано с повышенным содержанием органического вещества и антропогенным воздействием на ст. 1 Як. и 2 Як.

Предыдущие исследования в шхерном районе озера проводились в 2013 г. Количественный состав микопланктона очень снизился в Сортавальских шхерах и увеличился почти вдвое в Лясельском районе Ладожского оз., при сохранении видового состава (табл. 9.5.1). В исследованных шхерах характер и структура микофлоры различна. Образование микоченозов зависит от многих химических и физических факторов, субстратов, т. е. от особенностей экотопа в целом. Вследствие широкой амплитуды грибов видовой состав достаточно лабилен, и их типы не всегда повторяются в одинаковых условиях [Сафонов, 2013]. В местах, загрязненных промышленными сбросами, отмечается видовое уменьшение, очевидно, из-за токсичности сбросов, иногда увеличивается численность пропагул, развитие которых связано со спецификой сбросов.

Таблица 9.5.1

Сравнительная численность микофлоры (п/л) Сортавальских и Лясельских шхер 2013 и 2018 гг. (поверхностный горизонт)

Станция	2013 год	2018 год
L ₁	800	2200
L ₂	1000	1800
S ₁	12000	800
S ₂	12000	1200
S ₃	12800	5000

Можно сделать вывод, что развитие водной микофлоры в Ладожском оз. связано с возникновением дефицита биологически доступного (минерального) фосфора. Полученные данные не показали наличия грибов в таких объемах, которые могли бы привести к ухудшению качества воды. Интерес представляет изменение качественного состава микофлоры (2015–2018 гг.) в сторону увеличения численности дрожжевых организмов, которые входили в доминирующий комплекс, вытеснив виды других таксономических групп. Исследования 2019 г. зарегистрировали изменение этой тенденции в сторону уменьшения доминирующей роли дрожжевых грибов и, как следствие, изменение доминирующего комплекса. Очевидно, это связано с низкими значениями минерального фосфора по акватории водоема в 2019 г. Однако следует отметить, что в случае роста объема новообразованного органического вещества в придонных слоях прибрежных районов можно ожидать появления дрожжевых грибов с высокой численностью, на порядок и более превышающей нынешнюю, с образованием массовых колоний, что может привести к ухудшению качества воды. Отмеченные значения общей численности микопланктона, в целом, свидетельствуют, что Ладожское оз. является мезотрофным водоемом.

9.6 Зоопланктон

История исследований зоопланктона Ладожского оз. насчитывает более 100 лет, первые работы относятся к началу XX века [Скориков, 1909]. В 1990-е гг. исследования зоопланктона выполнены сотрудниками Института озераведения, некоторые из них – совместно с финскими коллегами [Andronikova, 1994; Karjalainen et al., 1996; Avinski et al., 2000; Андроникова, 1996]. Дальнейший мониторинг сообщества и исследования миграций в прибрежной зоне осуществлены сотрудниками лаборатории гидробиологии ИНОЗ РАН [Родионова, 2011; Родионова, Дудакова, 2012; Дудакова и др., 2015]. В настоящем разделе анализируются данные по сетному зоопланктону, собранному на стандартных станциях в конце июля – начале августа в 2007, 2008, 2010, 2012, 2013, 2017 и 2018 гг. в бухте Петрокрепость, Волховской губе и центральной части озера. Также подведены итоги исследований сообщества в тростниковых зарослях на литорали Ладожского оз. в 2006, 2014 и 2019 гг.

Оценка состояния сообщества зоопланктона в бухте Петрокрепость. За период наблюдений с 2007 по 2018 г., проведенных на 2 станциях (Е и С), зарегистрировано 36 видов планктонных беспозвоночных, из них Rotifera – 13, Cladocera – 14, Calanoida – 4, Cyclopoida – 4. Основным компонентом численности являлись коловратки, среди которых можно выделить следующие доминирующие виды – *Conochilus hippocrepis* (Schränk, 1803), *Kellicottia longispina* (Kellicott, 1879), *Polyarthra dolichoptera* Idelson, 1925. В жарком 2010 г., когда температура воды достигала 25 °С, отмечено сильное увеличение доли веслоногих ракообразных (*Thermocyclops oithonoides* (Sars, 1863)). Биомассу чаще формировали ветвистоусые ракообразные, их высокая роль в целом характерна для бухты Петрокрепость и Волховской губы [Андроникова и др., 2011; Дудакова и др., 2015]. Следует добавить, что отсутствовало выраженное преобладание коловраток р. Asplanchna, отмеченное наблюдениями прошлых лет [Авинский, 2002].

В бухту попадают богатые органическим веществом стоки животноводческих и других предприятий. Это сказывается на показателях обилия зоопланктона. Так, среднемноголетняя биомасса на обеих станциях находится в пределах уровня, характерного для мезотрофных вод (табл. 9.6.1). Причем на станции, заложенной ближе к берегу, а следовательно, и к источникам загрязнения, величины биомассы ожидаемо выше. Во все годы на обеих станциях отмечены высокие показатели индекса Шеннона по биомассе, диапазон которых составлял 2,07–3,81. Полученные значения индекса Шеннона указывают на высокую стабильность сообщества зоопланктона [Китаев, 1984].

Параллельно велись регулярные наблюдения в литоральной зоне Ладожского оз. на участках в устьях р. Кобона и Назия. За время наблюдений с 2006 по 2019 г. здесь зарегистрировано 60 видов зоопланктона, из них Rotifera – 24, Cladocera – 24, Calanoida – 3, Cyclopoida – 9. Высокое число видов планктонных беспозвоночных типично для зарослевой литорали, где имеется большое разнообразие условий обитания. Зарегистрирован схожий состав преобладающих видов в сравнении с обитающими в бухте Петрокрепость [Дудакова и др., 2015], но отмечается более высокая

роль крупных литоральных ветвистоусых (*Sida crystallina* (Müller, 1776), *Polyphemus pediculus* Müller, 1785, *Diaphanosoma brachium* (Lievin, 1848)) и калянид. В то же время показатели обилия в литоральной зоне были скудны. Численность изменялась от 0,9 до 59,1 тыс. экз./м³ (в среднем $19,0 \pm 10,5$ тыс. экз./м³), биомасса – от 0,01 до 0,23 г/м³ (в среднем $0,09 \pm 0,04$ г/м³). В качестве вероятной причины столь значительного расхождения с уровнем обилия в основной акватории бухты можно предполагать токсическое загрязнение прибрежных участков. Однако сильное загрязнение, ведущее к угнетению планктонного сообщества на литорали, отразилось бы и на пелагических организмах. Подобная ситуация в Волховской губе описана Андрониковой [Андроникова и др., 2011], тогда в пробах было отмечено большое количество мертвых и больных особей. В материалах последних лет это не наблюдалось.

Таблица 9.6.1

Структурные показатели зоопланктона на ст. Е и С бух. Петрокрепость по годам

Год	ст. Е				ст. С			
	Число видов	N, тыс. экз./м³	B, г/м³	N _в , бит/г	Число видов	N, тыс. экз./м³	B, г/м³	N _в , бит/г
2007	30	21,1	0,30	3,68	26	20,0	0,33	3,65
2008	20	13,2	0,26	3,22	19	80,6	0,14	3,38
2010	29	89,3	0,72	3,41	29	151,8	1,69	3,56
2012	25	94,0	1,56	2,07	22	190,3	0,50	3,44
2013	–	–	–	–	21	110,5	1,25	2,45
2017	24	39,6	0,35	3,68	22	26,0	0,24	3,81
2018	29	112,4	5,60	1,25	27	35,1	1,78	3,03
М		$61,6 \pm 17,2$	$1,47 \pm 0,85$			$87,8 \pm 25,1$	$0,85 \pm 0,27$	

Таблица 9.6.2

Структурные показатели зоопланктона на ст. 1, 4, 8 Волховской губы по годам

Год	ст. 1			ст. 4			ст. 8		
	Число видов	N, тыс. экз./м³	B, г/м³	Число видов	N, тыс. экз./м³	B, г/м³	Число видов	N, тыс. экз./м³	B, г/м³
2007	21	15,3	0,45	29	14	0,36	–	–	–
2008	18	19,7	0,63	24	26	0,23	29	23,2	0,25
2010	25	84,7	1,23	21	235	1,54	29	124	1,31
2012	23	77,3	1,75	33	128,6	1,92	32	123,5	1,65
2013	19	25,9	0,3	20	56,5	0,71	24	50,4	0,85
2017	14	17,9	0,1	23	55,7	0,56	22	268,4	1,02
2018	17	8,3	0,14	26	32,5	0,57	23	71,5	0,74
М		$35,6 \pm 11,9$	$0,66 \pm 0,23$		$78,3 \pm 29,9$	$0,84 \pm 0,24$		$110,2 \pm 35,6$	$0,97 \pm 0,20$

Оценка состояния сообщества зоопланктона в Волховской губе.

Всего за время наблюдений в Волховской губе на 3 станциях (1, 4 и 8) обнаружено 30 видов планктонных беспозвоночных, из них Rotifera – 11, Cladocera – 13, Calanoida – 4, Cyclopoida – 4. Число обнаруженных видов каждый год отличалось, изменяясь от 14 в 2017 г. до 25 в 2010 г. (табл. 9.6.2) Преобладающими видами по показателю численности чаще являлись коловратки (*C. hippocrepis*, *K. longispina*, *P. dolichoptera*, *Polyarthra euryptera* Wierzejski, 1891, р. Synchaeta) и копеподы (*Mesocyclops leuckarti* (Claus, 1857), *T. oithonoides*), лишь изредка ветвистоусые (*B. (Eubosmina) coregoni* (Baird, 1857)). В целом комплекс доминирующих видов не был постоянным и ярко выраженным, исключением являются наблюдения на станции 1 в 2008 г., когда 47% от общей численности составила *B. (E.) coregoni*, и в 2017 г., когда 86% особей относилось к виду *C. hippocrepis*.

Биомассу, как правило, формировали ветвистоусые ракообразные. Однако в 2007 г. при относительно низкой величине общего показателя на всех станциях отмечена высокая доля копепод. Высокую биомассу на станции 8 в 2012 г. также определило преобладание копепод, в особенности калянид, что, возможно, является следствием наибольшей близости станции к открытой части озера. В целом для этой станции отмечено более интенсивное развитее зоопланктона. Высокие значения индекса информационного индекса Шеннона ($>2,6$) свидетельствуют об устойчивости сообщества зоопланктона в Волховской губе (табл. 9.6.3). Средние многолетние биомассы по своей величине указывают на мезотрофный статус участка.

Таблица 9.6.3

Значения индекса разнообразия Шеннона на ст. 1, 4, 8 Волховской губы по годам

Год	H _B , бит/г		
	ст. 1	ст. 4	ст. 8
2007	2,87	3,56	–
2008	2,91	3,54	3,64
2010	3,01	2,5	3,23
2012	2,49	2,98	3,35
2013	3,46	3,06	1,22
2017	2,1	3,27	2,68
2018	2,61	3,15	2,91

Наряду с тремя стандартными станциями в Волховской губе, были исследованы некоторые участки губы в рамках регулярных наблюдений в литоральной зоне Ладожского оз. Это станции в устье р. Волхов, в 4 км от него, а также в устье р. Воронежка. Всего за период наблюдения здесь обнаружено 73 вида зоопланктона (Rotifera – 32, Cladocera – 30, Calanoida – 3, Cyclopoida – 8), значительно больше, чем в основной акватории губы, что характерно для сообществ литорали. При этом зарегистрированы очень низкие показатели обилия. Численность изменялась от 0,3 до 27,8 тыс. экз./м³ (в среднем 13,7±4,5 тыс. экз./м³), биомасса – от 0,01 до 0,62 г/м³ (в среднем

0,13±0,98 г/м³). Возможно, причиной столь низких показателей, как и в бухте Петрокрепость, является динамика вод. Однако не следует исключать и вероятность токсического загрязнения прибрежных вод в Волховской губе как зоне активной хозяйственной деятельности.

Оценка состояния сообщества зоопланктона в центральной части озера. Видовой состав зоопланктона центральной части озера изучался на 3 станциях (55, 82 и 105). Он имел сходство в эпилимнионе (0–10 м) склонового (станции 55, 82) и глубоководного районов (ст. 105). За период наблюдений обнаружены 35 и 31 вид зоопланктона соответственно. В этих районах среди доминирующих видов выделялись коловратки *C. hippocrepis*, *K. longispina*, *P. dolichoptera*, *Filinia longiseta* (Ehrenberg, 1834), циклоп *T. oithonoides*. Полученные среднеголетние показатели обилия на трех станциях были схожего порядка (табл. 9.6.4). Биомассу в разные годы определяли как ветвистоусые, так и коловратки и веслоногие ракообразные. Прослеживается повышенная роль коловраток в сравнении с прибрежными районами, в основном за счет преобладания крупного планктонного хищника *Asplanchna priodonta* (Gosse, 1850). Несколько более высокая среднеголетняя биомасса получена для глубоководного района за счёт высоких показателей 2017 и 2018 гг. Тогда биомассу более чем на 50% формировали глубоководные копеподы – *Limnocalanus macrurus* (Sars, 1863) и копеподиты *Cyclops lacustris* (Sars, 1863). Это явление в целом не характерно для эпилимниона Ладожского оз. и, вероятно, связано с вертикальной динамикой вод.

Таблица 9.6.4

Структурные показатели зоопланктона эпилимниона на ст. 55, 82 склонового района и ст. 105 глубоководного района по годам

Год	ст. 55 (0–10 м)			ст. 82 (0–10 м)			ст. 105 (0–10 м)		
	Число видов	N, тыс. экз./м ³	B, г/м ³	Число видов	N, тыс. экз./м ³	B, г/м ³	Число видов	N, тыс. экз./м ³	B, г/м ³
2007	17	34,1	0,34	20	16	0,27	21	17,2	0,11
2008	19	22,5	0,26	–	–	–	–	–	–
2010	25	121,1	0,7	21	72,7	0,53	22	62,2	0,78
2012	–	–	–	20	45,9	0,29	24	38,5	0,46
2013	27	50,7	0,34	–	–	–	21	110	0,54
2017	17	128,2	0,51	–	–	–	21	56,9	1,3
2018				17	12,6	0,27	24	35,7	0,86
M		71,3 ±22,3	0,43 ±0,08		36,8 ±14,1	0,34 ±0,06		53,4 ±13,1	0,68 ±0,16

Значения индекса Шеннона по биомассе и его изменчивость (табл. 9.6.5) свидетельствуют о выровненности и стабильности сообщества зоопланктона в эпилимнионе склонового и глубоководного районов. Вместе с полученными среднеголетними значениями биомассы данный индекс указывает на олиготрофный статус этих участков.

Таблица 9.6.5

Значения индекса разнообразия Шеннона на ст. 55, 82, 105 по годам

Год	H _B , бит/г		
	ст. 55	ст. 82	ст. 105
2007	2,25	2,07	3,17
2008	2,91	–	–
2010	3,24	2,67	3,54
2012	–	3,04	3,14
2013	3,78	–	3,38
2017	2,71	–	2,82
2018	–	2,1	2,91

Оценка состояния сообщества зоопланктона в литоральной зоне. За время наблюдений в литоральной зоне с 2006 по 2019 г. зарегистрировано 143 вида планктонных беспозвоночных. Коловратки являлись самой богатой видами группой – встречено 74 вида из 16 семейств. Разнообразие ветвистоусых (51 вид из 11 семейств) обеспечено многочисленными представителями семейства Chydoridae (31 вид), типичных обитателей литоральной зоны озер. Обнаружено 13 видов циклопид, большинство из которых также обитает преимущественно в прибрежье. Каляниды представлены 5 видами из 3 семейств.

Всего за вековой период исследования фауны Ладожского озера обнаружено 334 таксона рангом ниже вида [Родионова, 2011]. Подавляющее большинство обнаруженных при данном исследовании видов уже отмечено для водоема. Один вид зарегистрирован впервые – коловратка *Lecane* (s. str) *levistyla* (Olofsson, 1917). Эта коловратка обнаружена в 2019 г. на ст. 17 в заливе Рауталахти, качественная проба отобрана на участке с каменистым дном. Согласно Кутиковой [Кутикова, 1970], *L.* (s. str) *levistyla* обитает среди высшей водной растительности на каменистой литорали. Это обычный для Палеарктики вид [Segers, 1996], из ближайших регионов он зарегистрирован, например, для Карелии [Куликова, 2010]. Коловратка встречена лишь в качественной пробе, что не позволило оценить ее численность, но отметим, что она была представлена всего несколькими экземплярами.

Составлен список видов, которые встречались чаще всего за время наблюдений. Всего таких видов 18 (расположены в порядке убывания встречаемости) – *T. oithonoides* (отмечен в 96% наблюдений), *M. leuckarti*, *B. (E.) coregoni*, *Bosmina* (*Bosmina*) *longirostris* (Müller, 1785), *S. crystallina*, *Chydorus sphaericus* (Müller, 1785), *Keratella cochlearis* (Gosse, 1851), *K. longispina*, *P. dolichoptera*, *A. priodonta*, *Euchlanis dilatata* Ehrenberg, 1832, *Eudiaptomus gracilis* (Sars, 1863), *P. pediculus*, *Eurytemora lacustris* (Poppe, 1887), *Ceriodaphnia quadrangula* (Müller, 1785), *Disparalona rostrata* (Koch, 1841), *Acroperus harpae* (Baird, 1834), *Alonella nana* (Baird, 1850) (отмечена в 50% наблюдений). Из них 7 видов – типичные обитатели литоральной зоны. Таксономическую структуру сообществ в значительной степени определял временной фактор (по результатам двухфакторного анализа ANOSIM, по фактору «год» R = 0,37,

$p = 0,0001$), так же, как и географическое положение (по фактору «регион» $R = 0,23$, $p = 0,0003$). Количественные показатели сильно различались между станциями (табл. 9.6.6). Численность изменялась от 0,1 до 1348,9 тыс. экз./м³. Биомасса изменялась от 0,5 до 46598,6 мг/м³. При этом для большей части наблюдений зарегистрированы низкие показатели обилия.

Таблица 9.6.6

Распределение средних величин и диапазонов колебания показателей обилия

N, тыс. экз./м ³			B, г/м ³		
Год	Север	Юг	Год	Север	Юг
2006	$239,7 \pm 159,76, 7-1348,9$ n=8	$48,7 \pm 17,01, 2-210,5$ n=11	2006	$6,95 \pm 5,700, 06-46,60$ n=8	$0,12 \pm 0,030, 01-0,25$ n=11
2014	$148,2 \pm 57,011, 9-432,9$ n=9	$13,0 \pm 4,75, 0-43,4$ n=8	2014	$1,72 \pm 0,700, 14-5,12$ n=9	$0,17 \pm 0,070, 01-0,62$ n=8
2019	$29,1 \pm 9,05, 4-70,0$ n=9	$5,5 \pm 2,20, 1-14,9$ n=7	2019	$0,25 \pm 0,110, 04-1,12$ n=9	$0,16 \pm 0,140, 0005-0,97$ n=7
Σ	$135,1 \pm 53,55, 4-1348,9$ n=26	$26,1 \pm 8,00, 1-210,5$ n=26	Σ	$2,82 \pm 1,780, 04-46,60$ n=26	$0,15 \pm 0,040, 0005-0,97$ n=26

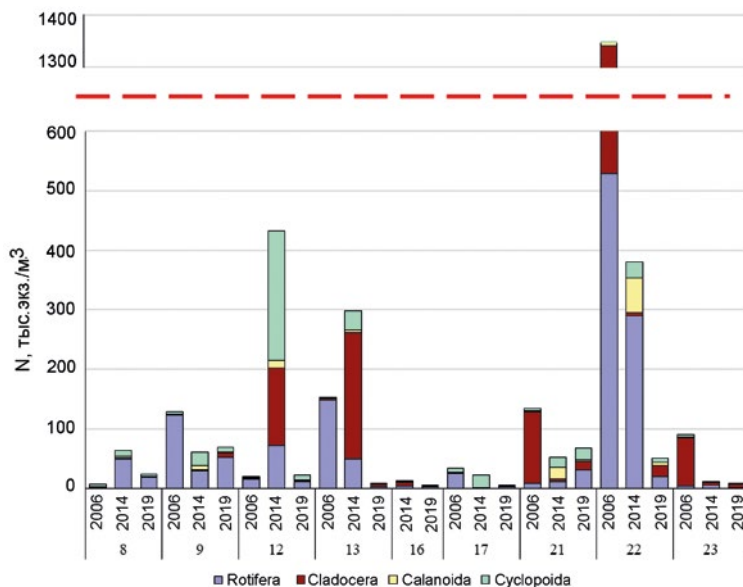


Рис. 9.6.1 – Численность зоопланктона в Ладожских шхерах

Как видно из рис. 9.6.1, основной группой, формирующей численность на северных станциях, были пелагические коловратки – *K. longispina*, *Conochilus*, *Polyarthra* и *K. cochlearis*. В случаях, когда преобладали ветвистоусые ракообразные, часто доминировала *B. (E.) coregoni*. Именно этот вид дал вспышку численности у о. Хаукасаари (ст. 22) в 2006 г. (743 тыс. экз./м³). Высоким было и обилие колониальных коловраток *Conochilus unicornis* Rousslet, 1892 (523 тыс. экз./м³). В 2014 г. здесь же

большую численность имел родственный вид *C. hippocrepis* (226 тыс. экз./м³). Повышенная численность ветвистоусых также отмечена на станции 13 в 2014 г. за счет *B. (E.) coregoni*, *C. quadrangula* и *B. (B.) longirostris* (86, 73 и 51 тыс. экз./м³ соответственно). На ст. 21 и 23 в 2006 г. преобладающую роль имела *B. (E.) coregoni* (103 и 46 тыс. экз./м³ соответственно). На станции 12 в 2014 г. по численности преобладал *T. oithonoides*. Тогда же отмечена значительная численность *B. (B.) longirostris* (75 тыс. экз./м³). В южной части озера ситуация отличалась. Так, для большинства наблюдений численность не превышала 50 тыс. экз./м³ (рис. 9.6.2). Циклопы преобладали чаще, особенно *T. oithonoides* (ст. 30 в 2014 г., ст. 2 в 2014 и 2019 гг., ст. L3–14, ст. 4 в 2014 г.). Из коловраток в основном доминировала *K. cochlearis*. Относительно высокие показатели на станции 27 в 2006 г. связаны со вспышкой численности коловратки *Ploesoma truncatum* (Levander, 1894) (174 тыс. экз./м³). По результатам двухфакторного анализа ANOSIM показано достоверное различие таксономической структуры по показателю численности в разных частях озера (фактор «регион», $R = 0,27$, $p = 0,0001$) и в разные периоды наблюдения (фактор «год», $R = 0,41$, $p = 0,0001$).

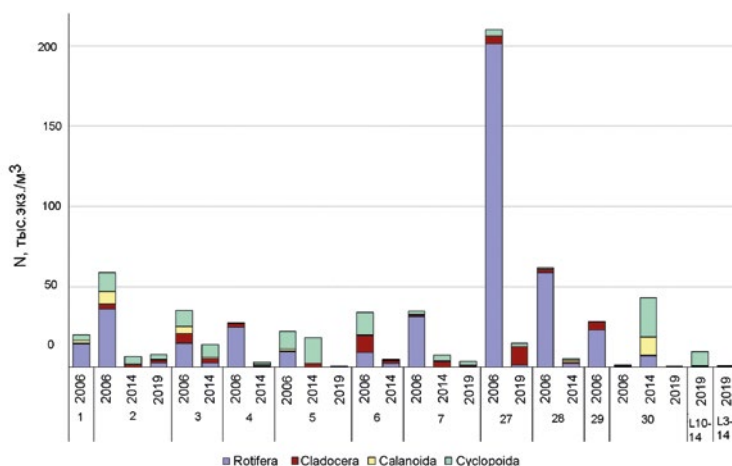


Рис. 9.6.2 – Численность зоопланктона в южной части Ладожского оз.

Высокие биомассы формировали ветвистоусые ракообразные (рис. 9.6.3). Так, в 2006 г. на ст. 21, 22 и 23 наибольший вклад вносил *P. pediculus*. Максимальное за время наблюдений значение показателя было зарегистрировано на станции 22 и связано с попаданием в пробу роя полифемусов (37,4 г/м³), но обращает на себя внимание и высокая биомасса коловратки *C. unicornis* (1,3 г/м³). В том же году на ст. 12, 13 и 21 значимую роль играла *B. (E.) coregoni*. Биомассу на станции 27 в 2019 г. формировала *S. crystallina*.

В некоторых наблюдениях биомассу определяли другие группы. Так, на станции 5 в 2014 г. преобладали циклопиды – *Megacyclops viridis* (Jurine, 1820), *M. leuckarti* и *Thermocyclops crassus* (Fischer, 1853) (0,3, 0,2

и $0,1 \text{ г/м}^3$). Тогда же на станции 22 наибольшую биомассу имели коловратки рода *Asplanchna* ($2,3 \text{ г/м}^3$) и калянида *E. gracilis* ($1,2 \text{ г/м}^3$). В целом для южной части озера чаще отмечалось преобладание циклопид по биомассе (рис. 9.6.4).

Для оценки изменчивости биомассы был также проведен двухфакторный дисперсионный анализ ANOSIM. По его результатам, величина показателя биомассы связана и с годом наблюдения ($R = 0,22$, $p = 0,0001$), и с регионом ($R = 0,25$, $p = 0,0001$).

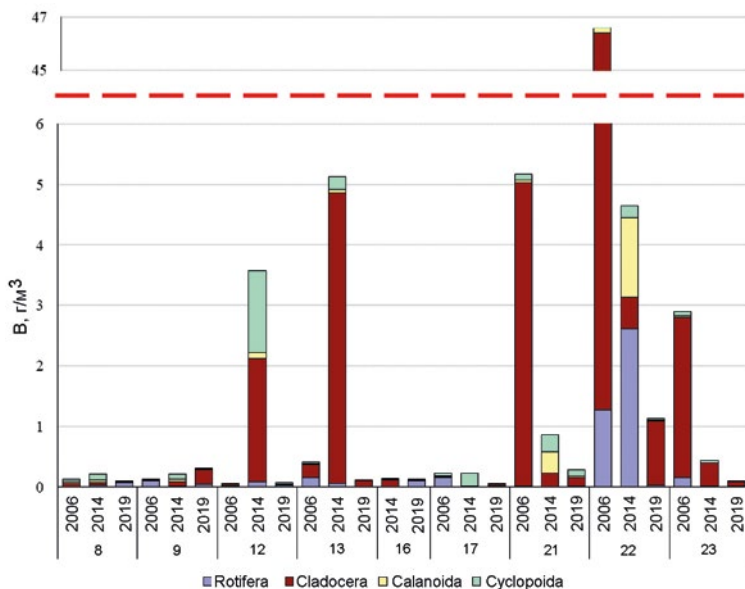


Рис. 9.6.3 – Биомасса зоопланктона в Ладожских шхерах

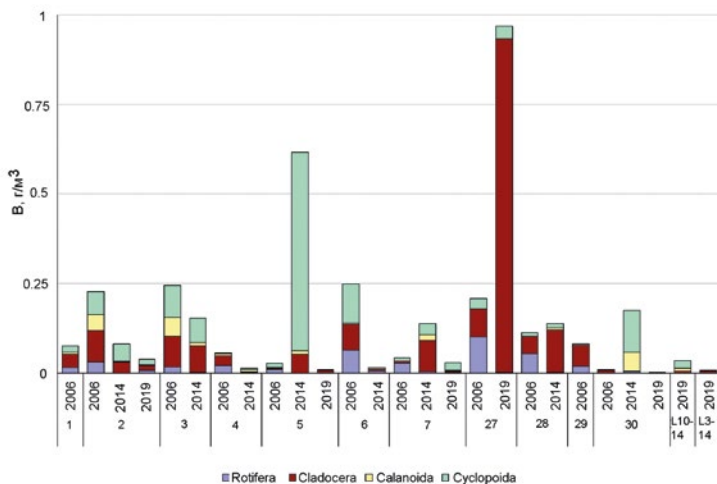


Рис. 9.6.4 – Биомасса зоопланктона в южной части Ладожского оз.

Получено также, что географическое положение влияет на средние численность ($p < 0,0001$) и биомассу ($p < 0,0001$). Так, по результатам Post Hoc анализа, средняя численность между регионами достоверно различалась в 2014 и 2019 годах, а различия по средней биомассе достоверны во все годы. С каждым годом средние численность и биомасса в целом уменьшались (рис. 9.6.5, 9.6.6). Особенно низкие показатели отмечены в 2019 г.

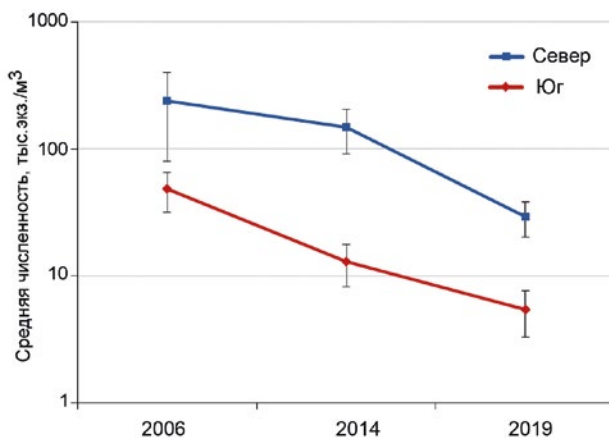


Рис. 9.6.5 – Средняя численность зоопланктона в северной и южной частях литоральной зоны Ладожского оз. по годам

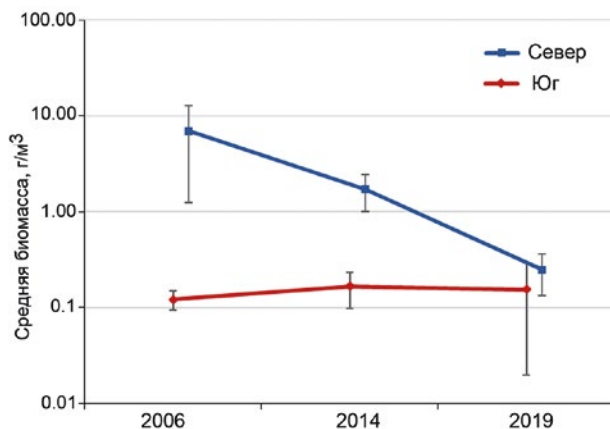


Рис. 9.6.6 – Средняя биомасса зоопланктона в северной и южной частях литоральной зоны Ладожского оз. по годам

Достоверность межгодовых различий подтвердилась лишь в нескольких случаях. Так, в северных шхерах достоверны различия средних численности и биомассы 2014–2019 гг. и 2006–2019 гг. В южном районе достоверно различались только средние численности 2014–2019 гг. и 2006–2019 гг. 2006 и 2014 гг. различались недостоверно. Причиной межгодовых различий, вероятно, является температура [Stemberger et. al., 1996; Shuter, 1997]. 2006 г. по средним показателям был наиболее теплым

за время наблюдения, а 2019 г. – самым холодным [Отчет о научно-исследовательской работе ..., 2019].

Значения индекса сапробности в целом находились в пределах, характерных для олигосапробных вод. Согласно классификации качества по гидробиологическим показателям, рассчитанные значения соответствуют «чистым» водам II класса качества (ГОСТ 17.1.3.07–82). Лишь на ст. 4 в 2014 г. значение индекса сапробности приближалось к мезосапробному уровню. Несмотря на низкую частоту наблюдений на станциях, полученный массив значений за разные годы позволяет говорить об отсутствии явного органического загрязнения.

Индекс разнообразия Шеннона по биомассе (H_B) обычно находился в пределах, свойственных водоемам с олиготрофным статусом [Китаев, 1984]. Но в некоторых случаях зарегистрированы значения индекса, соответствующие эвтрофному типу. Это наблюдения на ст. 13 в 2014 г., 21 в 2006 г., 27 в 2019 г. и 22. По результатам наблюдений видно, что в целом зоопланктон литоральной зоны характеризуется низкими численностью и биомассой. Отдельного обсуждения требуют случаи, когда зарегистрировано интенсивное количественное развитие зоопланктона. В свете этого особое внимание следует уделить биомассе и индексу разнообразия Шеннона по биомассе, как показателям трофического статуса.

Наблюдения на ст. 22 у о. Хаукасаари привлекают внимание стабильно высокими значениями биомассы и низким H_B . В 2006 и 2019 гг. это было связано с роением *P. pediculus*, обычным для ветвистоусых ракообразных явлением [Киселев, 1980]. Стайное поведение *P. pediculus* описано давно, в том числе и на ладожской литорали [Буторина, 1975; Андроникова, Распопов, 2000]. Для этих хищных ракообразных формирование таких агрегаций является формой пищевого поведения. В окрестностях станции отсутствуют промышленные объекты и крупные населенные пункты, антропогенное воздействие ограничено туризмом. Остров находится близко к открытой части озера, но исследуемый участок литорали защищен от сильного волнового воздействия. В таком случае более вероятно, что здесь естественным образом сложились благоприятные условия для развития литорального зоопланктона.

Залив Импилахти (ст. 12) по истории наблюдений описан как эвтрофный [Андроникова и др., 2011]. В представленном исследовании признаки, указывающие на такой статус, отмечены только в 2014 г. – высокая общая биомасса, а также значительная численность *B. (B.) longirostris* (17% от общего показателя). При этом H_B , напротив, указывал на олиготрофный тип водоема, так как отсутствовало выраженное преобладание одного вида по биомассе. Основным источником загрязнения вод узкого, изолированного залива являются хозяйственно-бытовые стоки. В частности, до середины 1990-х гг. залив был подвержен влиянию стоков зверофермы вплоть до закрытия предприятия. После продуктивность растительных сообществ снизилась [Андроникова, Распопов, 2008], однако проблема неочищенных сточных вод осталась актуальной. По результатам комплексной экспедиции ИНОЗ РАН 2006 г. получены данные по другим показателям, свидетельствующие об эвтрофном статусе участка. Так, отмечена самая высокая биомасса фи-

топланктона для северных шхер – $5,6 \text{ г/м}^3$, а в поровых растворах донных отложений была повышенная концентрация минерального фосфора [Литеральная..., 2011]. Выбранная точка наблюдения находится близко к выходу из залива, соответственно, здесь присутствует влияние вод открытой части озера. Это может объяснить зарегистрированные колебания показателей обилия в очевидно эвтрофном заливе. Похожим образом можно интерпретировать высокую биомассу зоопланктона в 2006 г. в Яккимваарском заливе (ст. 21). Залив также хорошо изучен, в него также поступают бытовые сточные воды, сам залив изолированный и описан как эвтрофный.

Залив Хауккалаhti (ст. 13), расположенный рядом с заливом Импилахти, напротив, относят к олиготрофному типу [Андроникова, 2011], при этом в 2014 г. зарегистрирован один из самых высоких показателей биомассы за исследуемый период. Причиной послужило роение *C. quadrangula* и *B. (E.) coregoni*. В данном случае низкий H_b также не может быть использован в качестве индикатора трофического статуса и является описательной характеристикой структуры сообщества. Фактор динамики вод может частично объяснять зарегистрированные вспышки численности. Известно, что сгонно-нагонные явления, хорошо выраженные на Ладожском оз., ведут к образованию скоплений зоопланктона [Киселев, 1980]. Например, ветровое воздействие позволяет интерпретировать высокую численность типично пелагической коловратки *P. truncatum* на ст. 27 в 2014 г. Отметим тот факт, что указанная станция в большей степени подвержена влиянию вод открытой Ладоги, нежели участки в северных шхерах.

В целом описанные выше случаи являются подтверждением того, что пятнистое распределение и наблюдаемые межгодовые колебания численности и биомассы – нормальное явление для зоопланктона литорали [Lehtovaara, 1984; Андроникова, Распопов, 2000]. На соотношение групп могут влиять суточные миграции планктонных беспозвоночных, описанные для многих обитателей литорали Ладожского озера [Родионова, Дудакова, 2012; Дудакова и др., 2015]. Таким образом, при объяснении причин колебаний важно помнить о естественной природе данного явления. Источник антропогенного воздействия на таких изученных водоемах, как Ладожское озеро, как правило, известен и виден. При обстановке, подобной таковой на заливе Импилахти, а также зал. Яккимваарский (ст. 21) и в устье р. Вуокса близ Приозерска (ст. 23), когда влияние человека на водоем очевидно, не исключена антропогенная природа колебаний.

Сравнение структуры и количественного развития зоопланктона показало довольно устойчивую картину распределения основных систематических групп и относительно равномерное распределение показателей обилия по акватории озера. Для литоральной зоны выявлены статистически значимые отличия показателей обилия литорального зоопланктона в северном шхерном и южном районах озера. Высокие значения индекса Шеннона и их низкая вариабельность в целом по озеру свидетельствуют о стабильности сообщества. Относительно литорального зоопланктона, низкие значения индекса Шеннона зачастую не могут быть использованы для установления трофического статуса, а скорее описывают особенности сообществ, связанные с доминированием одного-двух видов. Согласно классификации

Китаева, глубоководный и склоновый районы по биомассе и индексу Шеннона соответствуют олиготрофному статусу озерной экосистемы [Китаев, 1984]. Литоральная зона, мелководный и прибрежный районы бухты Петрокрепость и Волховской губы по данным показателям относятся к мезотрофному типу.

9.7 Макрозообентос

Исследования донной фауны Ладожского оз. были начаты в начале 19-го столетия. История изучения зообентоса подробно отражена в публикациях С. В. Герда [1946], Ц. И. Иоффе [1948] и Г. А. Стальмаковой [1968]. С середины 20-го века регулярные наблюдения за макрозообентосом проводились в составе комплексных экспедиций Института озераедения РАН [Слепухина, Алексеева, 1982; Меншуткин и др., 1987; Барбашова, Слепухина, 2002; Барбашова 2014; Барбашова, 2015]. Работы последних лет продолжают многолетний мониторинг по изучению зообентоса озера.

Цель данного раздела – представить данные по количественному развитию, структуре, особенностям распределения и межгодовой изменчивости донных беспозвоночных в открытых районах озера.

В 2013–2019 гг. был собран материал по макрозообентосу на 63 станциях по всей акватории озера. В 2014 г. исследования не проводились. Пробы отбирались на глубинах от 5 до 210 м. Для сбора на песчаных грунтах применялся дночерпатель Петерсена, на илистых – Экмана – Берджа (площадь захвата 1/40 м²; по 2 выемки в каждой точке). Пробы грунта промывались через капроновое сито № 38 и разбирались в полевых условиях, беспозвоночные фиксировались 70%-м спиртом. Дальнейшая обработка проб осуществлялась в лаборатории. Донных животных сортировали по группам, подсчитывали количество особей и определяли биомассу.

Ладожское оз. – крупный водоем, в котором глубина является мощным интегральным фактором, определяющим характер биотопов и структуру донных биоценозов. При этом непосредственное влияние на организмы оказывают такие экологические факторы, связанные с глубиной, как гидрологический и температурный режимы, характеристики грунта, седиментация взвешенных веществ из водной толщи. Разнообразие природных условий обуславливает неоднородность в количественном развитии и распределении зообентоса в озере.

В открытых районах озера основу фауны макробеспозвоночных составляли представители четырех таксономических групп – Oligochaeta, Chironomidae, Amphipoda и моллюски Bivalvia. Среди остальных групп зообентоса единично отмечались Hydridae, Turbellaria, Mermithidae, моллюски Gastropoda, Isopoda, Mysidacea, Hydracarina, Ephemeroptera, Trichoptera, Heteroptera и Ceratopogonidae.

В северной части озера на серых илах численность зообентоса изменялась от 40 до 4320 экз./м², а биомасса – от 0,10 до 8,00 г/м² (табл. 9.7.1). В районе впадин (глубины более 160 м) доминировали олигохеты (в среднем 94% численности и 93% биомассы).

Таблица 9.7.1

Средние показатели ($X \pm SE$) численности и биомассы макрозообентоса и пределы их колебания (min – max) в различных районах озера в 2013–2019 гг.

Р-н	Грунты	Глубина, м	Численность, экз./м ²		Биомасса, г/м ²	
			$X \pm SE$	min – max	$X \pm SE$	min – max
Впадины	Ил серый, n=9	160–210	540±258	40–2356	1,31±0,76	0,10–6,94
СР	Ил серый, ил с рудными прослоями, n=31	75–135	911±175	80–4320	2,13±0,37	0,11–8,00
ЦР	Ил серый с рудными прослоями, n=21	62–80	659±58	320–1340	1,58±0,15	0,60–3,28
ПИТ	Ил серый, n=15	28–63	977±121	200–1800	2,35±0,40	0,48–6,64
ПР	Ил серый, ил песчаный, n=11	35–45	822±116	340–1640	1,71±0,34	0,70–4,46
	Песок разнотернистый, n=5	15–24,5	280±128	40–660	0,44±0,28	0,04–1,40
ЗБ	Ил серый, ил песчаный, n=10	28–45	520±81	100–820	1,14±0,26	0,10–2,74
	Песок разнотернистый, n=34	6–22	896±116	20–2020	1,60±0,25	0,06–4,88
ВБ	Ил серый, n=9	38–50,5	456±96	120–860	1,28±0,38	0,35–3,82
	Песок мелкий, тонкий, n=21	14–21	700±116	140–2100	1,01±0,20	0,07–3,19
ЮР	Ил песчаный, n=20	24–42,5	763±171	180–2700	2,13±0,62	0,20–9,64
	Песок разнотернистый, n=5	6,5–23	776±315	160–1800	1,56±0,62	0,64–3,68
БП	Песок мелкий, тонкий, n=20	5–9,5	982±207	40–3020	2,40±0,56	0,03–9,01
ВГу	Песок заиленный, n=21	5–9,5	1521±198	500–3280	6,17±1,78	0,57–29,78
ВГо	Песок разнотернистый, n=17	8–13	1107±175	440–2700	2,10±0,48	0,61–7,78
СГ	Песок тонкий, n=11	5,5–9,5	384±108	40–1300	0,41±0,08	0,18–0,84

n – количество проб, СР – Северный глубоководный район, ЦР – Центральный район, ПИТ – в районе г. Питкяранта, ПРВ – в районе г. Приозерска, ЗБ – Западное побережье, ВБ – Восточное побережье, ЮР – Южный район, БП – Бухта Петрокрепость, ВГу – Волховская губа, приустьевые участки рек, ВГо – Волховская губа, открытая часть залива, СГ – Свирская губа

В северном глубоководном районе (глубины 75–135 м) как по численности (71%), так и по биомассе (78%) также преобладали олигохеты. В исследуемый период количественные характеристики зообентоса на некоторых станциях находились у верхней границы пределов межгодовых колебаний. Сравнение результатов двух периодов исследования (1994–2012 гг. и 2013–2019 гг.) по t-критерию Стьюдента не выявило достоверных различий ($p > 0,05$). Большие количественные показатели малоциментковых червей регистрировались в глубоководном районе и ранее. Из литературных источников известно, что в 1992–1996 гг. на глубинах 90 м биомасса донных животных в отдельные годы достигала 9 г/м² [Полякова, 1999]. Высокие значения биомассы олигохет (4,18 г/м²) отмечались также в 2009 г.

Обращает на себя внимание тот факт, что в глубоководном районе в северо-восточной части озера величины численности (1514±320; 320–4320 экз./м²) и биомассы (3,58±0,61; 1,00–8,00 г/м²) зообентоса значительно

выше, чем на северо-западе в районе п. Моторное (254 ± 51 , 80–500 экз./м²; $0,54 \pm 0,11$, 0,11–0,99 г/м²). Возможно, что отличия в уровне развития бентоса этих двух участков с одинаковыми глубинами связаны со структурными особенностями грунтов. Так, в северо-восточной части озера они представлены мягкими илистыми донными отложениями, а в северо-западной части озера – илами с рудными прослоями. Известно, что плотные железо-марганцевые корки на поверхности мягких илов могут служить механической преградой для процессов нормальной жизнедеятельности беспозвоночных. Это, в свою очередь, может быть причиной крайне низких качественных и количественных показателей сообществ зообентоса.

В центральной части озера на глубинах 62–80 м значения численности ($320\text{--}1\,340$ экз./м²) и биомассы ($0,6\text{--}3,28$ г/м²) невысоки. В биомассе бентоса доля олигохет в среднем составляла 41 %, хирономид – 6 %, амфипод – 52 %. В профундали озера среди олигохет наиболее многочисленны *Lamprodrilus isoporus* Svetlov, *Stylodrilus heringianus* Clap, *Spirosperma ferox* Eisen; из хирономид – *Trissocladius parataticus* (Tschern.); амфипод – *Monoporeia affinis* (Lindstrom). Количественные показатели макрозообентоса находились в пределах межгодовой изменчивости, характерной для этого района озера. Так, в период 1994–2012 гг. численность донных животных варьировала от 140 до 2580 экз./м², а биомасса $0,36\text{--}8,78$ г/м² [Барбашова, 2014].

В переходном районе на глубинах 28–63 м на илистых грунтах в районе г. Приозерска основу биомассы ($0,70\text{--}4,46$ г/м²) в среднем определяли олигохеты (55 %), хирономиды (29 %) и амфиподы (15 %). В районе г. Питкяранта биомасса макрозообентоса находилась в пределах от 0,48 до 6,64 г/м². Здесь ведущее место в биоценозе занимали олигохеты (76 % численности, 78 % биомассы). У западного берега в районе р. Бурная основной вклад в биомассу ($0,10\text{--}2,74$ г/м²) вносили олигохеты (52 %), хирономиды (14 %) и амфиподы (31 %). В восточной части озера в биомассе бентоса ($0,35\text{--}3,82$ г/м²) существенную роль играли олигохеты (54 %) и амфиподы (41 %). В 2018 г. в этом районе озера на глубине 49 м был обнаружен ледниково-морской реликт *Saduria entomon* L. (20 экз./м²; 56,40 г/м²). Этот вид крайне редко встречался в наших сборах. Ранее он регистрировался в 2010 г. у западного побережья. В расчетах средней численности и биомассы зообентоса количественные характеристики этой крупной изоподы не учитывались.

В южной открытой части озера на глубинах 6,5–42,5 м численность организмов изменялась от 160 до 2700 экз./м², биомасса – от 0,20 до 9,64 г/м². На песках и песчаных илах донные беспозвоночные были представлены олигохетами, хирономидами и амфиподами, доля которых в биомассе бентоса составила в среднем 63–73 %, 4–6 % и 19–29 % соответственно (рис. 9.7.1).

В мелководном районе вдоль западного и восточного открытых берегов на песчаных биотопах (глубины 6–22 м) численность зообентоса варьировала от 20 до 2020 экз./м², а биомасса – от 0,06 до 4,88 г/м². Основу биомассы формировали олигохеты (47–63 %), хирономиды (11–31 %) и амфиподы (18–24 %). Для открытых побережий с глубинами 5–20 м соответствует зона наиболее интенсивных динамических процессов, приводящих к размыву и выносу осадочного материала. Здесь наиболее часто встречаются песчаные и галечные грунты с бедной донной фауной.

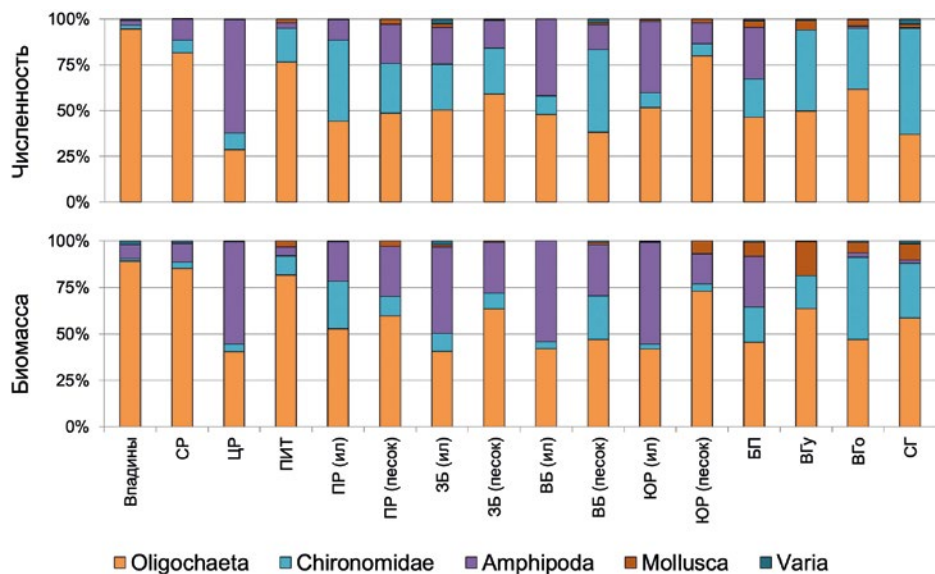


Рис. 9.7.1 – Соотношение основных групп макрозообентоса по численности и биомассе в различных районах озера в 2013–2019 гг. (сокращение названий районов озера как в таблице 9.7.1)

Южный прибрежный район включает в себя три крупных мелководных залива: бухты Петрокрепость, губы Волховская и Свирская. Все заливы имеют хороший водообмен с открытым озером. В бухте Петрокрепость численность изменялась от 40 до 3020 экз./м², а биомасса – от 0,03 до 9,01 г/м². Биомассу бентоса в среднем определяли олигохеты (50%), хирономиды (21%), амфиподы (20%) и моллюски (8%). Среди олигохет доминирующим видом является *L. isoporus*. Из хирономид наиболее многочисленны виды – *Pseudodiamesa bathyphila* Kieff, *Heterotrissocladius grimschawi* Edw., *Polypedilum scalaenum* Schr., *Cladotanytarsus mancus* Walk и *Micropsectra praecox* (Miegen). В последние годы на двух мониторинговых станциях (112–60°09'00" N; 31°18'40" E; 114–60°01'01" N; 31°15'00" E) этого залива наблюдались некоторые отличия в уровне развития макрозообентоса. Несмотря на схожие условия обитания донных беспозвоночных, более низкие значения численности и биомассы на ст. 112 фиксировались нами с 2006 г. Так, средняя биомасса на этой станции за летний период 2006–2012 гг. составила $0,47 \pm 0,09$ г/м², при этом максимальная не превышала 0,99 г/м². В то же время на другой станции (ст. 114) этого залива диапазон колебания биомассы за этот же период времени был довольно большой – от 0,71 до 6,06 г/м² при средней равной $3,09 \pm 0,57$ г/м² [Барбашова, 2015]. В 2013–2019 гг. количественные показатели остались примерно на том же уровне, на ст. 112 средняя биомасса зообентоса равнялась $0,90 \pm 0,63$ г/м², а на ст. 114 – $3,62 \pm 0,71$ г/м². Данные 2013–2019 гг. еще раз подтверждают ранее высказанное предположение о связи низкого уровня развития бентоса на ст. 112 с проводимыми в этом районе озера дноуглубительными работами для расчистки и углубления судоходного фарватера, который проходит в бухте Петрокрепость.

В бухте Петрокрепость донные сообщества регулярно изучались с середины 1970-х годов [Слепухина, Алексеева, 1982; Балушкина и др., 1996; Финогенова и др., 1999]. Сравнение данных за разные периоды исследования показало некоторое снижение уровня развития бентоса в этом районе озера до 2018 г. (табл. 9.7.2). Увеличение средних количественных показателей зообентоса в 2019 г. связано с проникновением в центральную часть залива (ст. 114) байкальского вселенца *Micruropus possolskii* Sowinsky, где его численность (1820 экз./м²) и биомасса (6,40 г/м²) довольно высоки. Более подробная информация о появлении *M. possolskii* в Ладожском оз., а также о временной и пространственной динамике его расселения в водоеме представлена в разделе 9.9.

Таблица 9.7.2

**Средние количественные показатели макробентоса
в центральной части бухты Петрокрепость на песках в разные годы**

Период исследования	Численность, экз./м ²	Биомасса, г/м ²
1978–1979*	1160	2,40
1982*	1640	5,70
1986*	1810	3,90
1993*	1600	5,90
1994–2005	1870	4,63
2006–2012	1005	1,67
2013	1090	3,96
2015**	2320	5,6
2016	710	1,28
2017	813	1,64
2018	836	1,99
2019	1620	4,75

* – данные взяты из работы [Балушкина и др., 1996]; ** – одnorазовый сбор на ст. 112.

В Волховской губе пределы колебания численности составили 440–3280 экз./м², биомассы – 0,57–29,78 г/м². Характерной особенностью этого залива является мозаичность распределения бентоса. Наиболее высокие величины биомассы донных беспозвоночных отмечались в приустьевых участках рек Волхов и Сясь, куда поступает значительное количество взвеси и биогенных элементов. В открытой части залива биомасса зообентоса ниже, ее величины варьировали от 0,61 до 7,78 г/м². Существенный вклад в биомассу бентоса как в приустьевых участках рек, так и в открытой части залива вносили олигохеты (54–56%), хирономиды (25–33%) и моллюски (6–20%). Из олигохет наиболее обильны *Tubifex newaensis* (Mich.) и *Limnodrilus hoffmeisteri* Clap; из хирономид – виды р. *Chironomus*, *Procladius* и *Microtendipes pedellus* (De Geer); из моллюсков – виды р. *Sphaerium*, *Pisidium*, *Euglesa* и *Valvata*. В отдельные годы в дночерпа-

тельные пробы попадались крупные двусторчатые моллюски, которые регистрировались, но расчет средних величин количественных показателей зообентоса проводился без их учета. Так, в августе 2013 г. здесь была встречена унионида *Unio tumidus* Philipsson (20 экз./м², 63,2 г/м²).

В Волховской губе наиболее долговременные исследования проводились на ст. 1 (60°09'60" N; 32°21'00" E). Еще в 1961 г. (архив Г. А. Стальмаковой) на станции у входного буя в р. Волхов биомасса макробентоса составляла 30 г/м² [Науменко и др., 2000], тогда как средняя биомасса бентоса южной части прибрежной зоны в начале 1960-х годов равнялась 1,7 г/м² [Стальмакова, 1968]. Характеризуя по бентосу Ладожское оз. как олиготрофный водоем, автор относит Волховскую губу к эвтрофному типу по состоянию донной фауны. Анализ сезонных и межгодовых колебаний численности и биомассы макрозообентоса на ст. 1 за период 1994–2019 гг. показал большую вариабельность количественных показателей (рис. 9.7.2). Причем амплитуды этих колебаний вполне сравнимы с величинами, отражающими неоднородность пространственного распределения макробентоса в южной части озера. Так, в августе за весь период исследований самые низкие биомассы (1,52 г/м²) наблюдались в 2009 г., однако уже 2012 г. величина биомассы выросла до 17,17 г/м², в 2013 г. – до 27,46 г/м², в 2015 г. – не превышала 6,44 г/м², а в 2019 г. – снизилась до 1,88 г/м².

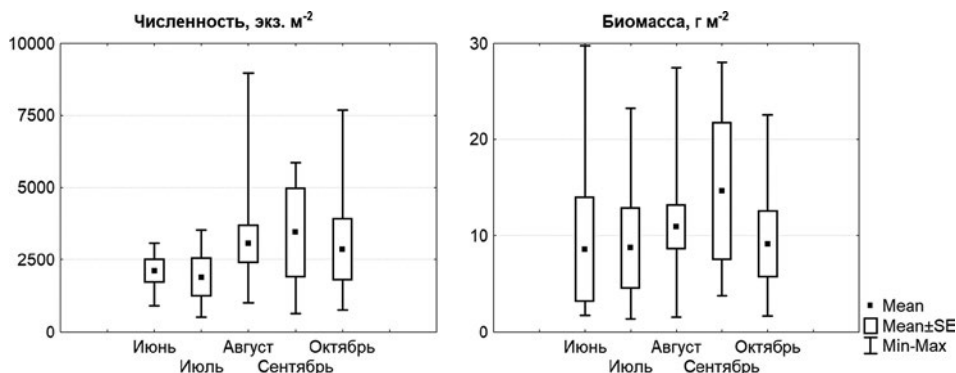


Рис. 9.7.2 – Сезонные изменения численности и биомассы макрозообентоса на ст. 1 в Волховской губе за период 1994–2019 гг.

Тенденцию снижения уровня развития бентоса в южной части озера с 2000 г. также отмечали сотрудники ГосНИОРХа [Суслопарова и др., 2017], что связывали с вероятным снижением биогенной нагрузки на этот район озера, а также комплексом гидрометеорологических условий каждого года. Возможно также, что причиной снижения количественных показателей макрозообентоса и его успешного воспроизводства является загрязнение озера.

В Свирской губе количественные показатели низки (40–1300 экз./м²; 0,18–0,84 г/м²). Биомассу бентоса определяли олигохеты (56%), хирономиды (28%) и моллюски (8%). Изменения видового состава бентоса и его количественные характеристики в этом заливе находились в пределах незначительных межгодовых колебаний.

В открытых районах озера большое значение имеют амфиподы, которые в 2013–2019 гг. были представлены реликтовыми ракообразными *Monoporeia affinis*, *Pallaseopsis quadrispinosa* (Sars), а также байкальскими вселенцами *Gmelinoides fasciatus* Stebbing и *Micruropus possolskii*. Первый из них был более массовым. Встречаемость реликтовых видов *M. affinis*, *P. quadrispinosa* за исследуемый период составила 57 и 16% соответственно. Бокоплав *M. affinis* встречался на глубинах от 5 до 135 м, где его количественные показатели изменялись в широких пределах – численность от 20 до 1940 экз./м² биомасса – от 0,01 до 8,86 г/м². Рачок *P. quadrispinosa* регистрировался вдоль западного и восточного берегов, а также в южной открытой части озера на глубинах 9–50 м, его численность варьировала от 20 до 120 экз./м² биомасса – от 0,02 до 2,06 г/м².

Реликтовые ракообразные предпочитают глубины 18–50 м, на которых за период 1994–2012 гг. средняя численность *M. affinis* составляла 1200 ± 163 экз./м² (пределы колебания 20–10720 экз./м²), а биомасса – $3,30 \pm 0,43$ г/м² (0,02–28,56 г/м²). Средняя численность *P. quadrispinosa* равнялась 39 ± 5 экз./м² (20–120 экз./м²), а биомасса – $1,88 \pm 0,64$ г/м² (0,02–12,8 г/м²) [Барбашова, 2015]. В 2013–2019 гг. количественные характеристики реликтовых амфипод в данном диапазоне глубин ниже. Средняя численность *M. affinis* и *P. quadrispinosa* равнялась 197 ± 48 , 36 ± 6 экз./м², а биомасса – $0,66 \pm 0,20$, $0,43 \pm 0,11$ г/м² соответственно. Распределение этих ракообразных имеет динамический характер, изменяясь в течение суток и по сезонам в связи с характерными для них активными миграциями. Межгодовые колебания их количественных показателей могут быть также связаны с внутривидовой конкуренцией за пищу, действием механизма плотностной регуляции, а также взаимодействиями с другими организмами. На данном этапе исследования не совсем ясно, чем вызвано снижение уровня развития реликтовых амфипод. Возможно, это может быть напрямую связано с исчезновением скоплений диапаузирующих циклопов, которые входят в рацион питания амфипод. Примерно с 2007 г. в озере наблюдалось прекращение образования скоплений диапаузирующих копеподитов планктонных циклопов в донных биотопах профундали, что, вероятно, существенно снизило трофические ресурсы для макрозообентоса, прежде всего для амфипод [Курашов и др., 2018а] соответственно. Распределение этих ракообразных имеет динамический характер, изменяясь в течение суток и по сезонам в связи с характерными для них активными миграциями. Межгодовые колебания их количественных показателей могут быть также связаны с внутривидовой конкуренцией за пищу, действием механизма плотностной регуляции, а также взаимодействиями с другими организмами. На данном этапе исследования не совсем ясно, чем вызвано снижение уровня развития реликтовых амфипод. Возможно, это может быть напрямую связано с исчезновением скоплений диапаузирующих циклопов, которые входят в рацион питания амфипод. Примерно с 2007 г. в озере наблюдалось прекращение образования скоплений диапаузирующих копеподитов планктонных циклопов в донных биотопах профундали, что, вероятно, существенно снизило трофические ресурсы для макрозообентоса, прежде всего для амфипод [Курашов и др., 2018а].

Вселенец *G. fasciatus* встречался только в центральной части бухты Петрокрепость (глубины 5–7 м), где его численность изменялась от 20 до 680 экз./м², биомасса – от 0,02 до 0,72 г/м². При этом в литоральной зоне он является доминирующим видом во многих биотопах, где его биомасса достигает значительных величин [Литоральная..., 2011]. Данные о втором байкальском вселенце *M. possolskii* представлены выше.

В целом можно отметить, что для пространственного распределения макробентоса в открытых районах озера характерны следующие особенности. С увеличением глубины снижается видовое разнообразие, упрощается структура донных биоценозов, в их составе увеличивается доля малоцетинковых червей (рис. 9.7.3).

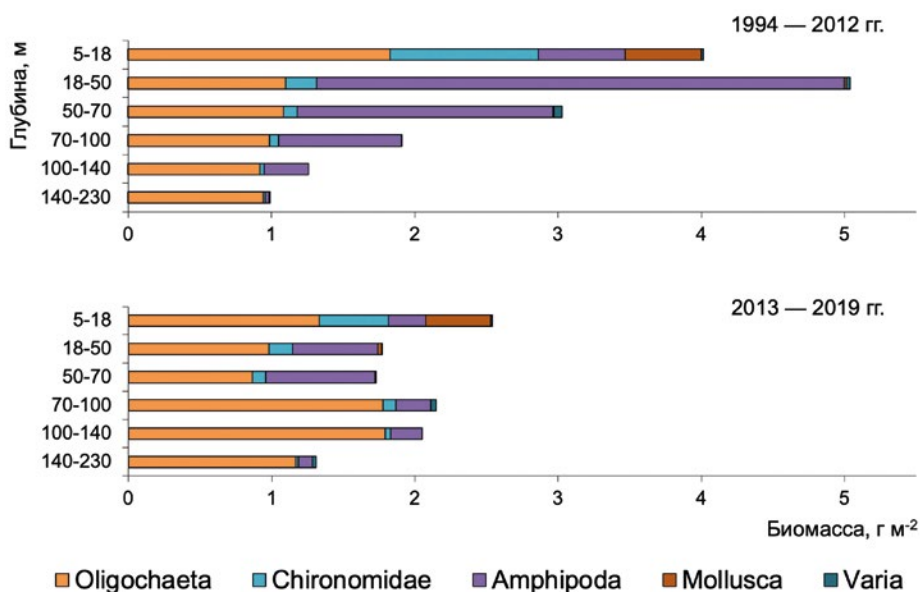


Рис. 9.7.3 – Распределение биомассы (усредненные данные) макрозообентоса и его основных групп по глубинам в различные временные периоды

Сравнение данных за два периода исследования показало снижение количественных показателей макрозообентоса в 2013–2019 гг. в склоновом (глубины 50–70), переходном (18–50 м) и мелководном (0–18 м) районах озера. Особенно сильно это проявилось в переходном районе. В 1994–2012 гг. здесь наблюдался наиболее высокий уровень развития макрозообентоса, что было связано с массовым развитием реликтовых амфипод, прежде всего *M. affinis*. На долю амфипод в среднем приходилось 59% численности и 73% биомассы донных беспозвоночных. В 2013–2019 гг. их доля снизилась до 17 и 23% соответственно.

Таким образом, разнообразие природных условий в различных частях акватории озера и антропогенные нагрузки на отдельные районы определяют значительную изменчивость количественных характеристик макрозообентоса. Результаты исследования 2013–2019 гг. показали, что в профунда-

ли озера видовой состав донных биоценозов, их доминирующий комплекс, соотношение основных групп остаются достаточно стабильными. Наблюдаемые вариации обусловлены особенностями донных отложений конкретных биотопов. При этом отмечается тенденция увеличения средних значений биомассы в северной глубоководной зоне и снижения этих показателей в южной части озера. Небольшой уровень развития зообентоса на глубинах 18–50 м связан с уменьшением доли реликтовых амфипод в составе донных биоценозов. Макрозообентос южных мелководных заливов характеризуется высокой пространственной и межгодовой изменчивостью видового состава, структуры донных сообществ и их количественных показателей.

9.8 Мейозообентос

Мейобентос, как пресноводный, так и морской [Шереметевский, 1987], является естественно-экологическим объединением определенных систематических групп организмов, которые выработали в процессе эволюции сравнительно небольшие размеры и массу и занимают определенные экологические ниши в донных биоценозах, часто играя в них весьма специфическую роль [Курашов, 2007а]. Подтверждение этому находится в различиях распределения макро- и мейобентоса, которые в пространственной мозаике образуют структурные единицы, не зависящие друг от друга [Козловский и др., 2019].

Пресноводный мейобентос по своему составу чрезвычайно разнообразен, хотя высшие таксоны беспозвоночных представлены в нем не в таком количестве, как в морском мейобентосе [Курашов, 2007а]. Изученность пресноводных экосистем относительно донной мейофауны, в целом, недостаточна. Трудность заключается в том, что в состав мейобентоса входят некоторые достаточно сложные для таксономического определения группы организмов, и из всех пресноводных сообществ гидробионтов методология изучения мейобентоса наиболее трудоемка. Поэтому мейобентос многих пресноводных водоемов целых географических регионов из-за нехватки специалистов продолжает оставаться неизученным или слабо изученным. Системное изучение мейобентоса Ладожского оз. проводится с 1983 г. [Курашов, 1994]. За 37-летний период накоплен большой материал по состоянию мейофауны разных частей озера.

Целью исследований мейобентоса является оценка состава и развития этого важного компонента экосистемы Ладожского оз. и выявление особенностей его изменений под воздействием природных и антропогенных факторов.

Для Ладожского оз. к настоящему времени известно об обитании в нем 324 видов и форм мейозообентоса [Курашов и др., 2013], однако некоторые таксономические группы по указанной выше причине недостаточно изучены, что дает основания предполагать, что видовой состав мейобентоса более широк. Все виды и формы мейобентоса Ладожского оз. относятся к восемнадцати систематическим группам: Nematoda, Oligochaeta, Turbellaria, Tardigrada, Bivalvia, Gastropoda, Rotatoria, Gasrotricha (классы), Ostracoda (подкласс), Cladocera, Cyclopoida, Harpacticoida, Acari, Trichoptera, Ephemeroptera, Plecoptera (отряды), Chironomidae, Ceratopogonidae (семейства).

Показатели количественного развития мейзообентоса в различных зонах котловины Ладожского оз. неодинаковы, так же как и его структура. От мелководного района к зонам с максимальными глубинами наблюдается постепенное снижение его общей численности и биомассы (рис. 9.8.1).

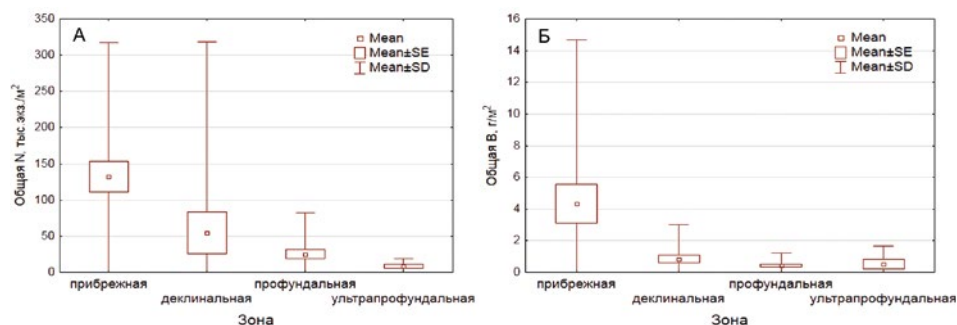


Рис. 9.8.1 – Средние значения количественных показателей мейобентоса (А – численности, Б – биомассы) в разных зонах Ладожского оз. за период с 2003 по 2020 г.

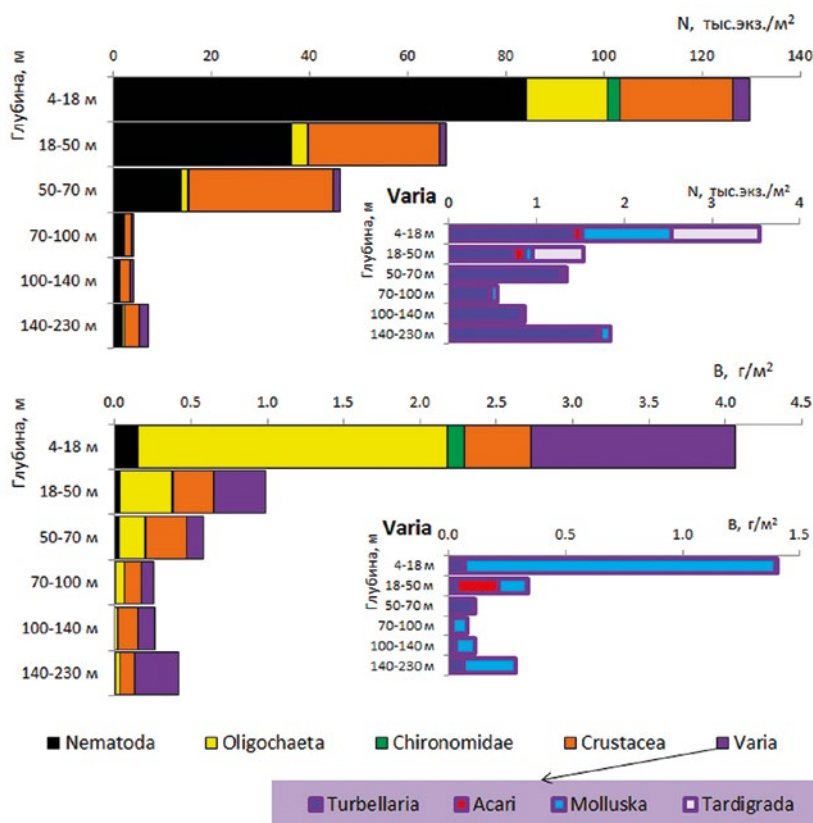


Рис. 9.8.2 – Изменение соотношения и количественного развития различных групп мейзообентоса с ростом глубины (усредненные данные по станциям, расположенным в пределах глубин от 6 до 210 м, за 2003–2020 гг.)

Имеются некоторые общие закономерности изменений в структуре мейобентосного сообщества в разных зонах. По мере роста глубины уменьшается доля олигохет и амфибиотических видов, в первую очередь хирономид (рис. 9.8.2). В группе ракообразные (Crustacea) с глубиной наблюдается снижение роли гарпактицид, тогда как доля циклопов и остракод возрастает. Среди прочих групп, начиная с глубин более 50 м (т. е. в зонах озерного уступа, склоновом и глубоководном), отмечается выпадение из состава мейобентоса тардиград, которые относятся к интерстициальным формам и не приспособлены к существованию на мягких мелкозернистых алевроитовых и пелитовых грунтах, которыми сложено дно этих зон (рис. 9.8.2: *Varia*). Напротив, на этих глубинах увеличивается количественное развитие турбеллярий и их доминирование в структуре сообщества.

В морфологии котловины Ладожского оз. выделяется северный район озера, относящийся к геологическим структурам Балтийского щита, южная часть которого лежит на стыке с Русской платформой. Особенностью этого района является выраженная неравномерность рельефа дна и наличие больших глубин, максимальных для всего озера. Мозаичность распределения биотопов, связанная с резкими изменениями градиентов глубин, определяет специфику пространственной структуры мейобентоса и различия его количественных характеристик на разных глубинах. В результате проведенных в 2019 году съемок на 77 станциях открытой акватории этой части озера было оценено изменение численности и биомассы мейозообентоса в зависимости от локализации участка и смены глубин от 8 до 181 м (рис. 9.8.3). На исследованных станциях в данном диапазоне глубин по составу грунтов 77% составляли алевропелиты, по 8% – глинистые осадки и алевроиты, 7% – пески разной степени крупности.

Было выявлено, что относительно высокими значениями численности и биомассы мейобентоса отличались участки акватории в районе поднятий Валаамско-Салминской островной дуги, а также участок в восточной части Куркийокского залива. Напротив, в районе вблизи города Питкяранта для части акватории (захватывающей как деклинальную, так и профундальную зоны) площадью порядка 300 км² отмечались низкие значения численности и биомассы мейобентоса и обедненная структура сообщества (встречались представители только трех таксонов: циклопы, нематоды и турбеллярии). Вероятно, это связано не с природными факторами, а с негативным влиянием промышленных стоков на донную биоту. Многолетние исследования на мониторинговой станции в деклинальной зоне недалеко от г. Питкяранта подтверждают это предположение: в течение всего периода исследований показатели развития мейофауны здесь гораздо ниже, чем на других станциях с аналогичными глубинами.

Сопоставление структуры мейобентоса с типом грунта показало наличие определенной зависимости между ними (рис. 9.8.4). Было выявлено, что с уменьшением размеров крупности частиц грунта (переход от песчаных к пелитовым и глинистым грунтам) увеличивается доля циклопов и снижается доля гарпактицид. Остракоды также предпочитают мелкоразмерные донные осадки, однако для них существенна степень консолидированности грунтов. Представителей этого подкласса ракообразных достаточно много на рыхлых пелитах, однако на плотных глинах они не встречаются.

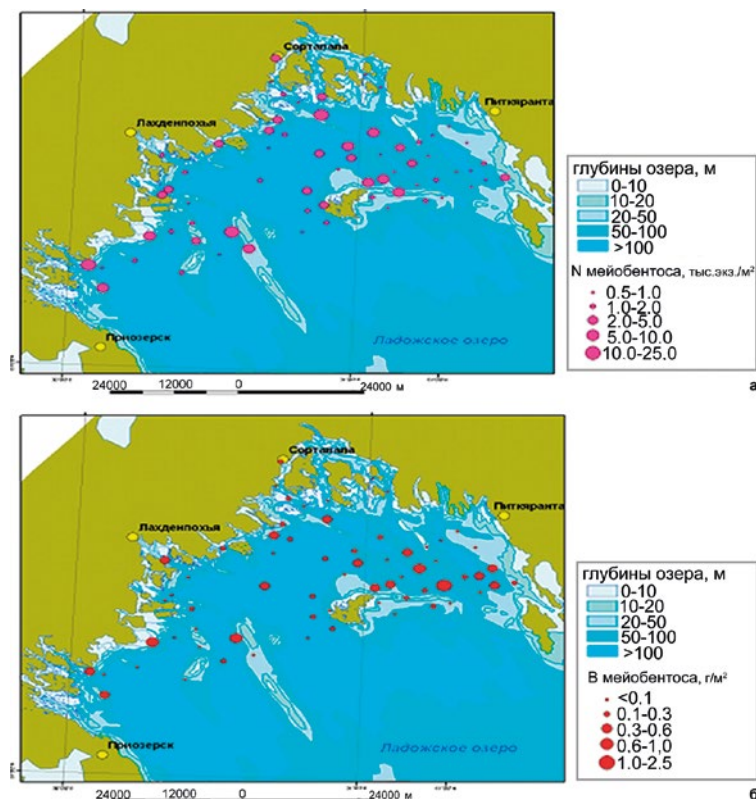


Рис. 9.8.3 – Пространственные изменения численности и биомассы мейобентоса северной глубоководной части Ладожского оз. в зависимости от рельефа дна (съемка 2019 г.)

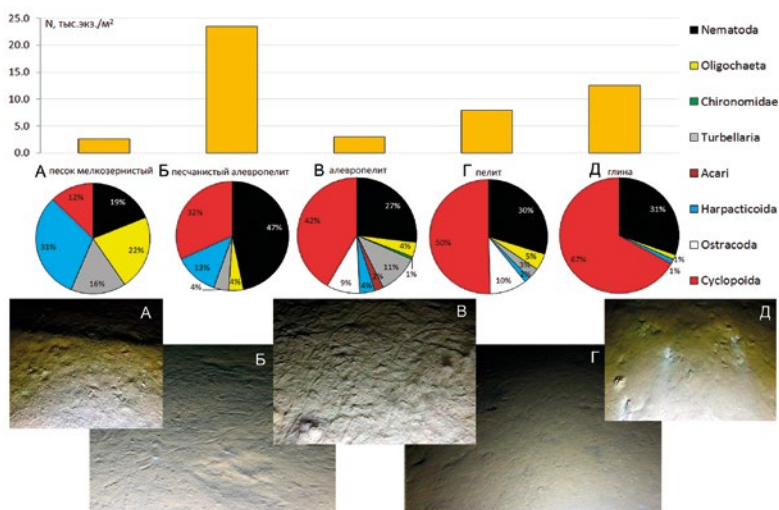


Рис. 9.8.4 – Изменение структуры мейобентосного сообщества на разных типах грунтов глубоководной зоны. Фотографии поверхности дна с разными типами донных осадков получены при съемках с ТНПА Limnoscout

Как показано выше, мейобентос играет очень большую роль в литоральной зоне озера, более того, литоральный мейобентос попадает в зону наибольшей значимости в составе тотального бентоса (макро- и мейобентоса суммарно) [Курашов, 1986]. Учет макробентоса в мейобентосных пробах всей акватории Ладожского оз. за период с 2006 по 2020 г. и расчет соотношений $N_{\text{мейобентоса}}/N_{\text{макробентоса}}$ и $B_{\text{мейобентоса}}/B_{\text{макробентоса}}$ в целом подтверждает эту зависимость (табл. 9.9.1). Несколько выше значимость мейобентоса по развитию биомассы только в деklinальной зоне. Возможно, более различимый крупный макрозообентос интенсивнее выедается придонными видами рыб, чье присутствие в деklinальной зоне, согласно данным наших видеонаблюдений с телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (ТНПА) Limnoscout [Дудакова и др., 2018], отличается высокой интенсивностью и стабильностью по сравнению с прибрежной зоной.

Таблица 9.8.1

Значимость мейобентоса в бентосных сообществах разных зон Ладожского оз. по результатам исследования за период с 2006 по 2020 г.

Зона	$N_{\text{мейобентоса}}/N_{\text{макробентоса}}$	$B_{\text{мейобентоса}}/B_{\text{макробентоса}}$
прибрежная	18,38±3,78	0,45±0,17
в т. ч. литоральная	15,41±4,19	0,54±0,17
деklinальная	7,59±1,03	1,48±1,17
профундальная	2,42±0,78	0,20±0,07
ультрапрофундальная	1,25±0,25	0,02±0,001

Таблица 9.8.2

Средние показатели численности (N, тыс. экз./м²) и биомассы (B, г/м²) основных групп и всего мейобентоса в ассоциациях с преобладанием тростника в 1990, 2006 и 2014 гг. (июль – август)

Группа	1990		2006		2014	
	N	B	N	B	N	B
Nematoda	30,23±8,15	0,04±0,01	133,53±37,44	0,30±0,14	91,63±28,25	0,20 ±0,12
Harpacticoida	14,28±4,45	0,36±0,05	8,29±1,94	0,11±0,04	19,63±7,80	0,26±0,08
Ostracoda	6,05±1,73	0,25±0,07	3,58±1,250	0,22±124	3,76±1720	0,20±0,09
Oligochaeta	5,03±1,12	1,57±0,36	8,38±2,60	5,76±2,43	18,80±6940	5,73±2,14
Chironomidae	6,45±1,24	0,39±0,06	8,38±4,50	0,31±0,09	9,41±3190	0,44±0,15
Cladocera	6,76±1,33	0,25±0,07	28,84±14,41	0,37±0,16	10,53±3330	0,87±0,71
Cyclopoida	7,03±2460	0,32±0,08	4,56±2,52	0,07±0,03	3,17±790	0,13 ±0,05
Turbellaria	2280±0,48	0,10±0,02	1,51±0,59	0,02±0,01	0,93±360	0,05±0,02
Acari	0,84±0,16	0,04±0,01	0,47±0,23	0,02±0,01	0,16±80	0,01±0,008
Mollusca	1,68±0,66	1,33±0,52	2,64±0,73	2,84±0,86	1,81±420	2183±735
Весь мейобентос	87,35±9,21	4,95±0,51	211,38±58,58	10,83±3,13	161,55±45,94	10,22±2,76

Литоральная зона является экотон — районом, располагающимся на границе наземных и водных природных комплексов. Характерной особенностью любых экотонов являются наиболее интенсивно протекающие биологические и химические процессы, вызывающие формирование очень высоких биоразнообразия и биопродуктивности [Распопов и др., 1998]. Так, результаты исследований песчаных и илисто-песчаных биотопов зарослевой мелководной литорали (глубины менее 1 м) с преобладанием тростника показывают, что в период, по крайней мере, с 2006 г. средние значения численности и биомассы сообщества в этой зоне превышают эти показатели для всех остальных зон озера. Более того, в последние десятилетия наблюдается увеличение количественных характеристик мейофауны ладожской литорали по сравнению с 90-ми годами прошлого века (табл. 9.8.2). Эта зона характеризуется максимальным видовым богатством: на изученных станциях отмечено присутствие более 228 видов [Литоральная зона..., 2011].

На формирование биотопической (ландшафтной низшего уровня) структуры в литоральных мелководьях оказывают большое влияние особенности геологического строения разных частей озера, что определяет различия в пространственной организации мейобентосного сообщества. Дно южного района и некоторые межкостровные участки восточного берега отличаются слабыми уклонами и, соответственно, пологим профилем, способствующим формированию условий для разрастания воздушно-водных макрофитов на больших площадях. Состав донных осадков в зарослях тростника, ассоциации которого наиболее распространены в литорали Ладожского оз., по мере удаления от береговой линии и роста глубины меняется от плотных задернованных грунтов, грунтов с большим количеством органических остатков (детрита), к песчаным и алевритовым с небольшим содержанием органики на краевых участках зарослей. В некоторых случаях дно на некотором расстоянии от берега может быть сформировано плотными скоплениями отмирающих стволов тростника (затонувшая часть сплавней), что формирует совершенно специфический биотоп. Примером такого типа заросшей литорали является участок в северо-восточной части острова Лункулансаари (рис. 9.8.5: Полигон 21), где заросли тростника формируют пояс шириной до сотни метров.

Картирование распределения и мощности детритно-органической фракции в составе донных осадков (рис. 9.8.6, Б) показало, что максимум ее содержания в грунте был на участке, примыкавшем к береговой линии, доминирующим видом макрофитов в которых был ирис ложноаировый (*Iris pseudacorus* L.). Высоким процентом содержания детрита отличался участок с доминированием тростника, тогда как относительно свободные от растений участки («окна» в тростниковых зарослях) и заросшая полоса литорали у берега с преобладанием горца земноводного (*Persicaria amphibia* L.) включали меньше детритной фракции, донный осадок содержал в основном неорганические минеральные компоненты. Еще меньше органики было ближе к краевой части зарослей и на открытых грунтах больших глубин далее по профилю от береговой линии. Крупность минеральной части грунта с глубиной снижалась. Однако максимальное накопление алевритовых грунтов (самых мелкозернистых донных осадков из представленных на исследованном полигоне) отмечено на поверхности песчаной косы,

сформированной за счет гидродинамических процессов в центральной части зоны тростников (рис. 9.8.6, Б: 13).

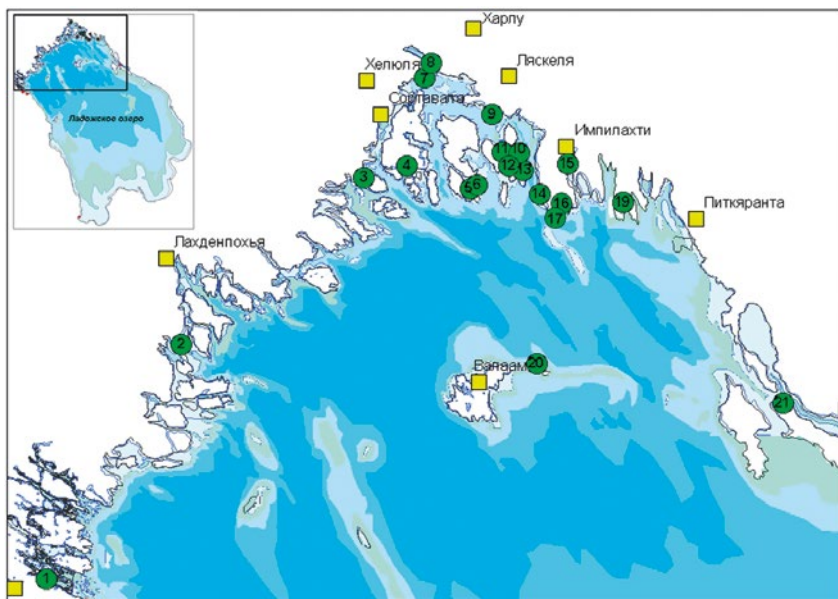


Рис. 9.8.5 – Схема размещения полигонов исследования мейобентоса скалистой литорали и о. Лункулансаари Ладожского оз. в 2013–2018 гг. Полигоны слева направо: 1 – Лехмалахти, 2 – Лумиваара, 3 – Хавус, 4 – Тулолансаари, 5 – Оръятсаари, 6 – Пиени Сартосаари, 7 – Кирьяванлахти 1, 8 – Кирьяванлахти 2, 9 – Хийденсельга, 10 – Карпансаари, 11 – Мякисло, 12 – Пелотсаари, 13 – Хунукка 18, 14 – Ристисаари, 15 – Ристисаари 2, 16 – Хунукка 2, 17 – Хунукка 3, 19 – Сюскюянсаари, 20 – Коуккусаари; 21 – Лункулансаари

Особенности распределения абиотических компонентов по профилю данной зарослевой зоны влияли на величины численности и биомассы мейобентоса, его структуру и видовое богатство (рис. 9.8.6, А). Вся площадь литорали, занятая макрофитами, характеризовалась очень низким развитием нематодного сообщества, тогда как на открытых песчаных грунтах их количественные характеристики и доля нематод в структуре численности были относительно высокими. Обратная ситуация наблюдалась для хириноид.

Рассмотрение изменения структуры доминантного комплекса мейобентоса (рис. 9.8.5, Б) позволяет выделить три зоны, различающиеся по составу мейофауны. Первая представлена максимальным числом таксонов бентоса, наиболее богата видами и имеет наиболее высокие значения численности и биомассы. Биотоп – пески с относительно высоким содержанием детрита или полностью задернованные с зарослями ириса, горца или незаросшие на глубинах (в многоводный год) от 0 до 0,5 м. В составе доминантного комплекса выделяются циклопы видов *Mesocyclops leuckarti* (Claus) и *Paracyclops fimbriatus* (Fischer) и хищные олигохеты *Chaetogaster langi* Bretscher. Вторая зона лежит в зарослях тростника до поднятия, образованного подводной косой, в диапазоне глубин от 0,6 до 1,2–1,4 м, выделяется невысокими количественными характеристиками развития мейо-

бентоса. Маркирующими видами выступают остракоды *Cypridopsis vidua* (O. F. Müller) Brady и ветвистоусые рачки *Monospilus dispar* Sars. Третья зона начинается с глубин более 1,3 м и лежит в краевой части зарослей и далее простирается на открытое песчаное дно. Распределение мейобентоса в этой зоне было изучено до глубин 2,3 м. Можно предположить, что мейобентос склона, сменяющего далее изученную пологую часть литорали, отличен от третьей и предлежащих ей зон. Численность и биомасса мейозобентоса в третьей зоне были относительно высокими, однако в таксономическом отношении она была беднее двух прибрежных зон. В составе доминантного комплекса начинают преобладать виды олигохеты семейств Enchytraeidae и Tubificidae и гарпактициды вида *Attheyella crassa* (G. O. Sars).

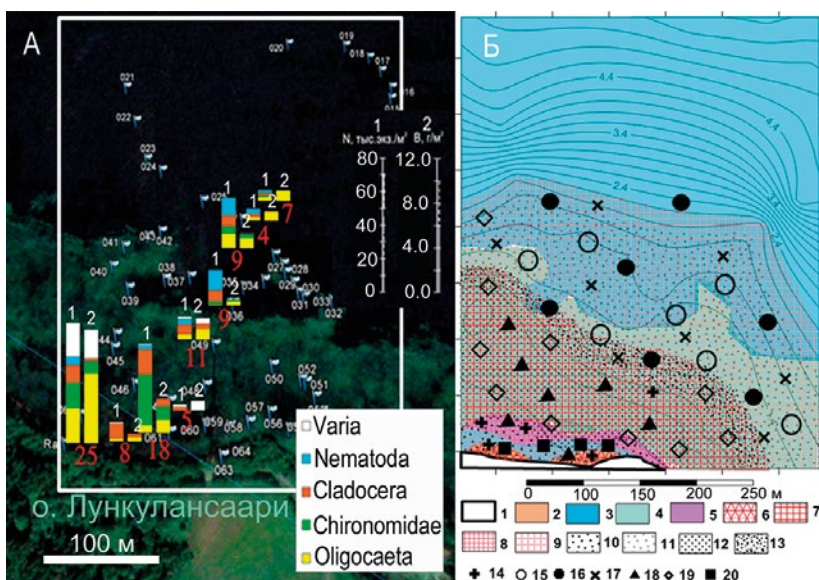


Рис. 9.8.6 – Распределение численности и биомассы мейобентоса на полигоне в районе зарослевой литорали о. Лункулансаари (А) и карта распределения растительности, детрита, мелкой фракции грунта и доминантных видов мейобентоса на этом участке (Б): А – 1 – численность мейобентоса, 2 – биомасса мейобентоса, красные арабские цифры – число видов мейобентоса в точке; Б – 1 – берег; 3 – открытые участки; макрофиты-доминанты локального участка: 2 – *I. pseudacorus* L.; 4 – *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.; 5 – *P. amphibia*; Содержание детритной фракции: 6 – вся проба; 7 – очень много; 8 – много; 9 – мало; Содержание алевритовой (размер частиц менее 100 мкм): 10–0–1%; 11–1,1–2%; 12–5–10%; 13–70–80%; доминантные виды мейобентоса: 14 – *C. langi*; 15 – Enchytraeidae; 16 – Tubificidae; 17 – *A. crassa*, 18 – *M. dispar*, 19 – *C. vidua*, 20 – *M. leuckarti* + *P. fimbriatus*

Южные мелководные бухты Ладожского оз. характеризуются также площадными зарастаниями погруженной растительностью с плавающими листьями (из группы гидатофитов), среди которых частым доминантом является рдест пронзеннолистный (*Potamogeton perfoliatus* L.). Этот вид макрофитов и особенности его пространственного распределения также оказывает влияние на развитие мейофауны. Детальное исследование тестового полигона размером 300 на 300 м, с зоной покрытия зарослями рдеста 60%, проводи-

лось нами в период с 2010 по 2014 г. в районе пос. Кошкино в бухте Петрокрепость (рис. 9.9.7). Помимо рдеста, на полигоне выделялось еще четыре типа биотопов: прибрежные тростники (5% от площади полигона), открытый песчаный пляж (10%); ассоциация ежеголовника *Sparganium simplex* L., стрелолиста *Sagittaria sagitifolia* L. и водяного мха *Fontinalis antipyretica* L., доминантом в которой являлся ежеголовник (5%) и открытый песок в районе фарватера (20%). Уклон дна на данном участке акватории до искусственно созданного кошкинского фарватера был незначительным; по профилю глубины изменялись в диапазоне от 0 до 2,5 м. С трехметровой глубины (склон фарватера) наблюдался резкий спад глубины. В пределах зоны за двухметровой изобатой структура донного ландшафта неоднородна. Если на участке за зоной рдеста последний продолжает оказывать влияние на структуру грунта, и здесь еще встречаются сильно разряженные островки развития макрофитов этого вида, то с началом резкого спада глубины ситуация меняется. На склоне встречено три типа грунта с донными осадками разной степени крупности. Максимальная площадь в этой зоне (до 60%) была покрыта чистым песком; до 20% дна было занято скоплениями камней, и столько же занимали грунты, представляющие собой заиленный песок.

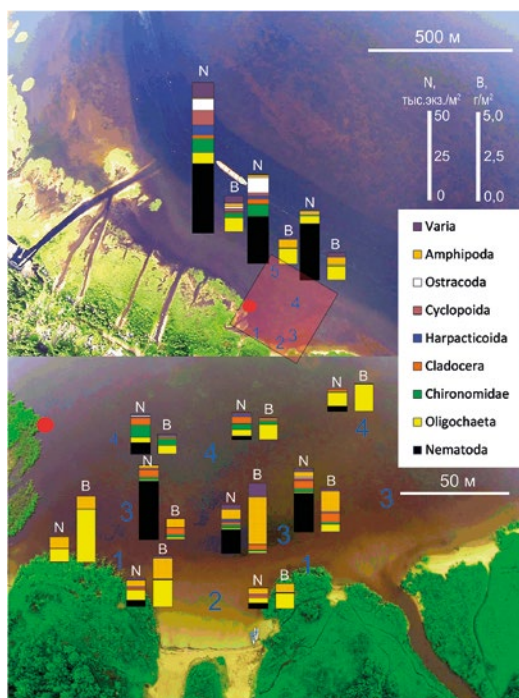


Рис. 9.8.7 – Распределение численности и биомассы мейобентоса на полигоне в районе пос. Кошкино в бухте Петрокрепость с учетом биотопов, формирующих структуру донного ландшафта акватории. На верхнем снимке приведено расположение исследуемого полигона относительно кошкинского фарватера в бухте Петрокрепость; нижний снимок: 1 – зона тростников; 2 – пляж; 3 – ассоциация ежеголовника; 4 – заросли рдеста; 5 – открытый песок в районе фарватера; красный кружок маркирует место, с одинаковыми координатами на обоих аэрофотоизображениях

В мейобентосном сообществе на разных типах биотопов проявлялись различия как в структуре, так и в его количественных характеристиках (рис. 9.8.7). Минимальными значениями численности и биомассы мейобентоса выделялись прибрежные заросли тростников на глубинах менее 0,5 м. Наиболее высокими эти показатели были в зоне открытых песков фарватера. Схожая ситуация была с видовым богатством: по мере возрастания глубины число видов увеличивалось с 23 до 28. Структура мейобентоса в разных биотопах также менялась. Если в тростниках по численности и биомассе доминировали олигохеты и амфиподы, в ассоциации ежеголовника – нематоды и амфиподы, то с ростом глубины в рдестах и на открытом песке у фарватера важную роль начинают играть другие группы ракообразных, олигохеты и хирономиды. На песках доминантами по численности выступали нематоды.

Определенные виды маркировали каждый тип биотопов. В самой мелководной части недалеко от береговой линии в тростниках массово встречались олигохеты *C. langi*, циклоп *P. fimbriatus* и была сконцентрирована максимальная плотность амфипод *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing). в зарослях ежеголовника – олигохеты семейства Naididae: *Vejevskyella* sp. и *Nais behningi* Michaelsen. На рдестах маркирующими видами являлись остракоды *Candona caudata* (Kaufmann), *Cytherissa lacustris* (Sars), *Limnocythere inopinata* (Baird), кладоцеры *Alona affinis* (Leydig), хирономиды *Cryptochironomus defectus* Kieffer, гарпактициды *A. crassa*, *Paracampptus schmeili* (Mrazik) и *Nitocra spinipes* Boeck, на песках – хирономиды *Tanytarsus exavatus* Edwards, тардиграды и гарпактициды тех же видов, что и в рдестах.

Специфическими чертами пространственной структуры разных типов мейобентосного сообщества выделяется скальная и каменистая литорали Ладожского оз., которые особенно характерны для района ладожских шхер в северной части озера. В период с 2013 по 2018 г. нами проводилось исследование пространственного распределения мейобентоса в районе скалистых берегов озера [Дудакова, 2019]. Полигонным методом [Дудакова, 2016] было обследовано 20 полигонов в районе ладожских шхер (рис. 9.8.4: полигоны 1–20).

Исследования включали оценку распределения разных типов биотопов и связанных с ними групп мейобентоса по профилю дна от глубин 0,2 до 8 м, то есть всего диапазона глубин литоральной зоны Ладожского оз. Была выявлена характерная для всего шхерного района поясность, включающая в себя контрастные элементы: от пояса скальных монолитов и крупнообломочного до поясов песчаных и алевритовых донных осадков, сменяющих друг друга по профилю (всего 6 поясов) [Дудакова, 2016]. Причем в большинстве случаев уклон дна был достаточно крутой, и ширина всей литоральной зоны в районе скальных берегов не превышала 100 м. Эти масштабы невелики для многих видов мейобентоса, совершающих миграции. При рассмотрении изменения количественных характеристик мейобентоса наибольшими значениями численности мейобентоса выделялись глубины порядка 1,5 м (рис. 9.8.8); это связано с высокой мозаичностью биотопов на этой глубине и, соответственно, высоким разнообразием экологических ниш. Максимальные биомассы характерны для участков с доминированием скальных и каменистых твердых поверхностей (глубины 0–1 м), на которых создаются предпосылки для раз-

вития крупных и массовых видов мейобентоса, предпочитающих водорослевые обрастания, где они находят богатый источник пищевых ресурсов, и активно включающихся в структуру зооперифитонного сообщества. Среди них преобладают олигохеты, личинки амфибиотических насекомых (поденки, ручейники, хирономиды), ракообразные (амфиподы, кладоцеры, остракоды, в некоторых случаях – циклопы) и клещи. Видовое богатство мейзообентоса на скальных и каменистых поверхностях очень велико. Массово встречающимися видами являются: олигохеты *Stylaria lacustris* (Linnaeus), *Vejdovskyella macrochaeta* (Lastockin), *Chaetogaster diaphanus* (Gruithuisen), хирономиды *Corynoneura celeripes* Winnertz, *Cricotopus silvestris* F., *Psectrocladius* sp., кладоцеры *Acroperus harpae* (Baird), *Camptocercus rectirostris* Schödler, *Eurycercus lamellatus* (O.F. Müller), *Monospilus dispar* Sars, *Chydorus* sp., *Alona* sp., остракоды *C. vidua*, *C. lacustris*, *Candona* sp., *Cypria* sp., каляниды *Eudiaptomus gracilis* (Sars), циклопы *M. leuckarti*, *Thermocyclops oithonoides* (Sars), *P. fimbriatus*, *Megacyclops viridis* (Jurine), поденки *Caenis* sp., *Baetis* sp., *Heptagenia* sp., ручейники *Agraylea multipunctata* Curtis.

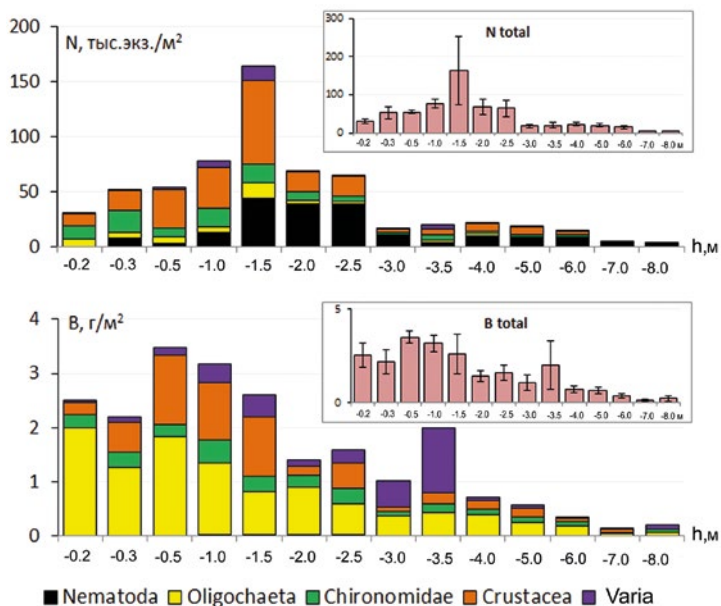


Рис. 9.8.8 – Изменение численности и биомассы разных таксонов мейобентоса по осредненному профилю скальной литорали Ладожского оз. Во врезках – общая численность и биомасса с приведенными планками погрешностей

С ростом глубины и последовательным изменением ландшафтных элементов дна скальной литорали происходили изменения в структуре мейобентосного сообщества. Значимо они проявлялись для таких таксонов мейобентоса, как нематоды, олигохеты, хирономиды и кладоцеры (рис. 9.8.9). Доля нематод по ходу смены по профилю твердых грунтов на мягкие песчаные и алевритовые увеличивалась, тогда как для остальных трех групп происходило обратное.

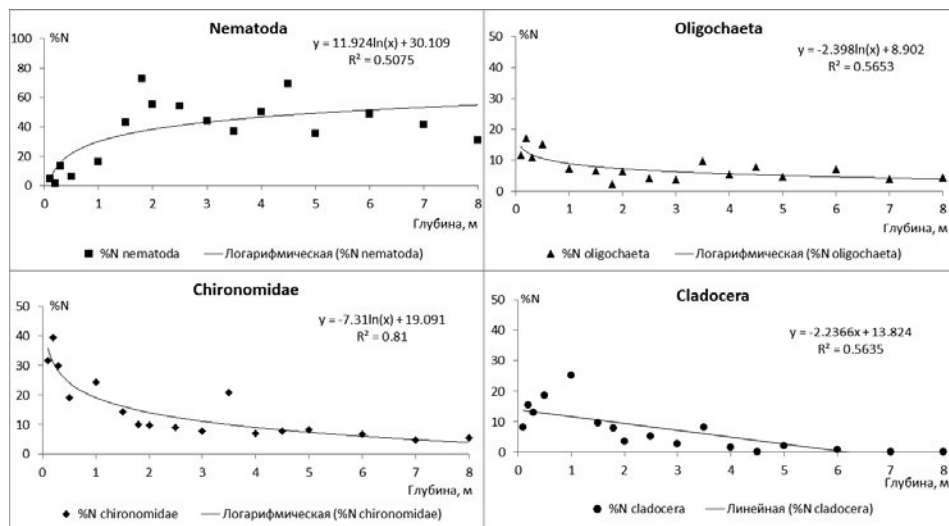


Рис. 9.8.9 – Изменение структуры численности основных таксонов мейобентоса скальной литорали Ладожского оз.

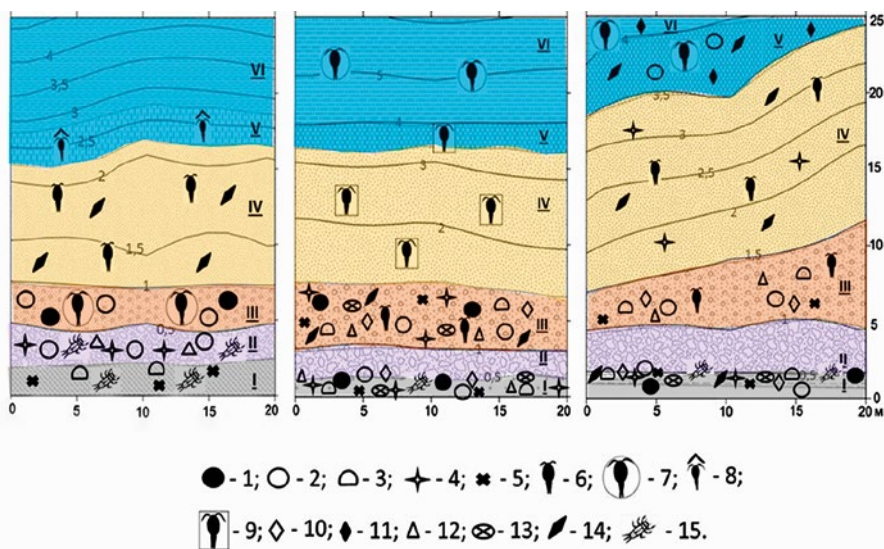


Рис. 9.8.10 – Карта смены доминантных видов мейобентоса в разных поясах (I–VI) трех модельных полигонов северного шхерного района (рис. 9.9.5: полигоны 8, 9, 19): 1 – Tubificidae, 2 – Enchytraeidae, 3 – *Nais barbata* Müller, 4 – Tanytarsinae, 5 – Harpacticoida, 6 – *P. fimbriatus*, 7 – *M. viridis*, 8 – *T. oithonoides*, 9 – *Cyclops* sp., 10 – *C. vidua*, 11 – *L. inopinata*, 12 – *Candona* sp., 13 – *Chydorus sphaericus* (O. F. Müller), 14 – Turbellaria, 15 – Ephemeroptera; по оси ординат – расстояние от береговой линии в глубину водоема, м; по оси абсцисс – расстояние вдоль береговой линии, м

По смене доминантных видов в скалистой литорали шхерного района было выделено пять зон с разными типами мейобентосного сообщества (рис. 9.8.10). На твердых поверхностях в пределах скально-крупнообломоч-

ной зоны развивается специфическое зооперифитонное сообщество, в состав которого входят ряд мейобентосных видов, которые были указаны выше. Маркирующими видами/таксонами зоны последующего валунно-галечного дна являются поденки родов *Caenis*, *Baetis* и *Heptagenia*, хирономиды семейства Tanytarsinae, олигохеты семейства Enchytraeidae, остракоды рода *Candona*. В смешанной гравийно-галечно-песчаной зоне развиваются тубифициды, энхитеиды, циклоп *P. fimbriatus*, гарпактициды разных видов. На песках разной степени крупности следующих за этой зоной происходит изменение доминант на циклопов и турбеллярий. Эти же группы доминируют на алевритистых песках последней зоны, но при этом происходит смена видов.

Таким образом, приведенные примеры позволяют показать, что при рассмотрении численных характеристик развития мейофауны следует учитывать биотопическую (ландшафтную) структуру, которая имеет явные различия в разных частях акватории озера.

При оценках развития мейофауны следует также учитывать, что многие мейобентосные животные (амфиподы, гарпактициды, циклопы, кладоцеры, остракоды, хирономиды, олигохеты) совершают активные суточные миграции, как вертикальные, так и горизонтальные [Дудакова и др., 2015; Дудакова, Родионова, 2012].

Накопленные многолетние данные, в частности по сети стандартных мониторинговых станций в разных зонах озера, позволяют оценить динамику изменений мейобентосного сообщества в экосистеме Ладожского оз. и его современное состояние. Основные черты этих изменений отражены в ряде недавних опубликованных работ [Курашов и др., 2018; Курашов, Дудакова, 2018]. По результатам оценки состояния среды с помощью мейозообентоса в литоральной зоне экологическое состояние оценивается как благоприятное, за исключением некоторых локальных участков. Анализ многолетних данных показывает, что для получения более надежных оценок степени антропогенного воздействия в Ладожском оз. в том или ином районе следует использовать не литоральные, а профундальные сообщества донной мейофауны. В начале постмезотрофного периода (примерно с 2007 г.) состояние экосистемы озера маркируется прекращением образования скоплений диапаузирующих копеподитов планктонных циклопов в донных биотопах профундали и возвращением структуры и количественных показателей мейобентоса к тому, что наблюдалось в олиготрофный период состояния экосистемы озера. Проведенные в последующие годы исследования открытой зоны Ладожского оз. не выявили никаких тенденций ухудшения качества озерной среды. Более того, полученные данные говорят в целом о стабильном состоянии озера и даже об улучшении качества его вод.

Таким образом, показано, что мейозообентос играет важную роль в функционировании экосистемы Ладожского оз., особенно в его прибрежной зоне. Большое биотопическое разнообразие, связанное со сложностью морфометрического строения озерной котловины, формирует различия в количественных и структурных характеристиках мейофауны разных частей и глубинных зон озера. В пределах литоральной зоны мозаика биотопов проявляется наиболее выражено, зависит от рельефа дна, распределения донных осадков и детрита, а также от наличия и состава зарослей высшей

водной растительности. Структура мейобентосного сообщества скальной литорали закономерно изменяется с ростом глубины и последовательным изменением ландшафтных элементов дна. Наиболее значимы изменения для нематод, олигохет, хирономид и кладоцер. Выявлено изменение состава мейобентоса в зависимости от степени крупнозернистости донного осадка для мягких грунтов деклинальной и глубоководных зон. Площадные исследования в открытой акватории озера подтвердили угнетение донной мейофауны в районе г. Питкяранта и позволили оценить масштабы этого негативного воздействия при оценке с помощью мейобентоса в несколько сотен квадратных километров. В остальном, за исключением некоторых локальных проблемных зон в акватории Ладожского озера, мейобентос указывает на стабильное благоприятное состояние водоема.

9.9 Развитие инвазионного процесса в Ладожском озере в условиях изменяющегося климата

Виды-вселенцы стали одним из основных компонентов экосистемы Ладожского оз. [Курашов и др., 2012; 2018]. Наибольшее значение имеют чужеродные виды в пределах литоральной зоны, наиболее динамичной и продуктивной части озера. При этом с течением времени следует ожидать только интенсификации биологического загрязнения водоема и, следовательно, увеличения роли видов-вселенцев в процессах, протекающих в экосистеме водоема. Это происходит по целому ряду причин, важнейшими из которых являются действие антропогенного фактора и климатические изменения, приводящие к увеличению температуры воды, прежде всего, как раз в прибрежной зоне озера. Имеющиеся метеорологические данные [Менжулин, 2013] позволяют говорить об этом вполне определенно. А ведь именно низкие температура и минерализация были основными факторами, препятствующими проникновению в озеро чужеродных видов.

Несмотря на небольшое общее число присутствующих чужеродных видов в Ладоге в настоящее время, последствия функционирования их популяций достаточно значимы. Наибольшую роль в трансформации экосистемы озера, особенно в литорали, играют, прежде всего, ракообразные, среди которых первое место принадлежит амфиподам.

Амфиподы – одни из самых активных видов-вселенцев, расселяющиеся в современных условиях за пределы своих естественных ареалов [Arbačiauskas, 2002; Berezina et al., 2007; Grabowski et al., 2007]. Важнейшей причиной распространения ракообразных послужило устранение естественных барьеров между различными водными бассейнами Европы в XIX и XX веках. Большинство амфипод проникло в бассейн Балтийского моря из бассейнов р. Волги и южных морей после создания каналов, сооружения водохранилищ и дренажных систем или формирования так называемых водных инвазионных «коридоров» [Биологические..., 2004]. В расселении беспозвоночных заметную роль также играли водный транспорт (судоходство) и намеренный или случайный занос видов в процессе планомерной акклиматизации хозяйственно полезных видов [Николаев, 1979].

Первым по времени проникновения в водоем (начало 80-х годов XX века) и по степени воздействия на экосистему озера является байкальский вселенец *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing), последствия инвазии которого достаточно хорошо уже изучены и описаны [Курашов и др., 2012; 2018]. Этот вид наиболее широко представлен в озере (встречаемость 94%). По данным литорального рейса, проведенного в 2014 г., с отбором проб по всему периметру Ладожского оз. (рис. 8.3) его численность варьировала от 8 до 19360 экз./м², биомасса – от 0,032 до 55,792 г/м². Средние значения численности и биомассы *G. fasciatus* равнялись 3572±861 экз./м² и 7,86±2,15 г/м² соответственно. Максимальные количественные показатели *G. fasciatus* наблюдались в южной части озера в бухте Петрокрепость. Несмотря на то что *G. fasciatus* является доминирующим видом на многих биотопах литоральной зоны озера, он не был обнаружен в восточной части озера в заливе Уксунлахти и в шхерном районе озера у мыса Умоппиуми.

Вслед за *G. fasciatus* в озеро проникли понто-каспийские амфиподы *Pontogammarus robustoides* (Sars), *Chelicorophium curvispinum* (Sars), зона обитания которых ограничивается Волховской губой. Однако здесь они существенно потеснили гмелиноидеса, их численность и биомасса, а также роль в процессах трансформации вещества и энергии в литоральной зоне весьма значительны. Массовое развитие *P. robustoides* наблюдалось в Волховской губе. Плотность популяции и биомасса этого вселенца в 2014 г. (2576–11240 экз./м², 35,71–82,56 г/м²) были высоки. Сходное с *P. robustoides* распространение на литорали озера имел и *C. curvispinum*. Его численность варьировала от 13 до 11640 экз./м², а биомасса – от 0,01 до 12,21 г/м². Максимальная биомасса *P. robustoides* зафиксирована в приустьевом участке р. Сясь, а *C. curvispinum* в 4 км от устья р. Волхов. В Волховской губе отмечено наибольшее разнообразие вселенцев, встречено 3 три вида (*G. fasciatus*, *P. robustoides* и *C. curvispinum*). Преобладал бокоплав *P. robustoides*. Его вклад в биомассу амфипод составил 48,07–99,54%. Доля *C. curvispinum* равнялась 0,02–16,43%, а *G. fasciatus* – 0,28–35,50% (рис. 10.3.2). Это свидетельствует о том, что *P. robustoides* нашел для себя в Волховской губе благоприятные для обитания условия среды (более высокая минерализация воды и прогреваемость этого района озера).

Зона устойчивого расселения понто-каспийского вида *C. curvispinum* ограничена границами Волховской губы, где он был впервые обнаружен в 2009 г. Количественные показатели развития популяции амфипод *C. curvispinum* в 2014 г. довольно высоки, но значительно ниже, чем у *P. robustoides* (табл. 9.9.1). *C. curvispinum* относится к фильтраторам-сидиментаторам, но способен потреблять также детрит и обрастания, включая нитчатые водоросли. *C. curvispinum* строит илестые домики на твердом субстрате, поэтому в Ладожском оз. часто встречается на стеблях макрофитов и на затопленных предметах. Являясь видом эдификатором, при больших скоплениях эти рачки способны влиять на состав бентосных сообществ, меняя рельеф дна из-за строительства сети трубочек из ила и детрита на твердых субстратах [Малявин и др., 2008]. В целом можно отметить тенденцию роста количественных показателей развития видов понто-каспийских амфипод в Волховской губе (табл. 9.9.1).

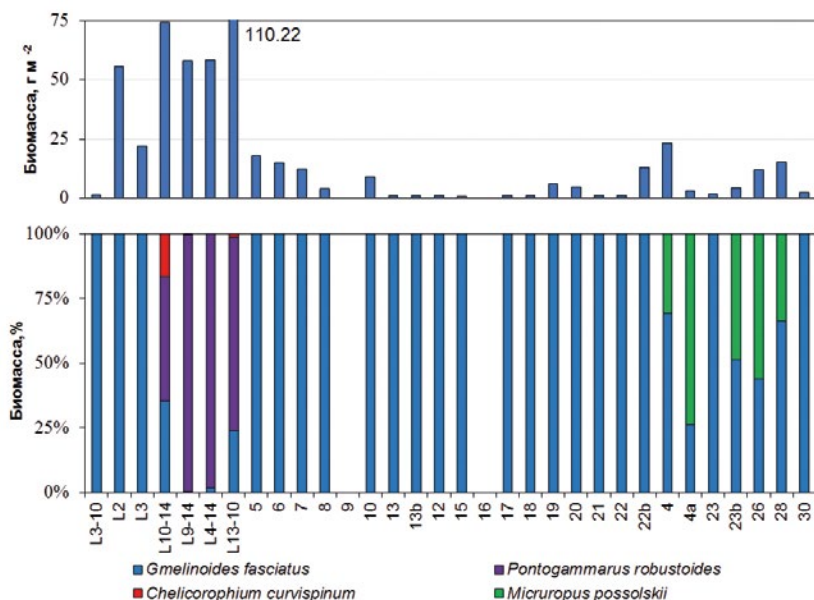


Рис. 9.9.1 – Количественные характеристики амфипод и соотношение чужеродных видов амфипод на исследованных станциях литоральной зоны Ладожского озера (июль – август 2014 г.)

Таблица 9.9.1

Показатели минимальных и максимальных значений численности (N, экз. м⁻²) и биомассы (B, г/м²) понто-каспийских амфипод и их доли (%) в составе амфипод в Волховской губе в разные годы

Год		<i>Pontogammarus robustoides</i>		<i>Chelicorophium curvispinum</i>	
		min – max	min – max (%)	min – max	min – max (%)
2006	N	24	4,11	*	*
	B	0,864	37,24		
2009	N	736–1312	11,04–95,35	56–1480	4,07–54,49
	B	3,088–14,47	15,74–98,96	0,13–1,60	0,88–26,99
2010	N	8–776	2,86–100	72	0,81
	B	0,04–8,22	26,47–100	0,096	0,49
2011	N	8–2376	0,19–75,77	16–1896	0,08–31,18
	B	0,152–25,70	6,74–91,56	0,02–3,06	0,18–11,09
2012	N	64–5176	0,16–44,96	304–6248	0,68–54,60
	B	1,76–38,18	7,80–77,79	1,41–10,64	2,21–21,68
2013	N	1992	38,85	2800	54,60
	B	26,66	87,43	3,22	10,55
2014	N	2576–11240	10,27–97,91	13–11640	0,13–46,43
	B	35,71–82,56	48,07–99,54	0,01–12,21	0,02–16,43

* – вид отсутствовал

Известно, что инвазивные амфиподы в новых для них местообитаниях могут оказывать значимое влияние на аборигенные сообщества [Березина, 2009]. Так, например, после вхождения в состав сообществ зообентоса озера байкальского эндемика *G. fasciatus* было отмечено значительное снижение численности и даже исчезновение из многих мест обитания аборигенного *Gammarus lacustris* G.O. Sars, 1863 [Panov, Berezina, 2002; Курашов и др., 2006]. Этот бокоплав до сих пор в единичных экземплярах отмечается в различных районах озера. В 2000 г. *G. lacustris* был встречен в Волховской губе, заливе Хауккалаhti и на о. Валаам [Berezina et al., 2009]. В 2001 г. *G. lacustris* был встречен нами в Щучьем заливе, в 2002 г. – регистрировался на валунной литорали о. Валаам [Курашов и др., 2006], в 2004 г. – в бухте Петрокрепость, а в 2005 г. – только в районе залива Хауккалаhti [Berezina et al., 2009]. В 2011–2012 гг. он также регистрировался на валунной и каменистой литорали о. Валаам [Зуев, Зуева, 2013]. В 2014 г. в наших сборах *G. lacustris* не был обнаружен.

В литорали озера также заметно уменьшился ареал обитания *Asellus aquaticus*, снизились его количественные показатели. В 2014 г. средние величины численности и биомассы составили, соответственно, 270 ± 121 экз./м² (пределы колебания 13–1480 экз./м²) и $0,94 \pm 0,56$ г/м² (0,04–8,15 г/м²). Изопода *A. aquaticus* достигала наибольшего развития только на биотопах, где *G. fasciatus* и другие амфиподы присутствовали в небольших количествах или отсутствовали. Еще в 2006 г. *A. aquaticus* был более широко распространен в литорали озера (встречаемость 35%), а его средние показатели развития были выше (численность – 688 экз./м², биомасса – 1,58 г/м²) [Литоральная..., 2011]. Наиболее вероятной причиной сокращения доли этой изоподы в литоральных биотопах Ладоги является хищничество инвазивных амфипод.

Инвазия *G. fasciatus* в середине 1980-х годов привела к значительным изменениям в структуре и функционировании прибрежных биоценозов озера, к увеличению продуктивности бентосных сообществ и более эффективной утилизации энергии, поступающей в литоральную зону. Этот вид занял свободную экологическую нишу с использованием практически не потреблявшихся ранее трофических ресурсов, в частности различных макрофитов, широко распространенных в озере. Это отразилось на количественных показателях литорального бентоса, резко возросших за счет развития популяции вселенца, без уменьшения количественных показателей остального бентоса. Одним из последствий функционирования популяции *G. fasciatus* стал мелиоративный эффект, особенно выраженный в песчаных местообитаниях, во многих из которых макрозообентос практически отсутствовал [Курашов и др., 2011].

Вторым байкальским вселенцем в озеро стала также амфипода *Micrurampus possolskii* Sowinsky, обнаруженная нами в 2012 г. в Щучьем заливе. Инспектирование архивных проб позволило выявить, что вид появился в Щучьем заливе в 2002 г. и уже на следующий год (2003) дал значительную вспышку в своем развитии. Характерная черта *M. possolskii* – его приверженность к хорошо прогреваемым биотопам. *M. possolskii* ведет преимущественно роющий образ жизни и наиболее часто встречается на песчаной литорали

(различной степени заиленности) с небольшим процентом покрытия макрофитами.

В настоящее время наблюдается активное распространение *M. possolskii* в Ладожском оз. (рис. 9.9.2), что неизбежно приведет к значительным перестройкам в литоральных гидробиоценозах озера в тех местах, где данный вид сможет адаптироваться. В губе Петрокрепость данный вид занял не только литоральные биотопы, но и центральную часть губы благодаря ее мелководности. Исследования 2017 г. выявили присутствие микропуха в восточной и центральной зоне губы Петрокрепость. В открытой части губы Петрокрепость *M. possolskii* обитает совместно с *G. fasciatus* и реликтовым рачком *Monoporeia affinis* (Lindstrom).

В табл. 9.9.2 приведены показатели развития вида на станции, расположенной в центральной части губы Петрокрепость. В августе 2019 г. существенно выросли количественные характеристики *M. possolskii* (1820 экз./м², 6,40 г/м²) (табл. 9.9.2). В настоящее время на долю *M. possolskii* уже приходится более 80% численности и более 90% биомассы обитающих здесь амфипод.

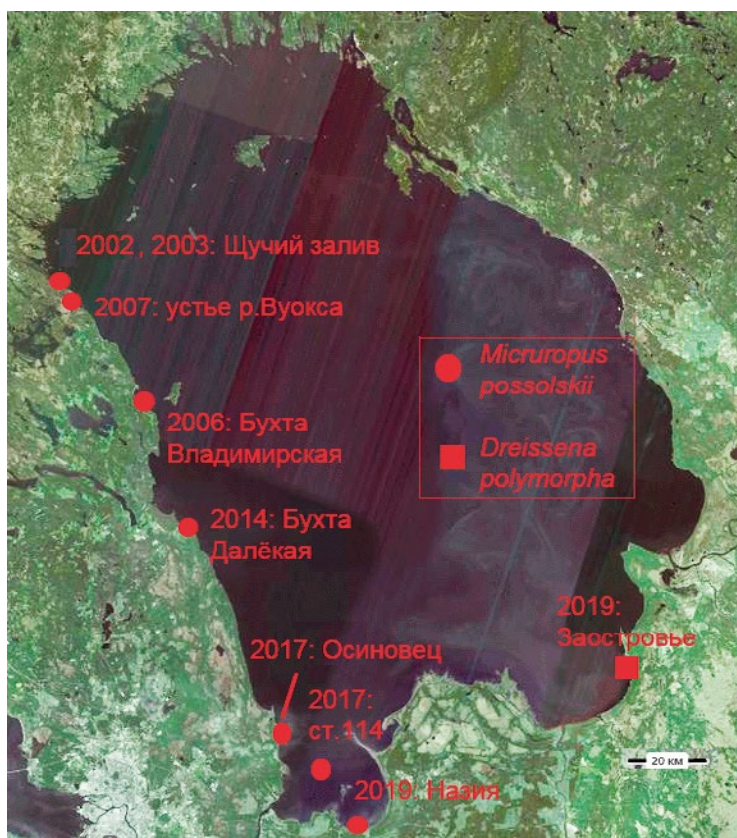


Рис. 9.9.2 – Динамика расселения *Micrurus possolskii* в Ладожском оз. и место обнаружения долговременного обитания популяции *Dreissena polymorpha* (с использованием картографических материалов сайта <http://maps.yandex.ru>)

Таблица 9.9.2

Показатели численности (N, экз./м²) и биомассы (B, г/м²) *Micrurus possolskii* и его доля (%) в составе амфипод на ст. 114 в разные годы

Дата	N	B	N, %	B, %
14.10.2017	40	0,52	29	59
16.07.2018	140	0,12	44	19
13.10.2018	480	1,25	89	91,6
16.08.2019	1820	6,40	84	92,5

В настоящее время отсутствуют сведения о расширении ареала *M. possolskii* к северу от Щучьего залива. Специальный поиск в 2017–2019 гг. в северном районе озера не выявил присутствия этого вида в схожих с известными местообитаниями вида биотопах при большом количественном развитии *G. fasciatus*. В 2019 г. *M. possolskii* был уже обнаружен в районе п. Назия. Таким образом, этот инвайдер за 17 лет преодолел 170 км по побережью Ладоги от Щучьего залива до п. Назия в губе Петрокрепость со скоростью распространения 10 км/год. Эта скорость расселения совпала со скоростью расселения *G. fasciatus* в Горьковском водохранилище, где в первый год после интродукции вида она составила также 10 км/год [Июffe, 1965].

На ст. L3–14 (59°54,344'N; 31°22,449'E; грунт – мелкий песок; растительность – *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., *Potamogeton perfoliatus* L., *Nuphar lutea* (L.) Smith, *Elodea canadensis* Michx.), где *M. possolskii* впервые был обнаружен в 2019 г., в начале августа его биомасса составила 1,26 г/м², что выше, чем у *G. fasciatus* в данном биотопе. По своей значимости в сообществе (11,45% суммарной биомассы макробеспозвоночных) он уступал только олигохетам (табл. 9.9.3).

Таблица 9.9.3

Показатели численности (N, экз./м²) и биомассы (B, г/м²) основных групп макробеспозвоночных и их доли (%) в составе сообщества макрозообентоса в озерном местообитании на ст. Ст. L3–14 в районе п. Назия (август 2019 г.)

Группа	N	B	N, %	B, %
Oligochaeta	1960	8,50	74,81	77,27
Chironomidae	140	0,22	5,34	2,00
Mollusca (Bivalvia)	140	0,32	5,34	2,91
Amphipoda (<i>Micrurus possolskii</i>)	60	1,26	2,29	11,45
Amphipoda (<i>Gmelinoides fasciatus</i>)	320	0,70	12,21	6,36
Bcero	2620	11,00	100,00	100,00

Следует отметить, что данный биотоп с чистым песчаным грунтом – не самый благоприятный биотоп для *M. possolskii*, который предпочитает более заиленные грунты. По-видимому, к 2019 г. вид только начал осваиваться в данном районе, поскольку в пробах, отобранных в устье р. Назия на более благоприятном для микропуруса грунте (сильно заиленный песок, *E. canadensis*), *M. possolskii* обнаружен не был, амфиподы были пред-

ставлены только *G. fasciatus* с самой высокой биомассой из всех групп макробентоса в этом биотопе (табл. 10.3.4). Возможно, препятствием для колонизации устья р. Назия является достаточно высокая минерализация поступающих сюда речных вод (131–166 мг/л), что более чем в 2 раза выше значения этого показателя в озерных местообитаниях, где был выявлен микроупус (табл. 9.9.5).

Упомянутые выше байкальские амфиподы, а также развивающиеся в Волховской губе в значительном количестве понто-каспийские амфиподы *Pontogammarus robustoides* (Sars), *Chelicorophium curvispinum* (Sars) [Курашов и др., 2018] существенно трансформировали потоки вещества и энергии в литорали, стали новым обильным трофическим ресурсом для рыб.

Таким образом, инвазивные амфиподы, несмотря на свое относительно недавнее проникновение в Ладожское оз., в настоящее время играют существенную роль в донных сообществах литоральной зоны. Наиболее широко распространен в озере *G. fasciatus*, гораздо реже встречается *M. possolskii*, что, вероятно, было связано с более поздним появлением этого вида в Ладожском оз. Исследования последних лет (2017–2019 гг.) показали, что байкальский вселенец *M. possolskii* активно осваивает мелководные участки в юго-западной и южной части озера и из прибрежных биотопов уже проник в центральную часть бухты Петрокрепость, где его количественные показатели довольно высоки. Ареал обитания *P. robustoides* и *C. curvispinum* по-прежнему ограничен границами Волховской губы. Дальнейшему расселению понто-каспийских амфипод, вероятно, препятствует низкая минерализация вод в озере. Доминирующая роль *G. fasciatus* наблюдалась только в тех районах озера куда еще не проникли другие виды инвазивных амфипод. Значительное увеличение количественного развития *P. robustoides* и активное освоение *M. possolskii* литорали озера в южном направлении свидетельствуют о продолжающейся структурной перестройке литоральных биоценозов крупнейшего европейского озера.

Таблица 9.9.4

Показатели численности (N, экз./м²) и биомассы (B, г/м²) основных групп макробеспозвоночных и их доли (%) в составе сообщества макрозообентоса в устье р. Назия

Группа	N	B	N, %	B, %
Oligochaeta	6440	4	12,93	5,36
Chironomidae	33200	18,4	66,67	24,68
Mollusca (Bivalvia)	1080	10,8	2,17	14,48
Mollusca (Gastropoda)	280	1,6	0,56	2,15
Trichoptera	40	1,56	0,08	2,09
Hirudinea	480	9,68	0,96	12,98
Isopoda	2520	4,56	5,06	6,12
Megaloptera	520	3,6	1,04	4,83
Amphipoda (<i>Gmelinoides fasciatus</i>)	5240	20,36	10,52	27,31
Всего	49800	74,56	100,00	100,00

Таблица 9.9.5

**Характеристики озерной среды в месте обитания популяций
D. polymorpha и *M. possolskii* в Ладожском оз. (август 2019 г.)**

Местоположение	pH	Eh	УЭП	МИН	МУТ	O ₂	T
<i>D. polymorpha</i>							
Заостровье	8,52	302	102,5	66	2,60	10,5/109,9	17,1
<i>M. possolskii</i>							
Назия	8,1	334	95,0	62	1,5	10,1/107,4	17,6
Осиновец	8,56	319	90,4	59	3,0	9,9/108,9	19,4
Бухта Далекая	7,18	255	78,9	52	1,9	9,3/93,3	15,4
Б-та Владимирская	9,1	210	94,7	62	1,3	10,5/109,3	17,1
Устье р. Вуокса	7,32	302	63,6	42	1,5	9,0/90,6	15,8
Щучий залив	9,3	219	98,4	64	1,5	12,2/130,3	18,6

pH – водородный показатель; Eh – окислительно-восстановительный потенциал, мВ; УЭП – удельная электропроводность, мкС/см; МИН – минерализация, мг/л; МУТ – мутность, NTU; O₂ – растворенный кислород, мг/л/ – % насыщения; T – температура, °C.

Если явные последствия вселения чужеродных амфипод в озеро – это уже свершившийся факт, то последствия выявленного вселения в Ладогу дрейссены полиморфной пока сложно предугадать. В мае 2019 г. в Волховской губе Ладожского оз. при помощи необитаемого подводного аппарата выявлено присутствие инвазионного моллюска *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771). Двустворчатый моллюск *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) имеет европейское происхождение. До начала XIX века распространение его было ограничено опресненными северными участками Каспийского, Черного и Азовского морей и низовий рек, впадающих в эти моря [Karatajev et al., 1997]. С XIX века вид начал активно распространяться за пределы своего нативного местообитания по водоемам Европы [Pollux et al., 2010], а в 1986 г. был впервые отмечен в Северной Америке [Hebert et al., 1989]. Отмечено его перемещение из понто-каспийского региона по российским внутренним водоемам и водотокам в северном и северо-восточном направлениях [Ворошилова, 2008; Ворошилова, Артамонова, 2008; Орлова, 2010; Поздеев, 2011; Истомина и др., 2012; Жукова, 2013; Михайлов, 2015].

До настоящего времени не имелось свидетельств присутствия взрослых особей дрейссены полиморфной в Ладожском оз. В пределах Ленинградской обл. дрейссена обитает в Чудском озере, в р. Волхов [Старобогатов, 1988], в восточной части Финского залива [Orlova et al., 2006; Орлова, 2010], р. Луга [Мероприятия и продукты ..., 2016], оз. Врево [Экомониторинг рек..., 2019]. В 2017 г. было обнаружено существование устойчивой популяции этого вида в одном из водоемов бассейна Ладожского озера (Келлоловские карьеры, Кировский район Ленинградской области (59°47'49"N 31°0'42"E)) [Дудакова, 2019].

В Ладожском оз., в Волховской губе, обнаруживались лишь велигеры дрейссены в составе зоопланктона [Naumenko et al., 2000], куда они попада-

ли, очевидно, с водами р. Волхов. Однако в 2019 г. мы выявили присутствие взрослых особей устойчиво существующей популяции этого вида в составе бентоса в Волховской губе Ладожского оз. Поскольку дрейссена может образовывать крупные скопления, визуально хорошо различимые, то это позволяет использовать для ее исследования новые высокотехнологичные методы, такие как подводная видеосъемка с применением необитаемых подводных аппаратов, дающих возможности для более корректной, полной, охватывающей большие площади оценки по сравнению с классическими дночерпательным и легководолазным методами. В озерных экосистемах соответствующие работы в этом направлении [Karatajev et al., 2018; Mehler et al., 2018] были проведены на Великих американских озерах, куда данный вид вселился в 90-х годах прошлого столетия [MacIsaac, 1994]. Видеосъемка, согласно этим работам, позволила выявить эффект гетерогенности, свойственный поселениям дрейссены, и провести корректный учет ее распределения.

Работы проводились 1 мая, 8 июля и 7 августа 2019 г. в Волховской губе Ладожского оз. в районе пос. Заостровье Волховского района Ленинградской обл. ($60^{\circ}18'8,42''N$ $32^{\circ}36'15,35''E$) (рис. 10.3.3). Проводилось видеопрофилирование, совмещенное с гидроакустической съемкой дна однолучевым эхолотом на полигоне площадью $300 \times 1000 \text{ м}^2$. Для целей видеопрофилирования использовался необитаемый подводный аппарат *Limnoscout-230*, созданный в Институте озераведения РАН [Дудакова и др., 2018], с установленной на нем видеокамерой Yi 4K. Для целей эхолотирования использовался картплоттер-эхолот *Garmin-585*. Охвачено 2 продольных видеопрофиля параллельных берегу (по 300 м) и 2 поперечных (по 1000 м) профиля. Исследовались два фациальных типа ландшафта, представленных на данном участке акватории Ладожского оз.: 1) песчаный со знаками ряби с псаммофильной биотой и 2) крупнообломочный с развитым перифитоном и массово встречающимися относительно крупными подвижными брюхоногими моллюсками. Границы между этими типами не всегда были четкими, и отмечены переходные зоны, представлявшие собой песок с обломками. С учетом равномерной скорости прохождения частей трека при анализе видеоматериала измерялось время прохождения аппарата над фациями (=биотопами) разного типа, и на основе этого рассчитывалась площадь, занятая каждым из них. Размер поля зрения кадра (с учетом того, что угол захвата для используемой камеры равнялся 155°) составил 0,8 м по средней части видеокadra; площадь дна, захватываемая в видеокادر (с учетом геометрических искажений в разных частях кадра), составила в среднем $0,3 \text{ м}^2$. Таким образом, при прохождении обозначенного видеотрека была отснята площадь каменистой поверхности (в плоской проекции), составившая около 600 м^2 . Пересчитывалась условная средняя плотность на квадратный метр по частоте встречаемости моллюсков при прохождении каждого 50 м профиля.

Для построения батиметрической модели исследованного участка Волховской губы использовались средства программы *Surfer*. При построении моделей пространственных переменных в *Surfer* для интерполяции данных использовался метод естественной окрестности «*Natural Neighbor*» [Построение..., 2014]. Плотность поселения моллюсков старших возрастов,

хорошо различимых при видеосъемке, оценивалась по числу организмов в кадре, пересчитанных на площадь осмотренной поверхности.

Сбор моллюсков для уточнения видовой принадлежности, получения некоторых предварительных данных о размерных характеристиках и форме раковин особей старших возрастных групп проведен 8 июля 2019 г. из ракушечного материала, выброшенного на берег. Рассмотрено 19 пар найденных створок. Раковины измерялись штангенциркулем с точностью до 0,1 мм измеряли раковины по трем стандартным промерам: длина (L) – расстояние по продольной оси раковины между наиболее удаленными точками переднего и заднего краев, высота (H) – расстояние к перпендикуляру к продольной оси раковины между наиболее удаленными точками брюшного и спинного краев и выпуклость, или ширина (B), – расстояние по перпендикуляру к комиссуральной плоскости между наиболее удаленными от нее точками створок. Определяли степень выпуклости (индекс выпуклости) – соотношение выпуклости раковины (B) к ее высоте (H) (плоская, выпуклая, сильновыпуклая и др.). Через соотношение высоты раковины (H) к ее длине (L) определяли общую форму раковины (удлиненно-овальная, овальная или яйцевидная) [Определитель..., 2016]. Для оценки возраста у каждой особи учитывали годовые кольца роста, формирующиеся на внешней поверхности раковины [Методы изучения..., 1990]. Возраст моллюсков (B+) определяли по кольцам на раковине [Антонов, 1997]. При верификации определения учитывалась приуроченность типов рисунка раковины к определенным возрастам [Павлова, 2010].

Подтверждение присутствия живых моллюсков на валунном материале под водой проведено при помощи видеосъемок с подводного аппарата в тот же день, когда собирались створки. Для оценки распределения и плотности моллюсков использовались данные видеосъемки, проводившейся в мае. Характеристики озерной среды в месте обитания популяции *D. polymorpha* были оценены при помощи многопараметрического зонда Aqua TROLL 500 (In-Situ Inc.) (табл. 9.9.5). В точке измерения на глубине 3 м они имели практически одинаковые значения в поверхностном и придонном горизонте в силу интенсивного перемешивания озерных вод. Живые взрослые особи *D. polymorpha* были обнаружены в Волховской губе Ладожского оз. в районе пос. Заостровье Волховского района Ленинградской области в диапазоне глубин с 1,5 до 6 м.

В табл. 10.3.6 приведены характеристики найденных створок дрейссены из Волховской губы Ладожского озера в том же месте, где были обнаружены живые взрослые особи *D. polymorpha* при помощи видеосъемки. Выброшенные на берег створки принадлежали взрослым особям не младше возраста 3+. Среди найденных моллюсков встречались и пятилетние, размер которых превышал 30 мм. По индексу выпуклости все створки отнесены к категории «сильно выпуклые». Форма моллюсков была овальная, у самых крупных – удлиненно-овальная [Определитель..., 2016]. Такие характеристики *D. polymorpha* Волховской губы близки к тем, что характерны, например, для волжских водоемов [Павлова, 2010]. С возрастом раковинки становились более удлиненными и выпуклыми по медианным значениям (табл. 9.9.6).

Таблица 9.9.6

Морфологические характеристики и возраст створок дрейссены из береговых выбросов в р-не п. Заостровье (Волховская губа, Ладожское оз.)

№ п/п	Длина (L), мм	Высота (H), мм	Ширина (B), мм	Возраст	Степень выпуклости В/Н	Форма раковины Н/L
1	19,9	10,6	10,6	3+	1	0,53
2	20,4	10	11,2	3+	1,12	0,49
3	20,9	11,8	12	3+	1,02	0,56
4	20,9	12,2	11	3+	0,9	0,58
5	21	11,3	11	3+	0,97	0,54
6	21,3	11,3	11	3+	0,97	0,53
7	21,6	11,3	11	3+	0,97	0,52
8	22,3	11,9	11,5	3+	0,97	0,53
9	22,7	11,8	15,1	3+	1,28	0,52
10	23,5	11,6	14,6	3+	1,26	0,49
11	25,4	11,7	12,6	3+	1,08	0,46
Медиана для возраста 3+	21,3	11,6	11,2	3+	1	0,53
12	24,4	11,7	13,4	4+	1,14	0,48
13	25,6	12,4	12,4	4+	1	0,48
14	26,4	12,5	13,2	4+	1,05	0,47
15	26,7	12,7	13,5	4+	1,06	0,48
16	28,9	12,7	13,7	4+	1,08	0,44
Медиана для возраста 4+	26,4	12,5	13,4	4+	1,06	0,48
17	27,7	13,4	15,3	5+	1,14	0,48
18	30,3	13,3	14,5	5+	1,09	0,44
19	30,4	13,5	13,9	5+	1,03	0,44
Медиана для возраста 5+	30,3	13,4	14,5	5+	1,09	0,44

Количественные характеристики развития популяции дрейссены в Волховской губе получены по результатам анализа материалов видеопрофилирования. Проведенный анализ пространственного распределения дрейссены показал, что в данный момент количественное развитие популяции незначительно. При видеосъемке моллюски встречались в основном на каменистом обломочном материале и местами на заиленном песчано-галечном субстрате в промежутках между частицами гальки (рис. 9.9.3, А – Г). На обследованном участке скоплений моллюсков в виде друз, щеток или прочих форм, характерных при массовом развитии дрейссены, не обнаружено. Как правило, даже на обломок размером в несколько десятков сантиметров в диаметре (валун) приходилось по 1–2 моллюска; редко встречалось по 3–4 экземпляра, расположенных на одной поверхности рядом друг

с другом (рис. 9.9.3). В целом отмечено предпочтение моллюсками боковой поверхности крупных обломков (рис. 9.9.3, С – Е, Н).

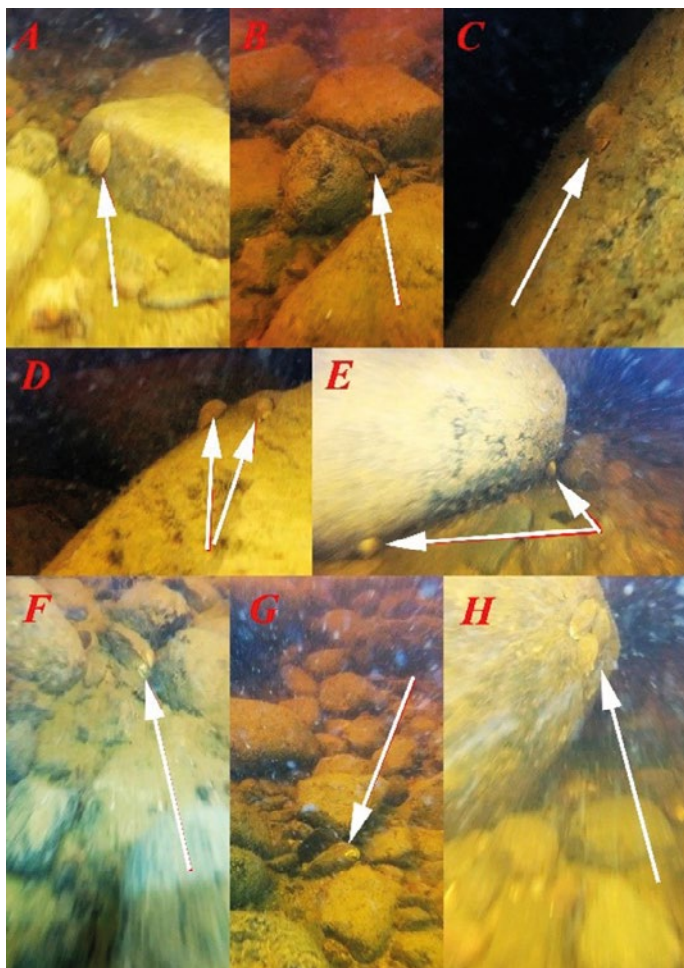


Рис. 9.9.3 – Дрейссена полиморфная в Волховской губе Ладожского оз. (по материалам видеонаблюдений)

По профилю, отработанному на полигоне от уреза воды до 6 м глубины (1000 м по прямой от берега) (рис. 9.9.4) распределение моллюсков было неодинаковым (рис. 10.3.5). Наиболее высокая плотность отмечалась для глубин свыше 4,5 м, т. е. на удалении более 750 м от берега (рис. 9.9.3). Неоднородность распределения дрейссены была тесно связана с гетерогенностью биотопов. Для данного участка акватории было характерно параллельное берегу чередование гряд валунно-гравийного материала (очевидно ледникового происхождения) с полосами чистого песка со знаками ряби. Ширина песчаных полос составляла от 1 до 20 м; площадь этого типа ландшафта была меньше 15%. Крупнообломочный моренный материал с промежутками, заполненными более мелкими обломками и редкими пятнами песка

с щебенкой, занимал гораздо большую площадь (порядка 50%). Остальная часть площади занята переходным ландшафтным типом с размытыми границами. Дрейссена преобладала на тех участках, где больше встречалось крупновалунного материала. Там, где преобладала песчаная фация (полоса в 550–600 м от берега), встречаемость моллюска и, соответственно, его численность стремились к нулю (рис. 9.9.4, 9.9.5).

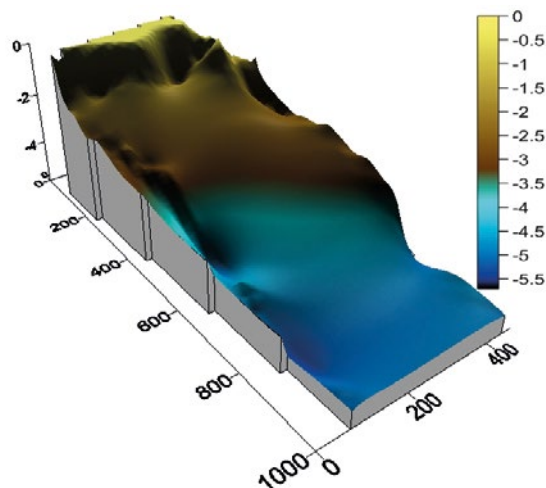


Рис. 9.9.4 – Батиметрическая модель исследованного полигона Волховской губы

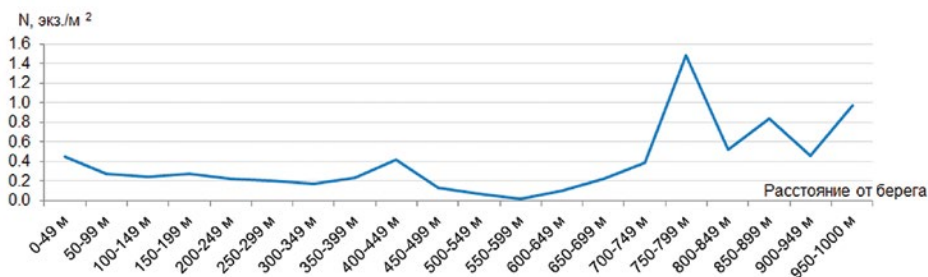


Рис. 9.9.5 – Плотность популяции (N , экз./м²) *D. polymorpha* по учетам видеотрека

Как уже упоминалось выше, ранее в Ладожском оз. в составе зоопланктона Волховской губы обнаруживались велигеры дрейссены [Naumenko et al., 2000]. Велигеры дрейссены обнаруживались в 1995 и 1998 гг. на станции, расположенной непосредственно у устья р. Волхов, с водами которого они и попадали в Ладогу, примерно в 25 км от места обнаружения взрослых особей дрейссены в 2019 г. В 1998 г. их количество было незначительно – 8 экз./м³, при довольно большом размере – 0,225 мм, что соответствовало стадиям великонха и, в большей степени, педивелигера [Ackerman et al., 1994; Гусева, 2009], т. е. это были личинки, готовые к оседанию. В последующие годы регулярных исследований зоопланктона в Волховской губе (включая приустьевую область р. Волхов) личинки дрейссены не обнару-

живались. Возможно, это говорит о сильном сокращении или прекращении их поступления в Ладогу со стоком Волхова. В этой связи значительно возрастают шансы считать обнаруженную популяцию у п. Заостровье натурализованной и самоподдерживающейся, а не псевдопопуляцией, которая поддерживается за счет дрейфа личинок из р. Волхов.

Крайне важен вопрос о возможном распространении данного инвазивного вида в другие части Ладожского оз. за пределы Волховской губы. Известно, что содержание кальция в воде может лимитировать расселение дрейссены в пресных водоемах [Мартемьянов, 2013]. По соотношению главных ионов воды р. Волхов принадлежат к гидрокарбонатно-кальциевым [Ладога, 2013; Naumenko et al., 2000]. В Ладожском оз. максимальная минерализация отмечается у водной массы, сформированной стоком р. Волхов.

По наблюдениям непосредственно в зоне впадения в озеро р. Волхов общая минерализация может достигать 154 мг/л [Kurashov, Barbashova, 2008], а по литературным данным – 200–300 мг/л [Naumenko et al., 2000], что в несколько раз выше среднего значения для остальной части акватории озера. Кроме этого, в Волховскую губу поступают высокоминерализованные воды р. Сясь со среднегодовым значением 120 мг/л [Naumenko et al., 2000]. В то же время, по нашим наблюдениям, при нагонах озерной воды минерализация в Волховской губе может снижаться до значений 60–65 мг/л, т.е. величин, характерных для основной массы озерной воды. Следует отметить, что в основном высокоминерализованные воды распространяются вдоль восточного берега Волховской губы [Naumenko et al., 2000].

Учитывая достаточно обширную информацию по обитанию *D. polymorpha* в водах разной солености, обобщенную в [Garton et al., 2013], по-видимому, можно считать верхней границей существования природных популяций *D. polymorpha* местообитания с соленостью до 8‰. Экспериментально установленная верхняя граница потенциальной соленостной толерантности вида близка к 14–15 г/л [Orlova et al., 1998]. При этом данных для определения нижней границы значений минерализации, при которых моллюск способен обитать, не так много. Так, в работе [Ляхнович и др., 1994] указано, что в озерах Белоруссии дрейссена встречается при диапазоне минерализации 164,0–388,6 мг/л. В более поздней работе [Разлуцкий и др., 2015] сообщается, что *D. polymorpha* обитает в озере, где значение электропроводности воды 122 мкС/см. С учетом того, что при неизвестном точном минеральном составе маломинерализованных пресных вод может быть использован переводной коэффициент 0,65 [Rusydi, 2018] или 0,67 [The Geochemical Atlas ..., 2005], значение минерализации в озере получается равным 79,3 или 81,7 мг/л. В табл. 9.9.5 представлены характеристики водной массы, измеренные в месте обитания в Ладожском оз. популяции *D. polymorpha*. В период наблюдений была зафиксирована величина минерализации 66 мг/л. Для данного места, по-видимому, это достаточно обычная ситуация пониженной минерализации, поскольку местообитание расположено достаточно близко к открытым водам Ладоги (рис. 9.9.3). В то же время сюда, в зависимости от метеорологической и гидрологической ситуации, регулярно доходят воды р. Волхов, способствующие повышению минерализации. Таким образом, по-видимому, зафиксировано наименьшее

(66 мг/л) известное значение минерализации, при котором возможно обитание популяции *D. polymorpha* в пресных водах.

Учитывая наличие моллюсков возрастом 5+, дрейссена существует в Волховской губе уже несколько лет, что с определенной вероятностью может свидетельствовать об успешной натурализации вида, несмотря на относительно низкую минерализацию воды, лежащую вне оптимума для данного вида. Однако данное положение требует дополнительных доказательств, т. к. нельзя исключать, что пополнение популяции теоретически может осуществляться из родительской популяции, расположенной либо в р. Волхов, либо даже в оз. Ильмень. Выявленная способность дрейссены обитать при пониженных значениях минерализации в Ладожском оз. является серьезным аргументом в пользу предположения дальнейшего возможного расселения дрейссены в данном водоеме.

Другим фактором, ограничивающим натурализацию и распространение дрейссены в Ладожском оз., являлась температура [Старобогатов, 1988]. По-видимому, длительное время это обстоятельство наряду с низкой минерализацией препятствовали натурализации дрейссены в Ладожском оз. Однако начиная с последних десятилетий XX в. по настоящее время даже для северной Ладоги можно говорить о наличии значимого положительного тренда среднегодовых температур приземного воздуха [Науменко, Каретников, 2017], а следовательно, и поверхностной водной массы, как минимум до глубины ветрового перемешивания). Исследования изменения показателей термического режима приземного воздуха на четырех метеорологических станциях, характеризующих северную (ст. Паданы), восточную (ст. Вытегра), западную (ст. Выборг) и южную (ст. Великие Луки) части водосбора Ладожского озера также позволили сделать вывод об очень высоких значениях повышения средней годовой температуры приземного воздуха на всех четырех станциях водосбора Ладоги [Менжулин, 2013]. Значения углов наклона линейных трендов повышения температуры составляют: для ст. Паданы – 3,95 °C за 50 лет, для ст. Вытегра – 2,85 °C за 50 лет, для станций Выборг и Великие Луки – 2,15 °C и 4,11 °C за 50 лет соответственно. При этом такие оценки роста локальной температуры приземного воздуха являются одними из самых высоких не только для регионов Европы, но и для всего мира [Менжулин, 2013].

В Ладожском оз. прибрежная зона до глубин 18 м – зона наиболее интенсивного ветрового перемешивания, при сильных ветрах достигающего дна [Науменко, 2013], т. е. высокая динамика водных масс за счет течений и ветрового перемешивания приводит к выравниванию температур (и других лимнологических характеристик) в Волховской губе от поверхности до дна. Таким образом, климатическое повышение температуры приземного воздуха будет приводить к повышению температуры фактически по всей толще воды в Волховской губе, которая является одной из самых теплых губ Ладожского оз. [Науменко, 2011]. Все это говорит о том, что, по-видимому, в прибрежной мелководной зоне юга Ладоги годовая сумма температур, необходимая для развития дрейссены, достигла величины, достаточной, чтобы обеспечить успешное размножение вида и его натурализацию в условиях низкой минерализации воды озера. Об этом же свидетельствует и вселение

в Волховскую губу других понто-каспийских теплолюбивых видов, а именно – амфипод *Pontogammarus robustoides* (Sars) [Kurashov, Barbashova, 2008] и *Chelicorophium curvispinum* (Sars) [Курашов и др., 2010].

В составе малакофауны исследуемого участка массовыми видами были два вида двустворчатых моллюсков *Unio pictorum* (L.) и *Anadonta cygnea* (L.) и два вида гастропод – *Viviparus viviparus* (L.) и *Bithynia tentaculata* (L.), демонстрирующие высокие значения численности и биомассы. В целом для Волховской губы, согласно данным многолетних исследований Института озероведения, характерно высокое количественное развитие макрозообентоса и его высокое структурное разнообразие [Naumenko et al., 2000; Курашов и др., 2013]. При этом в литоральной зоне Волховской губы виды-вселенцы амфиподы (*Gmelinoides fasciatus* (Stebbing), *P. robustoides*, *Ch. curvispinum*) в настоящее время играют важнейшую роль, а их биомасса достигает 26, 82 и 12 г/м² соответственно [Курашов и др., 2018]. Можно говорить о том, что литоральная зона Ладоги в целом к настоящему времени претерпела существенную трансформацию именно в результате жизнедеятельности видов-вселенцев [Курашов и др., 2012; Курашов и др., 2018; Трифонова и др., 2018].

В случае массового развития дрейссены, которая часто является видом-эдикатором [Протасов, 2008], возможны еще более глубокие перестройки сообществ прибрежной зоны озера. Учитывая высокие адаптационные способности данного вида, в случае приспособления его к низкоминерализованной воде и температурному режиму водоема можно предположить, что *D. polymorpha* станет важнейшим фактором трансформации гидробиоценозов Ладожского оз. Принимая во внимание обнаружение моллюсков возрастом 5+, можно говорить о существовании дрейссены в Волховской губе как минимум на протяжении последних 5 лет, что дает основания для вывода об успешной натурализации *D. polymorpha* в Ладоге, несмотря на относительно низкую минерализацию воды, лежащую вне оптимума для данного вида и низкую, но уже допустимую для него температуру.

Обнаруженная способность дрейссены к существованию во взрослом состоянии в низкоминерализованной воде Ладожского оз. не исключает дальнейшего распространения вида в условиях изменяющегося климата (повышение температуры воды в прибрежной зоне) в этом водоеме. В этом случае можно ожидать труднопрогнозируемые пока последствия для всей прибрежной зоны, которые могут быть следствием высокой фильтрационной активности моллюска. Наиболее вероятно влияние дрейссены на количество планктона, на увеличение прозрачности, на увеличение зоны распространения погруженных макрофитов и фитобентоса, увеличение первичной продуктивности за счет макрофитов и фитобентоса, снижение продукции фитопланктона, ожидаема структурная перестройка бентосных биоценозов.

Как известно, макрофиты – это важнейшие структурообразующие виды, зачастую играющие ведущую роль в формировании конкретных литоральных местообитаний. Полученные результаты показывают, что такие чужеродные виды растений, как элодея канадская (*Elodea canadensis* Michx.) и рдест гребенчатый (*Potamogeton pectinatus* L.), имеют определяющее значение, формируя ассоциации с высоким проективным покрытием. Элодея развита по всему озеру, с фитомассой, во многих биотопах превышающей

30 г сух. в./м². Типичными биотопами произрастания элодеи являются илистые и мелкопесчаные литоральные местообитания в скрытых от волнобоя заливах и бухтах, где вид может формировать как монодоминантные, так и смешанные растительные ассоциации. Часто *E. canadensis* произрастает совместно с рдестом травянистым, урутью очередноцветковой и урутью колосистой. Регулярные наблюдения в озере показывают, что элодея канадская не оказывает выраженного негативного влияния на аборигенную растительность. В зарослях элодеи создаются благоприятные условия для интенсивного развития бентосной и фитофильной фауны. Примером является сообщество бентоса, описанное в табл. 9.9.4.

P. pectinatus наряду с инвазионным рогозом узколиственным (*Tupha angustifolia* L.), в свою очередь, стал одним из массовых макрофитов в Волховской губе. При этом следует учитывать, что инвазионные виды, изменяя свой низкомолекулярный метаболит (НМ), активно взаимодействуют посредством своих метаболитов с окружающим их гидробиоценозом, влияя на них и условия их обитания. В частности, показано, что *P. pectinatus*, вселившись в Ладогу, существенным образом изменил свой НМ по сравнению с его нативным ареалом [Курашов и др., 2020], что свидетельствует о значительной пластичности НМ рдеста гребенчатого, позволяющего ему адаптировать свой метаболизм к существованию в широком диапазоне условий и успешно вселяться в новые местообитания, что имело место и в случае с Ладожским озером.

Для оценки степени биозагрязнения литоральных местообитаний на примере макробеспозвоночных в Ладожском оз. использовались оригинальные [Arbačiauskas et al., 2008] и модифицированные [Курашов и др., 2012] индексы концепции оценки рисков инвазий водных организмов: 1) TCI (таксономический индекс «Taxonomic Contamination Index», соотношение числа таксонов нативных и чужеродных организмов); 2) ACI (индекс биозагрязнения по численности «Abundance Contamination Index», соотношение численности чужеродных видов и суммарной численности сообщества); 3) BCI (индекс биозагрязнения по биомассе «Biomass Contamination Index», соотношение биомассы чужеродных видов и суммарной биомассы сообщества); 4) IBC (интегральный индекс биозагрязнения «Integrated Biological Contamination index», среднее арифметическое между TCI и ACI); 5) IBC2 (среднее арифметическое между TCI, ACI и BCI); 6) SBCI (индекс биологического загрязнения для данного местообитания «Site-specific Biocontamination Index», который определяется на основании комбинации индексов TCI и ACI); 7) SBCI2 (определяется на основании комбинации индексов TCI и BCI). Градации индексов SBCI и SBCI2 определяются в соответствии с таблицей, приведенной в [Курашов и др., 2012].

Индексы SBCI и SBCI2 характеризуют биозагрязнение литорали Ладоги как высокое. Однако учитывая реальное место вселенцев в литоральных биоценозах, невозможно говорить о неблагоприятном экологическом статусе озера [Курашов и др., 2012; Курашов и др., 2018]. Кроме того, жизнедеятельность популяции *G. fasciatus* оказала мелиоративный эффект во многих литоральных местообитаниях, что привело к количественному увеличению развития макро- и мейобентоса [Курашов и др., 2018].

Средние значения индексов биозагрязнения для данного местообитания (SBCI, SBCI2) для различных районов Ладоги представлены в табл. 9.9.7. Наибольшему влиянию инвазионных видов подвержен южный район Ладожского оз. Его биологическое загрязнение по SBCI и SBCI2 оценивается как тяжелое. В этом районе теперь встречаются 5 инвазионных видов макробеспозвоночных: *G. fasciatus*, *P. robustoides*, *C. curvispinum* и *M. possolskii*, а также *D. polymorpha*. Западный район характеризуется высоким биологическим загрязнением. Здесь обнаружено 2 вида-вселенца: *G. fasciatus* и *M. possolskii*. Шхерный, восточный районы и остров Валаам характеризуются умеренным биологическим загрязнением. В местообитаниях этих районов встречен пока только один инвазионный вид амфипод – *G. fasciatus*.

Таблица 9.9.7

Средние значения индексов биологического загрязнения для данного местообитания (SBCI, SBCI2) для различных районов Ладожского оз.: 0 (биозагрязнение отсутствует), 1 (незначительное биозагрязнение), 2 (умеренное биозагрязнение), 3 (высокое биозагрязнение), 4 (тяжелое биозагрязнение).

Район озера	Южный	Западный	Шхерный	о. Валаам	Восточный
SBCI, SBCI2	4	3	2	2	2

В свое время [Литоральная ... 2011] сделаны оценки, что в среднем около 10% годовой продукции макрофитов в литорали Ладоги может потребляться популяцией *G. fasciatus*. Если учесть, что в западном и южном районах число в той или иной степени всеядных амфипод-инвайдеров увеличилось, то, возможно, значительно большая часть продукции прибрежных макрофитов и перифитона в настоящее время потребляется в составе сообщества макрозообентоса.

Интенсивность инвазионного процесса в Ладожском оз. и то, что последствия биологического загрязнения становятся все более значимыми для экосистемы озера иллюстрируется также присутствием в водоеме чужеродных видов из состава мейобентоса (*Nitocra spinipes* Boeck), зоопланктона (*Paraegasilus rylovi* Markewitsch, *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet)) и достаточно большим количеством видов из диатомовых перифитона озера [Курашов и др., 2018].

N. spinipes обнаруживается в озере начиная с 2003 г. [Дудакова, 2011]. Интересным является тот факт, что ранее не было ни одного свидетельства, что *N. spinipes* встречается в пресных водоемах, т. е. вселение вида в Ладогу – это первый подобный зарегистрированный факт, который объясняется генетически закрепленной устойчивостью у нитокры к резким колебаниям солености [Дудакова, 2011], что позволило виду адаптироваться к условиям низкоминерализованного Ладожского оз. Исследования 2013–2019 гг. показали, что *N. spinipes* не встречается в условиях открытой скалистой литорали в заливах шхерного района. В 2014 г. данная гарпактицида не была обнаружена в составе мейобентоса у о. Мантинсаари, тогда как в 2006–2009 гг. вид был постоянным компонентом сообщества. В то же время с 2013 г. вид начал обнаруживаться в составе гарпактицид Щучьего залива, где раньше он не встречался. В южной части озера *N. spinipes* в последние десять лет

отмечается стабильно. Таким образом, имеющиеся данные по перераспределению мест обитания вселенца (появление его в западной и исчезновение в восточной части озера) говорит о продолжающемся активном внедрении данного вида в аборигенные сообщества озера. Одним из предпочтительных мест обитания вида являются ассоциации рдеста пронзеннолистного, где его доля в сообществе гарпактицид в летний период может достигать 33%. Распространению нитокры по озеру может благоприятствовать способность вида к миграциям в толщу воды. За все годы наблюдения над новой гарпактицидой в составе мейобентоса озера не отмечено его отрицательного влияния на аборигенные виды гарпактицид. *N. spinipes*, как правило, встречается одновременно с другими представителями местной фауны гарпактицид (часто с широко распространенными по всему озеру видами *Attheyella crassa* (Sars G. O.) и *Paracampylus schmeili* (Mrazek)). Более того, проигрывая конкуренцию аборигенным видам, вид-вселенец вытесняется из определенных мест обитания, как это наблюдалось, например, у о. Мантинсаари.

В составе зоопланктона Ладожского оз. и его притоков выявлено два инвазивных вида: коловратка *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet), имеющая происхождение из водоемов Северной Америки, и упоминавшийся выше циклоп *Paraegasilus rylovi* из Северного Каспия. Также данная коловратка регистрировалась нами в Охтинском водохранилище, на 17 станциях в озерах Ладожском и Онежском и в 6 реках (Свирь, Вуокса, Морье, Тулокса, Вытегра, Нева). Вид встречается как в прибрежной зоне водоемов, так и в пелагиали на разных горизонтах. Обнаружение коловратки в столь разнотипных по условиям обитания (в том числе различающихся по степени минерализации и качеству вод) водоемах подтверждает информацию о виде, как организме с высокой экологической пластичностью, способствующей его активному расселению [Шурганова и др., 2017].

В 2011 и 2012 гг. *K. bostoniensis* регистрировалась на всей акватории Волховской губы, а в 2013 г. она отмечена в центральной части Ладожского оз.. Незначительные показатели количественного развития коловратки в планктоне (0,1–34 тыс. экз./м³) свидетельствует о неустойчивом положении данного чужеродного вида в Ладожском оз. В то же время в таких реках, как Морье, Тулема, Вуокса, Свирь, вид является постоянным, но не доминирующим, элементом зоопланктона. В теплое время года *K. bostoniensis* имеет устойчивые популяции в литоральной зоне Ладоги, но в силу невысоких количественных характеристик развития роль коловратки в зоопланктоне невелика [Курашов и др., 2017]. Продолжающееся расселение вида в водоемах европейской части России происходит в основном за счет водного транспорта [Жданова и др., 2016; Шурганова и др., 2017].

Второй зоопланктонный вселенец в Ладожском оз. – циклоп *Paraegasilus rylovi* – был впервые обнаружен на прибрежном мелководье Волховской губы в июле 2011 г. Его присутствие и натурализация были подтверждены июльскими пробами 2012 и 2013 гг. Численность популяции, по-видимому, очень невелика, так как в пробах вид был представлен копеподами и самцами (20 экз./м³).

В ходе изучения перифитона озера выявлено 22 ранее необнаруженных вида диатомовых водорослей: *Amphora fogediana* Krammer, *Aneumastus*

minor Lange-Bertalot, *A. tusculus* (Ehrenb.) Mann & Stickle in Round, Crawford & Mann, *Ctenophora pulchella* (Ralfs ex Kützing) D.M. Williams & Round, *Encyonopsis subminuta* Krammer & Reichardt, *Gomphonema minutum* (Ag.) Ag., *Karayevia clevei* (Grunow) Round et Bukhtiyarova, *Luticola mutica* (Kützing) Mann, *Navicula tripunctata* (O.F. Müller) Bory, *Nitzschia acicularis* (Kützing) W. Smith, *N. clausii* Hantzsch, *N. paleacea* Grunow, *N. pusilla* Grunow, *Placoneis clementis* (Grunow) Cox, *Plagiotropis lepidoptera* (Greg.) Kuntze, *Planothidium dubium* (Grunow) Round et Bukhtiyarova, *P. frequentissimum* (Lange-Bertalot) Round et Bukhtiyarova, *Psammothidium bioretii* (Germain) Round et Bukhtiyarova, *Pseudostaurosira parasitica* (W. Smith) Morales, *Tabularia fasciculata* (Agardh) Williams & Round и *Tryblionella levidensis* W. Smith. Многие из обнаруженных видов характеризуются повышенными требованиями к минерализации воды и приводятся в списках диатомей Балтийского моря [Snoeijs, 1995]. Данные виды могут считаться инвазивными видами. Наиболее обильны и часто встречаются среди инвазивных диатомей Ладоги три вида – *Didymosphenia geminata* (Lyngb.) Schmidt, *G. minutum* и *P. lepidoptera*.

Полученные результаты не позволяют говорить о том, что вселение в озеро новых видов привело к существенным отрицательным последствиям для аборигенных сообществ гидробионтов озера в целом. Скорее можно говорить об обогащении биоразнообразия за счет вселившихся видов, которые иногда могут оказывать даже мелиоративный эффект, повышая разнообразие и количественное развитие литоральных сообществ. Имеющиеся факты позволяют говорить о том, что вселившиеся в Ладогу виды занимают (данный процесс продолжается) экологические ниши, в незначительной степени перекрывающиеся с таковыми аборигенных видов, например, по трофическим ресурсам. Оценка реальных последствий биологических инвазий в Ладоге и близком по генезису Онежском оз. должна быть индивидуальна для каждого водоема с обязательным изучением биологии и экологии вселившихся видов.

Практические мероприятия по предупреждению и контролю биологического загрязнения водных экосистем северо-запада европейской части РФ в условиях глобализации экономики и изменений климата могут носить только превентивный характер и требуют принятия срочных, обязательных и согласованных мер как на национальном, так и международном уровне. Таким образом, можно сделать вывод, что в настоящее время в Ладожском оз. активно идут процессы, связанные с проникновением и распространением в нем видов-вселенцев, что приводит к трансформации всей экосистемы водоема. Этому активно способствуют климатические изменения, приводящие к увеличению температуры прибрежных вод озера. Это сделало возможным вселение в озеро более теплолюбивых видов, понто-каспийских амфипод и дрейссены полиморфной. Особое беспокойство вызывает именно вселение в озеро дрейссены, мощного вида-эдификатора. В отличие от Великих американских озер, где численность дрейссены достигает высоких величин, и она образует хорошо развитые друзы [Karatayev et al., 2018; Mehler et al., 2018], ладожская популяция моллюска еще слабо развита, представлена, в основном, одиночными особями и, по-видимому, пока не составляет значимой конкуренции аборигенным видам моллюсков, не оказывает существенного

влияния на структуру и функционирования бентоса в целом. В то же время обнаруженная способность дрейссены к длительному существованию в низкоминерализованной воде Ладожского оз. в условиях изменяющегося климата (потепление) указывает на ее возможную натурализацию и не исключает дальнейшего распространения вида в этом водоеме.

9.10 Современное состояние рыбных запасов Ладожского озера и их использование

В Ладожском оз. обитает сравнительно большое количество видов рыб, различных по своему происхождению, биологии и хозяйственной ценности (табл. 9.10.1). Подавляющее большинство рыб являются озерными или озерно-речными [Природные ресурсы..., 1984]. По характеру питания их можно условно разделить на планктофагов, бентофагов и хищников (соответственно 66, 21 и 13% видов). Наиболее полные списки круглоротых и рыб Ладожского оз. насчитывают 43–58 видов [Правдин, 1954; 1956; Кудерский, 1963; 2000; Титенков, 1968]. Разница в количестве видов обусловлена рыбоводной деятельностью. Попытки вселения в 60–90-х гг. в Ладожское оз. байкальского и ленского осетров, байкальского омуля, пеляди, сазана следует признать неудачными. Причем интродукция в Ладогу осетров, пеляди, карпа, чукучана, байкальского омуля и некоторых других проходила как в плановом режиме, так и случайным образом. Одни из них появились в озере в результате акклиматизационных мероприятий (осетры, байкальский омуль), другие – ушли из рыбоводных хозяйств (стерлядь, радужная форель, чукучан, карп).

Еще одной причиной несовпадения количества видов рыб является различная классификация ладожских сигов. Высокая изменчивость их биологических признаков позволила выделить у сигов достаточно четкие экологические формы. Так, в Ладожском оз. И. Ф. Правдиным [1954] было выделено 7 форм, принадлежащих к виду *Coregonus lavaretus*. Наиболее существенными признаками разграничения таксономических форм сигов являются: количество и длина жаберных тычинок на первой жаберной дуге, длина головы, рыла и нижней челюсти, диаметр глаза, ширина лба, ширина верхнечелюстной кости, высота и ширина рыльной площадки, а также наибольшая и наименьшая высота тела, длина хвостового стебля, высота спинного и анального плавников.

В последние десятилетия изменение экологической ситуации привело к почти полному смешению сигов и появлению большого количества (до 96%) «гибридных» форм [Ширкова, 1977; Печников, 1993; 1997]. Это связано с тем, что из-за эвтрофикации водоема, заиления и антропогенного загрязнения нерестилищ разные формы сигов, ранее изолированные из-за различных районов размножения, стали осваивать одни и те же места для нереста. Одновременные сроки нереста и использование одних и тех же нерестилищ привели к значительной нивелировке различий между формами сигов, как это было при вселении двух форм сигов Севан. Лудога (*Coregonus lavaretus ludoga*) и чудской (*C. l. Maraenoides*) образовали единую популяцию, особи которой сочетают признаки исходных форм [Решетников, 1980].

Таблица 9.10.1

Список рыб Ладожского оз.

№ п/п	Русское название	Латинское название
1	2	3
	МИНОГОВЫЕ	<i>PETROMYZONIDAE</i>
1	Речная, невская минога	<i>Lampetra fluviatilis</i> (L.)
2	Европейская ручьевая минога	<i>L. planery</i> (Bloch)
	ОСЕТРОВЫЕ	<i>ACIPENSERIDAE</i>
3	Атлантический, балтийский осетр	<i>Acipenser sturio</i> L.
	ЛОСОСЕВЫЕ	<i>SALMONIDAE</i>
4	Лосось озерный	<i>S. salar morpha sebago</i> Girard
5	Озерная кумжа, форель	<i>S. trutta</i> L.
5a	Форель ручьевая	<i>S. trutta morpha fario</i> L.
6	Паля	<i>Salvelinus alpinus lepechini</i> (Gmelin)
	СИГОВЫЕ	<i>COREGONIDAE</i>
7	Сиг малотычинковый	<i>C. lavaretus lavaretus</i> L.
7a	Сиг волховский	<i>C. l. lavaretus n. baeri</i> Kessler
7б	Сиг многотычинковый	<i>C. lavaretus pallasi</i> (Valenciennes)
7в	Сиг среднетычинковый	<i>C. lavaretus mediospinatus</i> Pravdin
8	Европейская ряпушка	<i>C. albula</i> (L.)
8a	Рипус	<i>C. albula infraspecies ladogensis</i> Pravdin
	ХАРИУСОВЫЕ	<i>THYMALLUS</i>
9	Европейский обыкновенный хариус	<i>Thymallus thymalus</i> (L.)
	КОРЮШКОВЫЕ	<i>OSMERIDAE</i>
10	Ладожская корюшка	<i>Osmerus eperlanus n. Ladogensis</i> Berg
	ЩУКОВЫЕ	<i>ESOCIDAE</i>
11	Обыкновенная щука	<i>Esox lucius</i> L.
	КАРПОВЫЕ	<i>CYPRINIDAE</i>
12	Плотва	<i>Rutilus rutilus</i> (L.)
13	Обыкновенный елец	<i>Leuciscus leuciscus</i> (L.)
14	Голавль	<i>L. cephalus</i> (L.)
15	Язь	<i>L. idus</i> (L.)
16	Гольян, красавка	<i>Phoxinus phoxinus</i> (L.)
17	Красноперка	<i>Scardinius eruthrophthalmus</i> (L.)
18	Жерех	<i>Aspius aspius</i> (L.)
19	Линь	<i>Tinca tinca</i> (L.)
20	Верховка	<i>Leucaspis delineatus</i> (Heckel)
21	Уклея	<i>Alburnus alburnus</i> (L.)
22	Быстрянка	<i>Alburnoides bipunctatus</i> (Bloch)
23	Густера	<i>Blicca bjoerkna</i> (L.)

№ п/п	Русское название	Латинское название
24	Лещ	<i>Abramis brama</i> (L.)
25	Синец	<i>A. ballerus</i> (L.)
26	Белоглазка	<i>A. sapa</i> L.
27	Сырть, рыбец	<i>Vimba vimba</i> (L.)
28	Чехонь	<i>Pelecus cultratus</i> (L.)
29	Обыкновенный пескарь	<i>Gobio gobio</i> (L.)
30	Золотой карась	<i>Carassius carassius</i> (L.)
31	Серебряный карась	<i>C. auratus gibelio</i> (Bloch)
	ВЬЮНОВЫЕ	COBITIDAE
32	Обыкновенный голец	<i>Nemachilus barbatulus</i> (L.)
33	Вьюн	<i>Misgurnus fossilis</i> (L.)
34	Обыкновенная щиповка	<i>Cobitis taenia</i> L.
	СОМОВЫЕ	SILURIDAE
35	Обыкновенный сом	<i>Silurus glanis</i> L.
	РЕЧНЫЕ УГРИ	ANGUILLIDAE
36	Речной угорь	<i>Anguilla anguilla</i> (L.)
	ТРЕСКОВЫЕ	GADIDAE
37	Налим	<i>Lota lota</i> (L.)
	ОКУНЕВЫЕ	PERCIDAE
38	Судак	<i>Sander lucioperca</i> (L.)
39	Окунь	<i>Perca fluviatilis</i> L.
40	Ерш	<i>Gymnocephalus cernuus</i> (L.)
	КЕРЧАКОВЫЕ, БЫЧКИ – ПОДКАМЕНЩИКИ	COTTIDAE
41	Рогатка четырехрогая	<i>Trigloporus linnbergi</i> (Berg)
42	Обыкновенный подкаменщик	<i>Cottus gobio</i> L.
43	Пестроногий подкаменщик	<i>C. poecilopus</i> Heckel
	КОЛЮШКОВЫЕ	GASTEROSTEIDAE
44	Девятииглая, малая колюшка	<i>Pungitius pungitius</i> (L.)
45	Трехиглая колюшка	<i>Gasterosteus aculeatus</i> L.

Кроме того, ладожские сиги могут быть разделены на две группы: постоянно живущие и размножающиеся в озере и полупроходные. К первой группе относятся сиги: валаамский, черный, лудога, озёрный, – которых можно назвать относительно благополучными; ко второй – волховский и свирской сиги, которые в результате постройки плотин на рр. Волхов и Свирь оказались отрезанными от мест размножения, а вуоксинский полупроходной сиг, идущий для размножения в р. Вуоксу и её притоки, находится в угнетенном состоянии из-за высокого загрязнения промышленными отходами [Дятлов, 1979].

В северной части Ладожского оз. обитает черный сиг, получивший такое название из-за темной окраски. Основные места его постоянного нахождения – район г. Сортавала, островов Валаам и Коневец, п. Салми. Держится он на глубине около 50 м. Его морфомеристическая характеристика и биологические особенности нашли отражение в ряде работ [Правдин, 1931; Дятлов, 1981]. Черный сиг достигает длины 55–60 см. Нерест происходит на галечном грунте на глубине 2–10 м в конце октября – начале ноября. На севере Ладожского оз. он имеет наибольшее промысловое значение среди сегов этой части водоема. Сиг ямный (зобатый), или валаамский, как и черный, держится в северной части Ладожского оз. Это глубоководная форма сига. Зобатость – вздутие передней части брюшка, появляется в результате подъема с глубины. Обычно обитает на глубине 25–30 м. Обитает в районе г. Сортавала и около острова Валаам [Дятлов, Стерлигов, 1972]. Нерест ямного сига происходит в ноябре на подводных кряжах на глубине 50–100 м [Дятлов, Федорова, 1977]. Максимальная длина этого сига 47 см, вес – 1300 г. Промысловая значимость его невелика. Наибольшее промысловое значение среди непроходных озерных сегов принадлежит сигу – лудог и ладожскому озерному сигу. На их долю приходилось 90–95% добычи всех сегов. Эти формы сегов обитают в южной части Ладожского оз. По морфометрии, размерно-весовым показателям и ряду других биологических признаков они вполне четко различаются [Приймак, 1985; 1988]. Основные места нереста сига – лудогии – приурочены к южному побережью Ладожского оз., а ладожского озерного – к восточному и западному побережью. На сегодняшний день среди ладожских сегов можно выделить четыре группы: три, различающиеся по количеству тычинок на передней жаберной дуге (мало-, средне- и многотычинковые), и четвертая – более крупный волховский сиг [Печников, 1997].

Атлантический, балтийский осетр и волховский сиг занесены в Красную книгу России. Озерная кумжа, форель включена в Красную книгу Ленинградской области. В Красную книгу Карелии занесены жерех, линь, белоглазка, синец, чехонь, сырть, сом и некоторые другие карповые рыбы, как очень малочисленные и находящиеся на краю своего ареала. Непромысловые виды рыб занесены в Красную книгу как зоологические объекты для сохранения генофонда и недопущения сокращения биоразнообразия рыб в бассейне Ладожского озера [Кудерский, 2000].

Биологическая характеристика основных промысловых рыб. Палия – в Ладожском оз. обитает повсеместно, но ее наибольшие скопления отмечены в северной части водоема, где расположены основные места ее размножения и нагула. По западному побережью это районы островов Коневец, Воссинсаари, Рахмансаари, Хейнясенсаари; в центральной акватории – районы островов Крестовых, Ялаянсаари и Валаамского архипелага. В 50–60-х гг. палия иногда встречалась в районе с. Морье и с. Нижние Никулясы на глубине 18–20 м. Весной палию промыслили южнее устья р. Тайполе, а летом и осенью у Сальминских берегов. В пределах Ленинградской обл. наиболее часто она встречается в границах Приозерского района. В озере обитают две формы палии: лудная и серая [Берг, 1948]. Первая предпочитает меньшие глубины, чем вторая. Границей обычного нахождения палии считается 75–80-метровая глубина. Зимой и в летнее время (с прогревом

воды) палия держится на больших глубинах (80–150 м), весной выходит на более мелководные участки (30–50 м), а в августе она идет к островным каменистым отмелям (10–25 м), где остается до нереста.

Нерестилища располагаются в районе островов Верккосаари, Хейнясен-ма, Рахмансаари, Байевых и Крестовых. Основные нерестилища находятся у островов Воссинсаари, Ялаянсаари, Мекерикке и на банке Мерихарьон-матала. Самое южное нерестилище палии известно в районе с. Никулясы. Нерестится палия во второй половине октября – начале ноября на глубине, не превышающей 20 м. В прошлом в Ладожском оз. добывалось около 100 т палии, в дальнейшем ее запасы были подрваны интенсивным ловом. С 1980 г. в северной части водоема ведутся работы по ее искусственному воспроизводству. В результате численность палии в Ладожском оз. возросла, что вызвало рост ее промысловых уловов в последние годы.

Сиги (*Coregonus lavaretus* L.) в Ладожском оз. распространены повсеместно, но в наибольших количествах встречаются в его южной части. Их сезонное распределение, связанное с нагулом, размножением и зимовкой, обусловлено, главным образом, температурным и пищевым факторами [Федорова, 1977]. Средняя многолетняя плотность распределения по всему озеру – 2,2 экз./га (0,66 кг/га). В местах наибольших концентраций плотность сигов колеблется от 3 до 12 кг/га. Как правило, они предпочитают держаться в зоне свала и в придонных слоях воды. В центральной части озера на больших глубинах сиги довольно редки. После распада льда сиги концентрируются сначала в северо-восточной части озера в районе о. Парго и р. Олонки, а также на отдельных участках Волховской и Свирской губ. Сиги направляются в эти районы, так как здесь в значительных количествах обитает их излюбленный кормовой объект *Pontoporeia affinis*. [Ковалева, 1956; Сальдау, 1956; Тихомирова, 1975]. В отдельные периоды жизни в питании сигов довольно обычны мизиды, моллюски, личинки ручейников и икра рыб. Определенные отличия отмечаются в питании сига из разных районов, а также в различные месяцы вегетационного периода, что обусловлено в основном видовым составом кормовых организмов. Так, например, в районе банки Северная Головешка в июле и сентябре у сигов снижается потребление понтопореи и увеличивается доля палласеи и моллюсков. В акватории западного побережья в пище сигов встречается наибольшее число видов личинок хирономид. В августе в этом же районе в желудках сигов встречается гаммаракантус.

Придонная температура в местах скоплений сигов в июне колеблется от 7,9 до 4–5 °С. В июле концентрации сига приурочены к районам обильным понтопореей, с глубиной от 16 до 40 м и с температурой воды от 8,9 до 4,1 °С. В середине лета массовые скопления сигов отмечаются в районе банки Северная Головешка (2,9–3,3 экз./га), а также вдоль юго-западного побережья в районе Никуляс (2,4–3,8 экз./га). В августе и сентябре сиги продолжают находиться на пастбищах, но интенсивность их питания резко падает. В эти месяцы температура воды в местах скоплений сигов повышается и составляет от 13,7 до 4,7 °С в августе и от 11 до 9 °С в сентябре. Таким образом, интенсивность питания сигов лимитируется излюбленным для него температурным порогом, что отмечала еще М. П. Ковалева [1956].

В северной части озера сига летом образуют промысловые скопления в районе от р. Тулокса до Дедовских островов, у Питкяранского побережья и у о. Мانتсинсаари. Осенью к ним добавляются акватории озера у о. Воссинансаари и Валаамского архипелага. Их максимальные концентрации наблюдаются на глубинах 20–30 м. Наименьшая плотность скоплений сегов отмечена для глубин более 40 м практически во всех районах озера. В южной части озера в конце сентября – начале октября сига образуют преднерестовые и нерестовые скопления вблизи нерестилищ на мелководных участках с глубинами от 2 до 20 м при температуре воды от 7,9 до 2,4 °С. В северной половине Ладоги нерестилища сегов расположены в заливах и у островных участков (около Кирьявалахти, Уксунлахти, о. Мантсинсаари, Парго, Дедовских и др.) (рис. 9.10.1).

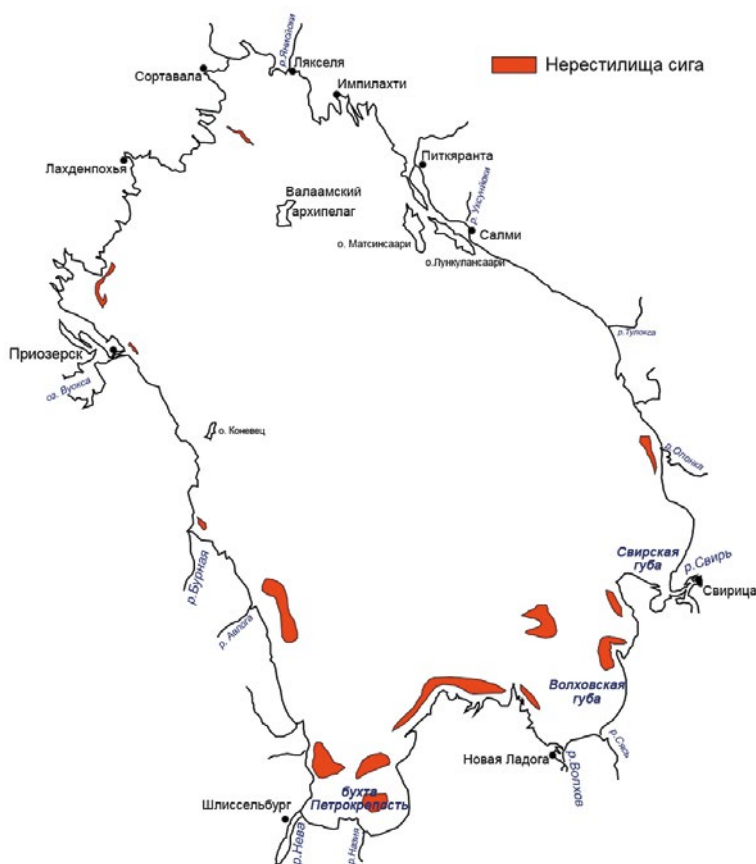


Рис. 9.10.1 – Расположение основных нерестилищ сегов в Ладожском оз.

В южной части озера основные нерестилища находятся между мысами Княжно (о. Птинов) и Песочким (около сел Кобона, Чёрное, Лигово, Дубно), часть нерестилищ расположена в районе маяка Сухо, у Шурыгского и Волчьего мысов; на северо-востоке – в районе мыса Габанов. На юго-западе нерестилища располагаются у Зеленецких островов, над мысами: Заячий,

Бугровский, Сосновец и Осиновец. На западном побережье нерестовые концентрации сигов отмечают на мелких каменистых лудах напротив Сосновского и Осиновецкого мысов, на Булатовой гриве (в 25–30 км от с. Морье вглубь озера), в районе о. Коневец. Нерестилища имеют преимущественно галечно-каменистое основание, изредка – песчано-галечное. Глубина, на которой нерестятся сиги, как правило, не превышает 2–5 м. Заполнение нерестилищ производителями колеблется по годам. Так, в 1998 г. оно составило по данным контрольного лова 9,98 кг/сутки на одну курляндку, в 1999 г. и 2003 г. – соответственно, 7,1 кг/сутки и 4,68 кг/сутки. В последние десятилетия из-за значительного загрязнения и заиливания, а также падения уровня озера, наблюдающегося с 1997 г., происходит прогрессивное сокращение площадей нерестилищ, многие из них теряют свое бывшее значение.

Наиболее важным фактором, влияющим на сроки нереста сигов, является температура воды. Начало нереста сигов в южной части Ладожского оз. приходится обычно на вторую половину октября и продолжается до первой половины ноября. При благоприятных для нереста метеоусловиях (тихой или маловетреной погоде, предпочитаемых сигами низких температурах воды и так далее) сиги нерестятся дружно в короткие сроки. И наоборот, нерест затягивается при установившейся в период размножения теплой погоде, в результате чего повышается температура воды на нерестилищах и сиги прекращают нерест. Промысловая часть стада ладожских сигов в последние годы в южной части водоема была представлена в основном 3–10-летними рыбами. Основу уловов составляют четырех-шестилетние возрастные группы, доля которых в улове равнялась 73,9%. В уловах 2019 г. по сравнению с последними годами наблюдений возросла доля трех-четырёхлеток, что, скорее всего, связано с прекращением специализированного промысла. В уловах экспериментального трала в 2019 г., как и в последнее пятилетие, преобладали рыбы в возрасте 3+ – 5+, на долю которых пришлось 61,7% численности уловов. Основные биологические параметры популяции сигов в уловах в последние годы были относительно стабильны, хотя средняя масса и длина сигов оставалась ниже среднепогодных показателей (табл. 9.10.2).

Таблица 9.10.2

Биологические показатели сига из промысловых уловов в Ладожском оз.
(Ленинградская область)

Показатели	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Ср.
Ср. длина, см	33,7	34,3	34,3	34,7	33,3	33,5	33,8	33,2	32,6	33,0	33,6
Ср. масса, г	471	503	523	538	449	473	457	458	385	437	469
Ср. возраст, годы	5,5	5,7	5,7	5,9	5,7	5,6	5,6	5,5	5,5	5,6	5,6

Ряпушка (*Coregonus albula* (L.)) распространена практически по всей акватории Ладожского оз. В южных районах ее скопления наблюдаются в январе – марте в акватории Волховской и Шлиссельбургской губ. Летом в южной части озера появление ряпушки связано с продолжительными северными ветрами. Здесь в хорошо прогреваемых районах ряпушка находит богатую кормовую базу. Однако более многочисленна она в северной поло-

вине Ладожского оз., где расположены ее основные места нагула и нереста. Для ладожской ряпушки характерно образование локальных стад, которые отличаются приуроченностью к определенным акваториям водоема в период нагула и размножения, имеют некоторые отличия в образе жизни и в размерно-возрастных показателях. Наиболее мелкая ряпушка – восточная, она же и самая многочисленная. Самая крупная ряпушка принадлежит к мантсинсаарскому стаду, самому малочисленному. Шхерная ряпушка занимает промежуточное положение: по размерам она почти не отличается от мантсинсаарской, а по численности приближается к восточной [Дятлов, 1978]. Нагуливается восточная ряпушка не только в восточном районе, но и у о. Валаам, а также у островов Западного архипелага – Меккерике, Ялаянсаари, Воссинансаари и вдоль западного побережья. Массовые концентрации восточной ряпушки, связанные с нагулом летом, наблюдаются дважды. Осенние скопления ряпушки сопряжены с размножением. В июне – июле восточная ряпушка образует массовые концентрации в районе рек Обжа и Видлица. Совершая кормовые миграции вдоль восточного побережья озера, в акватории о. Мانتсинсаари ряпушка обычно появляется во второй половине июня, где смешивается с местной популяцией. В июле восточная ряпушка подходит к юго-восточным районам у о. Валаам, где нагуливается до конца августа. В сентябре она совершает нерестовую миграцию к местам размножения вблизи островов Меккерике, Ялаянсаари и Воссинансаари.

Мантсинсаарская ряпушка не совершает миграций. Её ареал ограничен с севера полуостровом Уксалонпя, с юга – о. Мانتсинсаари, с юго-востока – о. Лункулансаари, а также омывающими его Уксунлахтинским и Уксинским заливами, Мантсинсаарским и Перьямансалминским проливами. Юго-восточная граница ее распространения приходится на Погранкондушскую мель [Дятлов, 1978]. Жизненный цикл шхерной ряпушки ограничен акваторией многочисленных заливов и шхер северной и северо-восточной части озера, но в отличие от мантсинсаарской ряпушки – шхерная совершает более длительные миграции к островам открытой части Ладожского озера – Тейясансари, Рантансари, Путсари, Валаам, Байевых, Крестовых и др. Основные нерестилища восточного стада ряпушки расположены в районе о. Коневец, заливах Тайполенлахти, Рисканлахти и бухты Вуохенсало [Покровский, 1953]. Нерест происходит на глубине от 5 до 15 м, в местах с песчано-галечными, каменистыми или песчано-илистыми грунтами. Сроки нереста зависят от гидрометеорологических условий, обычно это середина – конец октября. Заморозки в начале октября способствуют ускоренному охлаждению воды и более раннему, дружному нересту. Теплая осень продлевает преднерестовый период и приводит к задержке начала нереста.

Нерестилища мантсинсаарской ряпушки обнаружены в заливе Ювенинлахти, восточнее о. Мانتсинсаари и юго-восточнее о. Лункулансаари. Глубина в местах нереста 10–15 м [Дятлов, 1974; 1974а; 1978]. Начало нереста этой ряпушки приходится на третью декаду октября, а конец – на первую декаду ноября. Нерестовые участки шхерной ряпушки расположены севернее о. Кильпола, в заливах Сукмылахти и Халинселька, в проливах Маркатсимансалми и Хонкассалонселька, в районе о. Корписаари, восточнее и юго-восточнее полуострова Терву и о. Кухка. Нерестовые участки находятся в непо-

средственной близости от открытого плеса озера и от прибойной ладожской волны они защищены россыпью островов и лудами. Шхерная ряпушка откладывает икру на глубинах 5–30 м, чаще 15–20 м [Дятлов, 1978], обычно со второй половины октября до первой декады ноября. Температура воды на нерестилищах в начале нереста составляла 5,3–5,1 °С, в конце – 3,5–3,4 °С, а массовый нерест проходил при 4,2–4,3 °С [Дятлов, 1980] (рис. 9.10.2).

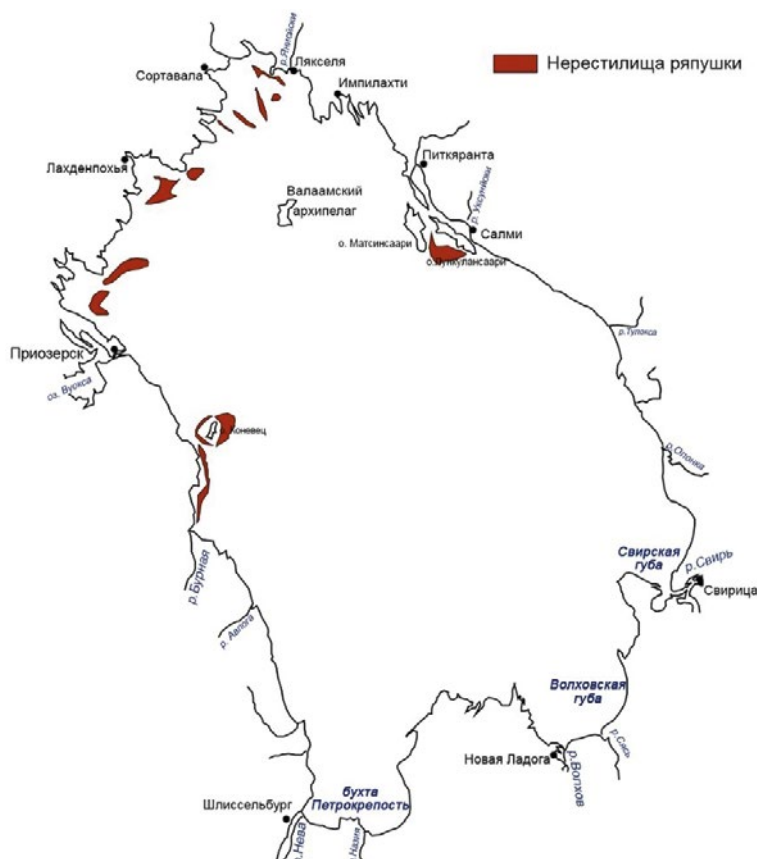


Рис. 9.10.2 – Основные нерестилища ряпушки Ладожского оз.

Ряпушка в промысловых уловах представлена особями в возрасте от одного до пяти лет. Основу промысловой части стада составляют рыбы возрастов – 1+ – 3+, доля которых обычно превышает 80% от улова. Средняя длина ряпушки по годам меняется сравнительно мало, а масса тела колеблется в довольно широких пределах. Максимальный прирост длины наблюдается у сеголетков ряпушки, в дальнейшем он снижается и вновь несколько повышается до максимальных величин у рыб в возрасте 3+. Для ряпушки, как короткоциклового вида, характерно раннее половое созревание. Так, свыше 50% рыб созревают уже в двухлетнем (1+) возрасте при длине 8,9–12,0 см и массе 5,8–11,9 г. В возрасте 2+ более 90% всех особей ряпушки становятся половозрелыми.

Корюшка европейская (*Osmerus eperlanus n. Ladogensis* Berg) в Ладожском оз. распространена повсеместно. Это наиболее многочисленная полупроходная рыба Ладоги. Ее нагул происходит в открытых акваториях озера, а размножение – в устьевых районах рек и губах, вблизи которых она образует огромные скопления. Можно выделить две экологические группы корюшки – крупную, обитающую в южной части озера, и более мелкую, или шхерную, привязанную к северной части водоема. Первая концентрируется в основном в прибрежных районах восточного побережья: южнее р. Олонки, в Волховской и Свирской губах, в предустьевых участках рек Волхов, Сясь и Свирь, а также в большей части южной акватории Ладожского оз. В северной части водоема такие скопления наблюдаются в предустьевых участках рек Тулома, Видлица, Тулокса, Олонка; в заливах Хиданселькя и Хаминселькя, в акватории островов Мантсинсаари и Лункулансаари [Архипцева, 1968]. Со второй половины зимы корюшка, образуя огромные преднерестовые концентрации, перемещается к восточному побережью Ладоги. Основные нерестилища расположены в устьевых участках рек, впадающих в Ладожское оз. (рис. 9.10.3).

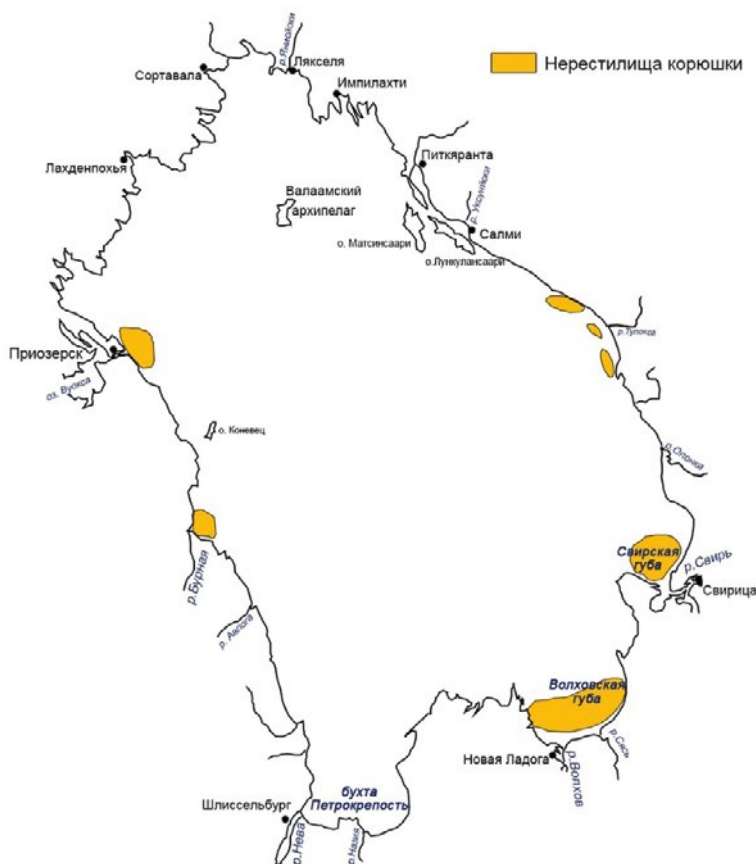


Рис. 9.10.3 – Основные нерестилища корюшки Ладожского оз.

Сроки её захода на нерест в разные реки не совпадают. Первой рекой, которая раньше других освобождается ото льда, является Волхов, затем вскрываются Свирь и Сясь, на одну-две недели позднее – Олонка и другие северные реки. Поэтому, например, продолжительность нерестового хода корюшки в р. Волхов составляет 20–45 суток, а в реки Свирь и Сясь – в среднем 20 дней, иногда 10–12. Частично она нерестится и в самом озере. Нерестилища располагаются преимущественно на плотных песчаных и песчано-каменистых грунтах на глубинах 1,5–3,0 м. В Волхове речные нерестилища расположены на глубине 2–3 м на песчаных и каменистых грунтах вдоль крутого правого берега реки [Маркун, 1926; Архипцева, 1975]. Начало нереста приходится обычно на конец апреля, когда температура воды достигает от 2,5 до 5 °С, а заканчивается он, как правило, в конце мая при температурах 12 °С и выше. В разгар хода температура воды составляет от 7 до 12,5 °С.

На нерест корюшка идет большими косяками, которые держатся преимущественно в русле рек, что обусловлено тем, что она избегает более прогретого побережья. По Волхову корюшка поднимается на 20–25 км от устья реки [Архипцева, 1975]. Продвижение рыб вверх по реке зависит от скорости течения, которое могут преодолеть только старшие особи в популяции [Маркун, 1926]. Для подхода корюшки к нерестилищам характерны несколько пиков, которые объясняются биологической неоднородностью производителей. Первый пик соответствует крупной корюшке, идущей с глубоких акваторий озера к устью рек еще подо льдом, при низкой температуре воды. Второй подъем – подходу мелкой корюшки, нерестящейся при более высоких температурах воды.

После нереста сеголетки корюшки, скатившись с нерестилищ, обитают в эпилимнионе с температурой 15–18 °С [Архипцева, 1977]. Рыбы в возрасте от 1 до 3 лет предпочитают глубины от 10 до 15 м, где температура равна 11–12 °С, а особи от 3 до 7 лет обитают главным образом на глубине 16–30 м, где температура летом колеблется в пределах 6–10 °С. В промысловых уловах встречается корюшка в возрасте от одного года до восьми лет, но основными промысловыми группами являются трех-четырёхгодовики, доля которых составляет около 80,0% от численности. Значение особей старших возрастных групп (шести-восьмилетки) в промысловых уловах незначительно.

Средняя длина разновозрастных рыб по результатам материалов, полученных во время нерестового хода корюшки, варьировала от 7,1 см до 22,1 см, масса – от 1,9 г до 100,0 г. Период созревания ладожской корюшки растянут от одного до трех лет. Зрелые годовики корюшки встречаются довольно редко, составляя в среднем около 1%. Массовое созревание корюшки отмечается в два-три года. В нерестовых частях популяций корюшки в различных водоемах преобладают самцы [Маркун, 1926; Архипцева, 1975]. Их доля в южной части Ладожского оз. в последние годы в среднем составляет около 57%.

Судак (*Sander lucioperca* L.) относится к хищникам, что обуславливает его широкое распространение по всей акватории Ладожского оз. Ему принадлежит роль важнейшего биологического мелиоратора и регулятора чис-

ленности рыб в водоеме. Для ладожского судака характерны длительные кормовые миграции вслед за перемещениями косяков ряпушки и корюшки. В прибрежных районах судак держится лишь в первые годы жизни, предпочитая открытые участки с чистой водой. В северной части Ладоги судак встречается повсеместно, но придерживается прибрежной зоны и глубин до 12 м. Его наиболее значительные концентрации наблюдаются осенью в акватории озера от устья р. Тулоксы до Дедовых островов, а также в районе о. Мантсинсаари, Воссинансаари и Валаамского архипелага. В южной части озера в подледный период в январе – марте судак образует промысловые концентрации в районе Сторожно в Волховской губе. Его преднерестовые скопления происходят в апреле – начале мая на глубине до 30–35 м [Ковалёва, 1956] ещё подо льдом. Со второй декады мая наиболее плотные скопления судак образует на глубине 25–29 м, а в июне нерестовый судак скапливается на глубине от 3 до 16 м.

По данным М. Н. Ковалевой [1956], передвижение судака к местам размножения состоит из трех стадий. В первую стадию судак подходит на относительно мелководные участки с глубиной 25–20 м и температурой в придонном слое воды 5 °С (совпадает с полным распаением льда). Во вторую – в июне судак приближается к берегу на глубину от 16 до 6 м, где температура придонного слоя воды составляет уже 8–9 °С. В этой акватории озера он держится довольно долго. В третью стадию нерестующий судак концентрируется на глубине от 2,5 до 10–12 м при температуре воды 11–19 °С. Постепенное передвижение судака к местам нереста автор связывает с процессом созревания половых продуктов.

Основные нерестилища судака находятся в Волховской губе – м. Волчий Нос – Кириково – Княжо, а в Шлиссельбургской – от м. Песочный Нос до Варецкой банки. Вдоль западного побережья в районе Сухоневской банки (рис. 9.10.4).

Обычная глубина на нерестилищах 3–8 м. Судак мечет икру в прибрежных участках на песчаных, песчано-галечных, каменистых грунтах, а также на грунтах, покрытых корнями водных растений. Для судака Ладожского озера характерно образование нерестовых гнезд, икра в которых охраняется самцами [Ризванов, 1971]. Нерест судака в Ладожском оз. обычно начинается в III декаде мая при температуре воды 14–16 °С и длится в зависимости от температуры воды от 10 до 30 суток. Первыми подходят самцы, они же последними покидают нерестилища. В целом самцы доминируют в нерестовой части стада в местах размножения: в начале и конце хода их количество превышает численность самок в 2–5 раз, в разгар хода соотношение самцов и самок выравнивается.

В вегетационный период судак нагуливается в Волховской, Свирской и Шлиссельбургской губах, его скопления бывают весьма значительны вдоль западного побережья озера на глубине от 3 до 39 м, а максимальные концентрации – на глубине 6–15 м. Наиболее благоприятные условия обитания в зимнее время судак находит на глубине от 24 до 35 м, где придонная температура воды остается более высокой, чем в прибрежье. Зимой судак в значительных количествах наблюдается в районе Сторожно и Олонки.

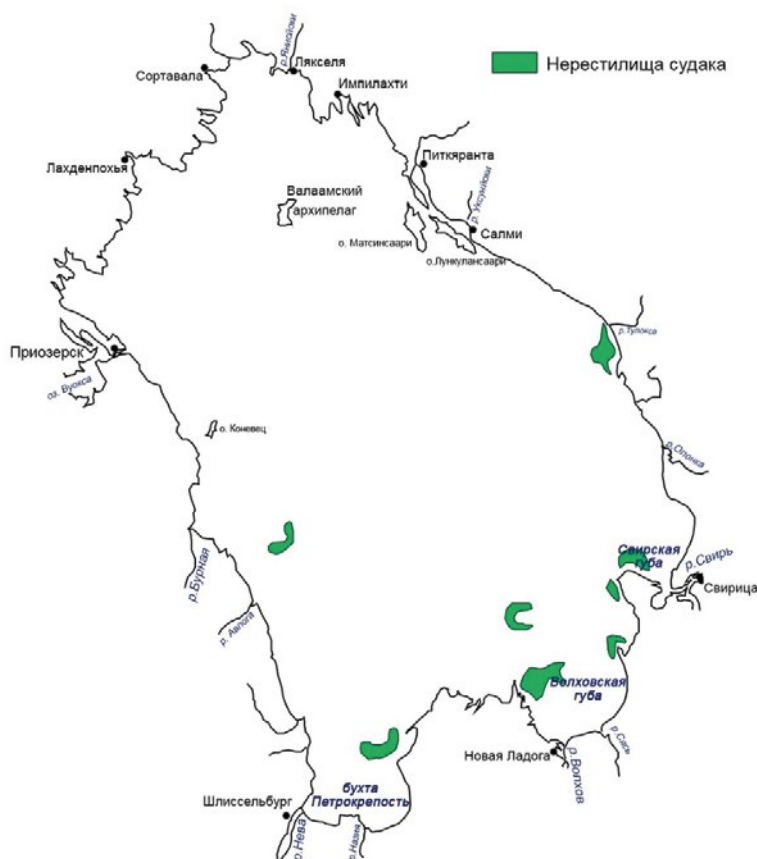


Рис. 9.10.4 – Основные нерестилища судака Ладожского оз.

В последнее десятилетие основу промышленных уловов судака составляют пяти-восьмилетние особи (в среднем 80% улова). Возрастной ряд промысловых уловов рыб этого вида включает особей в возрасте от трех до 12–13 лет. В 2019 г. около 40% всего вылова судака в штучном выражении дали пяти-шестилетние особи. В промысловых уловах ладожского судака в 2019 г. средний возраст, длина и масса судаков по сравнению с прошлогодними показателями выросли, а средняя масса даже превысила среднемноголетний показатель (табл. 9.10.3).

Таблица 9.1.3

**Биологические показатели судака из промысловых уловов в Ладожском оз.
(Ленинградская область)**

Показатели	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Среднее
Ср. пром. длина, см	52,0	54,5	51,0	49,1	51,8	51,3	48,2	49,1	49,6	50,5	50,7
Ср. масса, г	1862	1993	1799	1598	1871	1872	1534	1584	1437	1812	1736
Ср. возраст, годы	7,0	7,3	6,7	6,4	6,9	6,9	6,4	6,5	6,6	6,8	6,8

Лещ (*Abramis brama* L.) наиболее ценный представитель карповых рыб Ладожского оз., обитает в основном в южной его части: в Шлиссельбургской, Волховской и Свирской губах. В северной части озера лещ довольно обычен в районе о. Мانتсинсаари, в заливах Лункуланлахти и Ууксинском. Общая плотность распределения его по всему озеру – 0,725 экз./га. (0,4 кг/га). В местах наибольших скоплений его численность достигает 3–10 кг/га. Скопления леща зимой приурочены к районам озера, характеризующимся зарослями или илисто-песчаными грунтами и глубиной до 10 м, а наиболее плотные его концентрации находятся в зоне влияния речных вод [Ковалева, 1956]. Наиболее активен лещ в вегетационный период, когда он интенсивно питается на мелководных хорошо прогреваемых площадях наиболее кормного песчаного биоценоза на глубинах до 15 м. Нерестилища леща отмечаются в устьях рек (Свирь, Вуокса, Бурная, Хитола, Куркийоки, Олонка и др.), а также вдоль южного побережья в Волховской, Свирской (Загубье) и Шлиссельбургской губах на глубине от 0,8 до 2 м. Хорошая прогреваемость воды, наличие высшей водной растительности и высокая кормность водоема создают благоприятные условия для нагула и нереста леща (рис. 9.10.5).

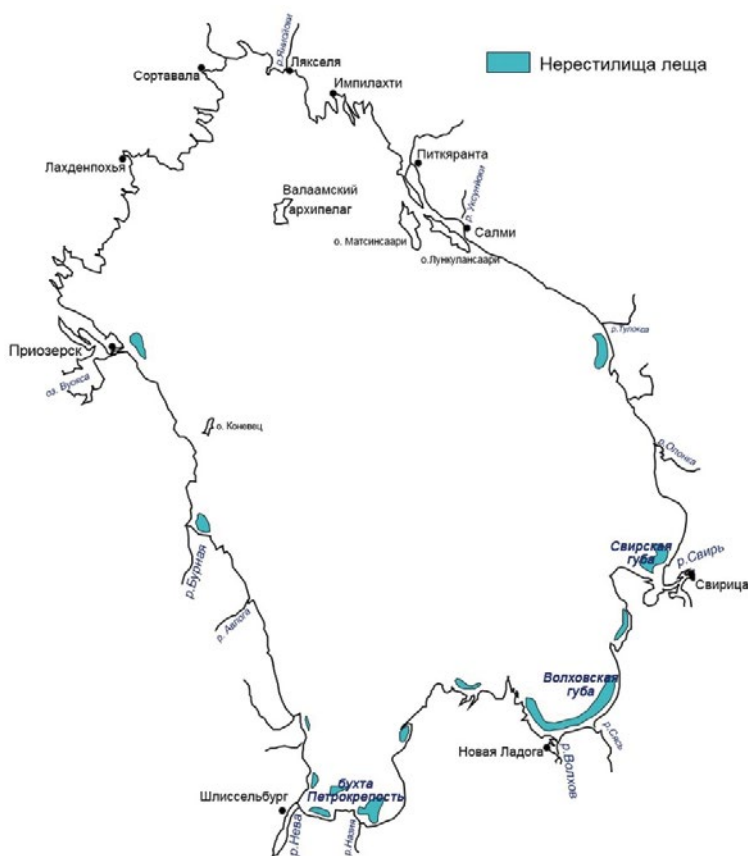


Рис. 9.10.5 – Основные нерестилища леща Ладожского оз.

Нерест леща в южной Ладоге начинается в мае, в северной – в мае – июне, при температуре воды – от 13 до 18 °С (массовый нерест при 16–17 °С). Икру откладывает на водную растительность в прибрежных участках и заливах, защищенных от волнений. Среди весенне-нерестующих рыб лещ размножается одним из последних, сроки нереста существенно варьируют в зависимости от гидрометеороусловий в период размножения. Понижение температуры воды в период икрометания приводит к прекращению икрометания, которое возобновляется вновь при прогреве воды. Соотношение самцов и самок у впервые нерестующих рыб близко 1:1, а у повторно размножающихся особей количество самцов на нерестилищах превышает численность самок в начале нереста в 3 раза, в разгар – в 2, и в конце – в 4 раза. Преобладание самцов на нерестилищах объясняется тем, что они раньше приходят к местам размножения и остаются на них после ухода отнерестившихся самок [Чижикова, 1974].

В промысловых уловах лещ южной Ладоги представлен особями в возрасте от 5 до 14–15 лет. В 2018 и 2019 гг. рыбы старше 13-летнего возраста в уловах отмечены не были. В 2018 году около половины годового вылова леща составили 7–8-летние рыбы – 45,8%, а в текущем году пик вылова пришелся на 6–7-летних рыб – 48,1%.

В последние годы в траловых уловах преобладают особи младших возрастов (4+ – 6+) и наблюдается сокращение возрастного ряда популяции. В 1970–1971 гг. основу траловых уловов составляли рыбы в возрасте 6+ – 10+ (70%), в 1978 г. – 6+ – 9+ (80%), в 1982 г. более 70% приходилось на возрастные группы 4+ – 8+ [Щацаев, Шеврыгин, 1983]. В экспериментальных траловых уловах в 2019 г. доминировали 5–7-летние рыбы, удельный вес которых составлял 66,2%, доля леща старших возрастных групп (11+ и старше) крайне мала – 0,8%. Высокие и стабильные линейные приросты характерны для рыб молодого возраста (2–3 см в год), максимальный рост приходится на год вступления в половую зрелость (в среднем 4–5 см в год). С девятилетнего возраста линейный рост леща крайне незначителен. Весовой рост интенсивнее проходит в старших возрастных группах. Массовое половое созревание леща наблюдается в возрасте 7–9 лет. Отдельные самцы достигают половой зрелости в 6–7 лет, а самки – в 7–8 лет [Чижикова, 1978]. Самцы леща превалируют над самками в младших возрастных группах, а в старших возрастах, наоборот, самки доминируют над самцами. Среди рыб старше 15 лет самцы отсутствуют, в связи с их более ранним половым созреванием и ранней смертностью.

Плотва (*Rutilus rutilus* L.) в Ладожском оз. распространена повсеместно, но наиболее многочисленна она в Волховской и Шлиссельбургской губах, несколько меньше ее в Свирской губе. Часть популяции постоянно обитает в мелководных заливах западного побережья Ладоги. Зимует плотва в районах озера с наличием в них зарослей подводной растительности и глубиной от 2 до 8 м. Наиболее массовые её скопления в этот период сосредоточены в устьях небольших речных притоков (Лава, Кабона, Волховец, Воронег и др.), что связано с присутствием в них растительности и небольших течений [Ковалёва, 1956]. Преднерестовые скопления плотвы образуются еще подо льдом, затем сосредотачиваются в Свирской, Волховской и Шлиссель-

бургской губах на глубинах от 8 до 0,5 м. Плотва нерестится весной, в конце апреля – начале мая. После распадения льда, при прогреве воды до температуры 8–12 °С, плотва концентрируется на нерестилищах, откладывая икру на водную растительность, затопленные кустарники, коряги на глубине от 0,5 до 3 м. Заканчивается нерест при температуре от 11 до 14 °С. Соотношение самцов и самок на нерестилищах близко 1:1 (рис. 9.10.6).

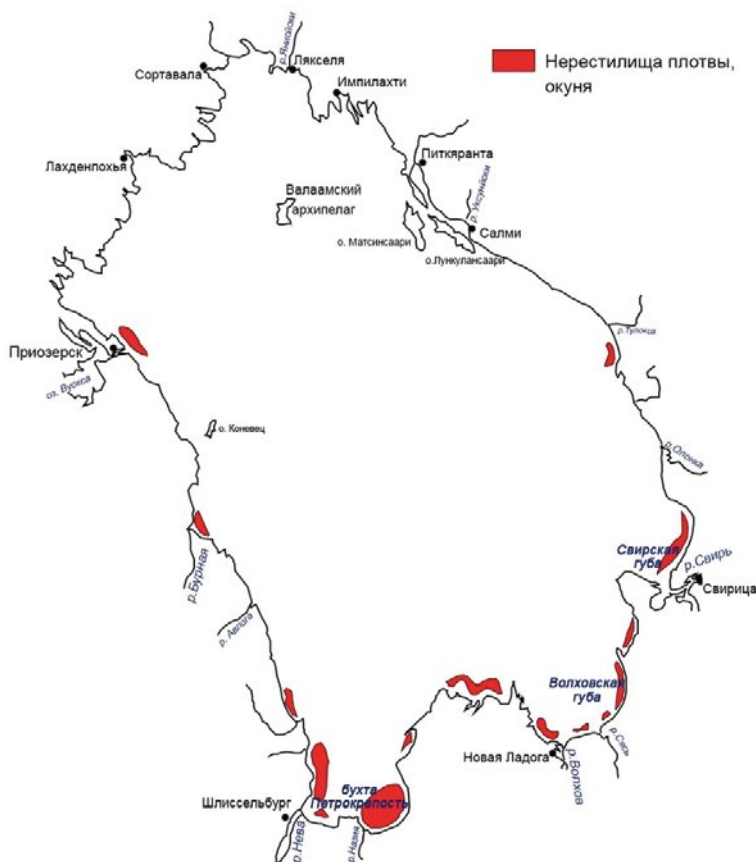


Рис. 9.10.6 – Основные нерестилища плотвы и окуня Ладожского оз.

После нереста плотва начинает интенсивно питаться и скапливается в районах концентрации её излюбленного животного (понтопорея, палладея) и растительного корма, в наиболее продуктивной прибрежной зоне на глубине от 2 до 15 м. Придонная температура на местах пастбищ плотвы в июле составляет от 10 до 13 °С, в августе – 12–15 °С, в сентябре – 10–12 °С. С понижением температуры воды в октябре – ноябре интенсивность питания плотвы резко падает, и она начинает подходить на места зимовки.

Плотва в промысловых уловах в последние годы представлена десятью возрастными классами. В 2019 г. одиннадцатилетних рыб в уловах зафиксировано не было, преобладали рыбы в возрасте 5+ – 7+, доля же старших возрастных групп (9+ – 10+) не превышала 6%. В уловах эксперименталь-

ного трала в 2019 г. преобладали рыбы в возрасте 4+ – 6+, на долю которых пришлось 70,9% численности уловов. Доля старших возрастных когорт (9+ – 11+) последние годы падает. Так, в 2017 г. она составляла 5,3%, в 2018 – 4,1%, а в исследуемом году только 2,3%. Рыбы старше десятилетнего возраста в 2019 г. в траловых уловах не встречались. Темпы линейного роста плотвы максимальны до наступления половой зрелости (в среднем 2–4 см в год), весовые же приросты наиболее значительны у рыб старше 5-летнего возраста. Темп роста и линейные размеры плотвы за последние годы существенно не изменились, что говорит о стабильном состоянии популяции. Массовое созревание у ладожской плотвы наступает на 4-м году жизни. В нагульный период в младших возрастных группах самцы плотвы превалируют над самками, а рыбы старше 10 лет представлены только самками.

Окунь (*Perca fluviatilis* L.) в Ладожском оз. распространен повсюду. Для него характерно образование двух экологических форм: одна из них представлена мелкими тугорослыми особями, созревающими на 2–4-м году жизни, другая – крупные рыбы, ведущие хищный образ жизни и созревающие на 5–7-м году жизни. Это так называемая пелагическая форма окуня [Ширкова, 1956]. Численность крупного окуня незначительна, он предпочитает обитать в открытых и глубоких участках литоральной зоны, активно потребляя рыбу. Мелкий окунь нагуливается в прибрежных акваториях практически по всему озеру, активно питаясь зоопланктоном, частично бентосом и молодью рыб.

В южной части Ладожского оз. наибольшие концентрации окуня наблюдаются в прибрежных районах на глубине до 15 м. Зимние скопления окуня зафиксированы на глубине от 3 до 10 м. После распаления льда в апреле окунь начинает перемещаться ближе к берегам на глубину от 2 до 8 м, а в период нереста образует значительные концентрации на глубине в 2–4 м. Основные нерестилища окуня находятся в южной части озера (рис. 9.10.6). Мелкая форма окуня нерестится раньше крупной, осваивая заросли растительности на глубине до 1,5 м. Ранний нерест мелкого окуня часто приводит к значительным потерям икры и личинок, вызванных неблагоприятными природно-климатическими условиями среды в период размножения: заморозки, ветры северных румбов, нагромождения льдин и т. д. Крупная форма окуня предпочитает нереститься на песчано-каменистых грунтах на глубине до 2–3,5 м. Сроки размножения окуня отличаются по годам и полностью зависят от температурных условий в период, предшествующий нересту и во время выметывания половых продуктов. Обычно нерест окуня начинается во второй-третьей декаде мая при температуре воды 8 °С, а заканчивается в первой декаде июня при температуре 14–16 °С.

В нерестовой части мелкой формы окуня в начале и в конце размножения преобладают самцы, в разгар – соотношение полов выравнивается. У крупной формы окуня доминируют самки. По мнению А. П. Ширковой [1955] резкое преобладание самок над самцами у пелагического окуня объясняется более продолжительным жизненным циклом самок: с 4–5-годовалого возраста количество самок у крупного окуня возрастает, а с 6-годовалого – встречаются только самки. После нереста основная масса окуня концентрируется в придонных участках с глубиной от 5 до 12–15 м, а пелагическая

форма окуня выходит в июле – августе за пределы 15-метровой изобаты, нагуливаясь в поверхностных слоях воды.

Возрастной состав промысловых уловов окуня испытывает по годам довольно значительные колебания. В исследуемом году основу промышленных уловов дали рыбы в возрасте 4,4+ и 6,6+, причем более половины всего объема добычи пришлось на долю пяти-шестилеток. В уловах экспериментального трала последние годы отмечены особи в возрасте от 2+ до 10+. В 2019 г. преобладали рыбы в возрасте 3+ – 5+, на долю которых приходилось 68% численности уловов.

Темп роста окуня заметно увеличивается после перехода на хищное питание, максимальные приросты характерны для особей в возрасте 4–6 лет (до 3–5 см и 30–50 г в год). Различий в темпе роста самцов и самок не наблюдается, хотя в отдельных возрастных группах самки несколько крупнее самцов. В популяции окуня южной части Ладожского оз. в нагульный период в младших возрастных группах преобладают самцы, а в старших доминируют самки. Самцы окуня созревают в возрасте 2–4 лет, а самки – в 3–5 лет.

Ёрш в Ладожском оз. является широко распространенным видом, обитающим в прибрежных мелководьях и в открытой части водоема до глубины 40 м [Правдин, 1956; Титенков, 1956]. Особенно много ерша в Волховской, Свирской и Шлиссельбургской губах [Фёдорова, 1977], где он придерживается изобат до 20-метровой глубины. Ёрш является не только промысловым видом, но и находится в сложных биотических связях с другими рыбами [Фёдорова, 1991]. С одной стороны, ёрш типичный бентофаг, потребляющий, главным образом, амфипод (60% понтопорей), а также личинок хирономид и мизид [Биркан, 1980]. В этом отношении он имеет значительное пищевое сходство с лещем и сигами [Тихомирова, 1975; Тихомирова, Болотова, 1977; Биркан, 1980]. В литературе имеются указания на то, что ёрш в значительных количествах потребляет во время нереста икру корюшки [Сальдау, 1956; Титенков, 1956], а в 1976–1978 гг. В.П. Биркан [1980] наблюдал массовый подход ерша к нерестилищам сиговых рыб в южной части озера.

С другой стороны, ёрш сам является важнейшим компонентом питания основных хищных рыб Ладожского оз. [Мохов, 1980; 1982; Федорова, 1980; Федорова, Дрозжина, 1980; 1982]. Расчёты этих авторов показали, что в течение вегетационного периода хищные рыбы в Ладожском оз. потребляют около 2100 т ерша, тем самым сдерживая его численность. Ёрш является типично порционно нерестящейся рыбой. Размножается он в прибрежной зоне, используя песчаный и песчано-галечные грунты, с конца апреля – начала мая и до конца июля.

Рыбные запасы и их промысловое использование. Несмотря на значительное многообразие видов рыб, обитающих в водоеме, только немногие из них имеют реальное промысловое значение. Во второй половине XX и в начале XXI века это представители четырех семейств – корюшковые, сиговые, карповые и окуневые. На их долю в период с 1946 по 2019 г. приходится 97% от всей добываемой в Ладожском оз. рыбы. Около половины общих уловов дают ценные короткоциклового вида – корюшка и ряпушка. Удельный вес корюшки в ладожских уловах на всем протяжении исследуемого периода не падал ниже 30% – в период с 1946 по 1970 г. он в среднем

составлял 37%, в период с 1971 по 1999 г. упал до 33%, в новом тысячелетии опять поднялся до 37% (рис. 9.10.7).

Доля ряпушки в годовом вылове рыбы на озере была максимальна в последнее тридцатилетие XX века, когда в полную силу проводился специализированный лов рыб этого вида. В настоящее время самыми ценными ладожскими видами рыб, сохраняющими промысловое значение, являются сиги и судак. Удельный вес судака во второй половине XX века составлял в период с 1946 по 1970 г. – 11% общих годовых уловов. С 1971 г. по конец второго тысячелетия доля судака возросла до 14%, а в XXI он упал до 9%. Удельный вес сига с середины прошлого века сократился с 9 до 4% (2000–2019 гг.). Доля частиковых видов рыб (окунь, плотва, лещ) в годовых уловах на озере в новом тысячелетии по сравнению с XX веком выросла в 1,5–2 раза, что можно объяснить изменением климатических условий.

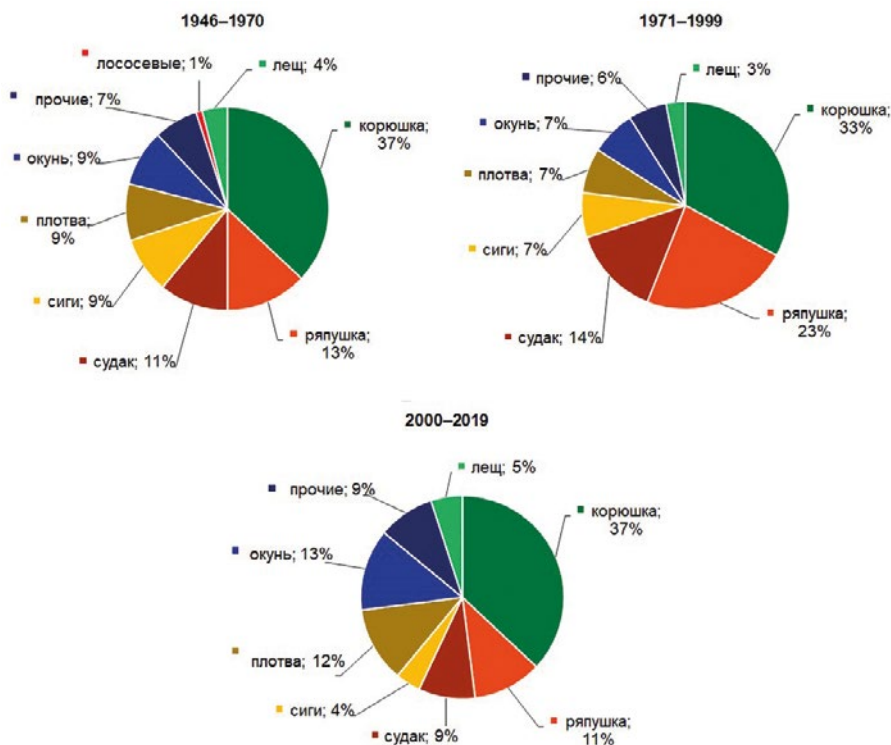


Рис. 9.10.7 – Удельный вес основных промысловых видов рыб в уловах в Ладожском оз.

К отдельной группе относятся наиболее ценные в промысловом отношении озерно-речные рыбы – атлантический осетр (практически вымерший в недавние годы), озерный лосось, озерная форель, озерно-речные сиги. Промысел этих видов в настоящее время не ведется. Атлантический, балтийский осетр, волховский сиг, озерная кумжа, форель и лосось занесены в Красную книгу России [Красная книга..., 2019]. В Красную книгу Карелии занесены жерех, линь, белоглазка, синец, чехонь, сырть, сом и некото-

рые другие карповые рыбы, как очень малочисленные и обитающие в северной части озера на границах своих ареалов [Красная книга..., 1995].

На протяжении последних семи десятилетий (1946–2019 гг.) уловы рыбы в Ладожском озере изменялись в пределах от 1634 т (1959 г.) до 7040 т (1978 г.), или в 4,3 раза (рис. 1,4 в Главе 1). В расчете на гектар акватории они составляли от 0,9 до 3,8 кг/га. Среднегодовой вылов за этот период составил 3860 т. Послевоенный период с 1946 по 1954 г. можно охарактеризовать как период возрождения рыболовного промысла на Ладожском озере. Произошло восстановление тралового лова, замена парусно-гребного флота моторным, значительное увеличение количества ставных сетей. В 1946 г. число ставных сетей составляло лишь 1,0 тыс. шт., а к 1954 г. оно достигло 5,2 тыс. шт., причем с 1951–1952 гг. хлопчатобумажные сети начинают заменяться более уловистыми капроновыми. Быстро увеличивался траловый флот: если в 1945 г. было 4 тральщика, то к 1953 г. их стало уже 20. Средний годовой вылов рыбы за рассматриваемый период на Ладоге составил 3282 т с колебаниями от 1642 т (1946 г.) до 4334 т (1951 г.)

В 1955–1966 гг. в промысле на озере происходят большие изменения. В связи с резким сокращением запасов и уловов сига с 1955 г. на всем озере запрещается траловый промысел, а с 1960 г. вводится лимитирование годовых уловов сига и судака. Эти охранные мероприятия, наряду с другими покровительственными мерами (в том числе ограничением добычи сига и судака в период нереста), остаются в силе до настоящего времени. Происходит замещением тралового промысла сетным, так, в 1964 г. насчитывалось почти 8 тыс. ставных сетей. Перестройка характера промысла привела к сокращению добычи рыбы. В этот период уловы колебались около величины 2,3 тыс. тонн. В 1959 г. был зафиксирован минимальный вылов рыбы на водоеме за весь послевоенный период.

В период, охватывающий 1967–1974 гг., наблюдается дальнейшее развитие сетного промысла и расширение моторизованного лова с сетеподъемников. В 70-х годах число сетей достигло 7,6–9,5 тыс., а количество сетеподъемников составило 51–56 шт. В этот период, по сравнению с предыдущими годами, сетеподъемники отличаются большой маневренностью, благоустроенным жилым помещением, оснащены поисковой техникой и потому могут обеспечить высокие уловы. При этих условиях средняя за период добыча рыбы в Ладожском оз. выросла до 4,6 тыс. т.

Следующие 15 лет рыболовство на Ладожском оз. было наиболее успешным. Общие уловы находились на самом высоком уровне за весь послевоенный период, составляя в среднем 5,9 тыс. т в год. В 1978 г. зафиксирован максимальный улов рыбы – 7040 т. Вылов судака в 1984–1987 гг. составлял более 1000 т, а уловы озерных сига – около 400 т. В последнее десятилетие XX века наблюдалось падение уловов. Оно связано как со снижением запасов, так и с переходом страны на новые формы хозяйствования. К 1999 г. уловы упали до 2570 т, в том числе судака – до 390 т, сига – до 170 т, что сопряжено не только с уменьшением запасов рыб, но и с изменением существовавшей системы учета вылова.

В начале нового тысячелетия ладожское рыболовство стало хотя и с трудом приспосабливаться как к новым экономическим условиям, так и к при-

родным изменениям, что привело к некоторому росту уловов. В период с 2000 по 2015 г. средний вылов рыбы поднялся до 3300 т (1991–1999 гг. – 2860 т), правда, в уловах стали преобладать малоценные виды. Последние четыре года произошло очередное падение уловов рыбы на озере в среднем до 2550 т. Это падение вызвано в первую очередь недоловом основной промысловой рыбы Ладоги – корюшки – из-за аномальных погодных условий в период весенней путины. Также на сокращение уловов повлиял и общий экономический спад в стране.

Для показателей общих уловов рыбы в Ладожском оз. характерна специфическая динамика, которая определяется термином «долгопериодная». Она выглядит в виде волны общей протяженностью по времени около 50–60 лет. С начала 60-х годов XX века наблюдался переход от низкого к высокому уровню уловов, который сменился относительно выровненным плато в 70–80-е годы со среднегодовыми уловами в 5740 т. В последние годы прошлого века динамика уловов переходит в понижающуюся ветвь со среднегодовыми уловами около 2900 т. В первое десятилетие XXI века наметился рост общих уловов со среднегодовыми показателями порядка 3300 т. Описанная динамика аналогична наблюдающейся в Балтийском море и может быть связана с естественными крупномасштабными изменениями продукционного потенциала водоема [Кудерский, 2009; 2011].

Оценка трофического статуса водоема, как правило, базируется на количественных зависимостях показателей биологической продуктивности вод от содержания в них элементов минерального питания (азота и фосфора), обеспеченности которыми оказывает определяющее влияние на развитие и фотосинтез фитопланктона [Винберг, 1960; Бульон, 1983] и определяет и промысловую рыбопродуктивность Ладожского оз. (табл. 9.10.6). Для показателей общих уловов рыбы в озере характерна специфическая динамика, которая определяется изменением общего трофического статуса водоема (табл. 9.10.4). Переход от низкого к высокому уровню продуктивности водоема и уловов (начало 70-х годов XX века) сменился относительно выровненным плато в 70–80-е годы со среднегодовыми уловами в 5894 т. В последние годы прошлого века и в самом начале XXI века показатели трофности центральной части Ладожского оз. переходят в понижающуюся ветвь и сопровождаются среднегодовыми уловами около 2900 т.

Таблица 9.10.4

Средние для этапов данные о трансформации и общем вылове водных биологических ресурсов (ВБР) в Ладожском оз. [Расплетина, 2006; Петрова и др., 2005]

Средние показатели	Этапы			
	1959–1962	1976–1983	1984–1995	1996–2005
Фосфорная нагрузка (т Р общ./год)	2430	7100	6040	3580
Концентрации общего фосфора (мкг Р _{общ} /л)	10 <	25	20	16
Концентрации минерального фосфора (мкг Р _{мин} /л)	3,0	11,0	8,0	4,5
Сырая биомасса суммарного фитопланктона (мг/л), средняя за летний период в слое 0–2 м	0,8	2,0–3,1	1,6	1,5
Общий вылов ВБР (среднее), т	2370	5894	4722	2936

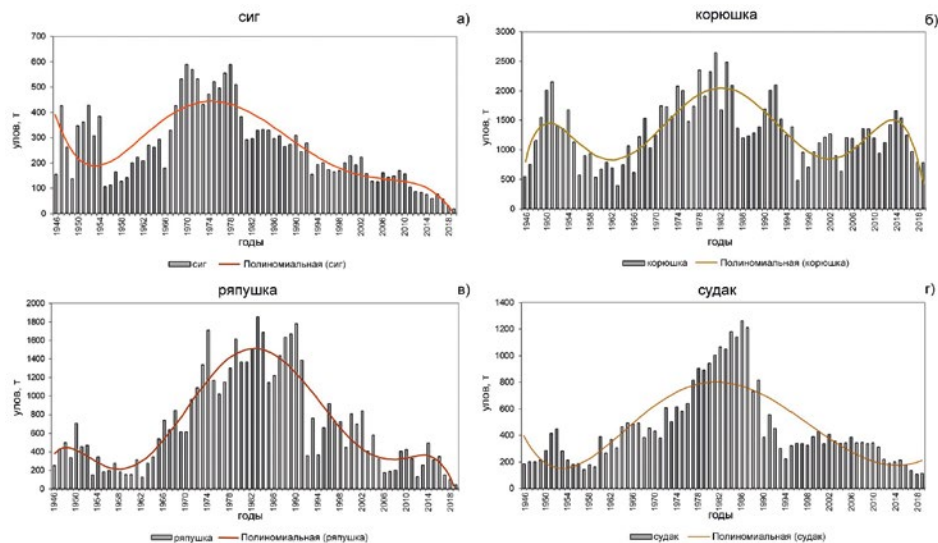


Рис. 9.10.8 – Динамика годовых уловов сига (а), корюшки (б), ряпушки (в), судака (г) в Ладожском оз. за период 1946–2019 гг.

Основные промысловые виды рыб Ладожского оз. можно условно разделить на две экологические группы: озерные и прибрежные. К озерным видам относятся такие промысловые рыбы, как сиг, судак, ряпушка и корюшка, нагул и зимовка которой проходит в открытой части озера. Как видно из рис. 9.10.8, уловы устойчиво снижаются. Так, одним из регуляторов численности промыслового стада сегов является объем кормовой базы в местах нагула. Нагульные акватории сига связаны с глубоководными районами озера [Федорова, Болотова, 1977]. Показано, что основным (до 98%) кормовым объектом половозрелых сегов Ладожского оз. являются амфиподы [Тихомирова, Болотова, 1977]. В последние годы в южной части Ладожского оз. на глубинах более 10 м наблюдается прогрессивное снижение количественных характеристик макрозообентоса, составляющего кормовую базу сегов. В местах нагула сига значения плотности поселения и биомассы донных животных находятся на нижней границе пределов их колебаний, отмеченных почти за двадцатилетний период. Возможно, на динамику запасов сегов оказывает влияние период аномально теплых зим, когда в водоеме резко сокращается продолжительность периода зимней стагнации. В результате нарушается нормальный цикл естественного воспроизводства осенне-нерестующих видов рыб. Отрицательная динамика уловов судака с 2007 г. происходит в первую очередь из-за несовершенства системы распределения квот, сокрытия части его уловов от учета и прекращения лова судака небольшими рыбодобывающими организациями. Флуктуации численности ряпушки нельзя объяснить антропогенным влиянием. Промысловая нагрузка на стадо рыб данного вида в новом тысячелетии не превышала 15% от ихтиомассы промыслового запаса. Экологическая обстановка в районе нагула и нереста за последние 15 лет, после закрытия Приозерского ЦБК, улучшилась. На сокращение численности этого холоднолюбивого вида, ско-

рее всего, повлияло общее потепление климата. Короткопериодные колебания численности корюшки зависят в основном от промысловой нагрузки, незначительной в отдельные годы по экономическим причинам, биологических особенностей рыб со сравнительно коротким жизненным циклом и гидрометеорологических условий в период нереста и инкубации икры.

В отличие от рассмотренных четырех озерных видов, динамика уловов прибрежных рыб практически не совпадает с охарактеризованной выше схемой долгопериодной цикличности. Из основных промысловых видов рыб Ладоги к прибрежным видам относятся лещ, плотва и окунь. Они обитают преимущественно в губах и мелководной прибрежной зоне, и лишь некоторые из них частично выходят в открытые участки. Отличия динамики уловов частиковых рыб от долгопериодной схемы обуславливаются особенностями их экологии – эти виды обитают в мелководной прибрежной зоне, южных заливах и приустьевых участках рек, что определяет свой характер связей с условиями среды. В частности, значительное влияние на динамику численности этих рыб может оказывать урвненный режим и, в последнее время, общее потепление климата. Их уловы имеют тенденцию к возрастанию (рис. 9.10.9), что может быть связано и с повышенным содержанием биогенных элементов и, соответственно, кормовой базы в прибрежных водах.

Озерные формы сивого и судака – наиболее ценные ладожские виды рыб, пользующиеся повышенным потребительским спросом и сохранившие до настоящего времени промысловое значение. За последние двадцать лет динамика уловов этих видов рыб имеет устойчивую тенденцию к снижению. Наблюдается снижение промысловых параметров и биологических показателей: возрастного состава, среднего возраста и размеров как сивого, так и судака. Среди причин, определивших современное состояние запасов и промысла этих видов рыб, выделяются природные и антропогенные. Первые полностью еще не изучены и, скорее всего, связаны с глобальными климатическими изменениями и соответствующей перестройкой ихтиоценоза водоема, а также с сокращением поступления биогенных элементов в озеро и низкими показателями кормового зообентоса. На природный фактор воздействия на водоем накладываются различные антропогенные влияния. Это неудовлетворительное экологическое состояние водоема и мест нереста, несоблюдение действующих Правил рыболовства, интенсивный браконьерский лов, в т. ч. на нерестилищах, необъективность статистической отчетности, мизерный объем работ по искусственному воспроизводству.

Для короткоцикловых озерных видов промысловых рыб (корюшка и ряпушка) характерно чередование сезонов с высоким уровнем изъятия – до 40–70%, с гораздо более низким – до 10–15%. Это, видимо, связано с их коротким жизненным циклом – вылов корюшки и ряпушки даже при интенсивном промысле не достигает их коэффициента естественной смертности. Половая зрелость у этих рыб наступает, как правило, в двухгодичном возрасте, и в нерестовом стаде пополнение превышает остаток. Такая особенность обеспечивает высокую воспроизводительную способность популяций этих рыб и их сегодняшнее состояние не вызывает тревоги, несмотря на падение их уловов. В ближайшей перспективе на состояние запаса холоднолюбивой ряпушки отрицательное воздействие могут оказывать

только природные факторы и в первую очередь потепление климата. Увеличения промысловой нагрузки в обозримом будущем не предвидится.

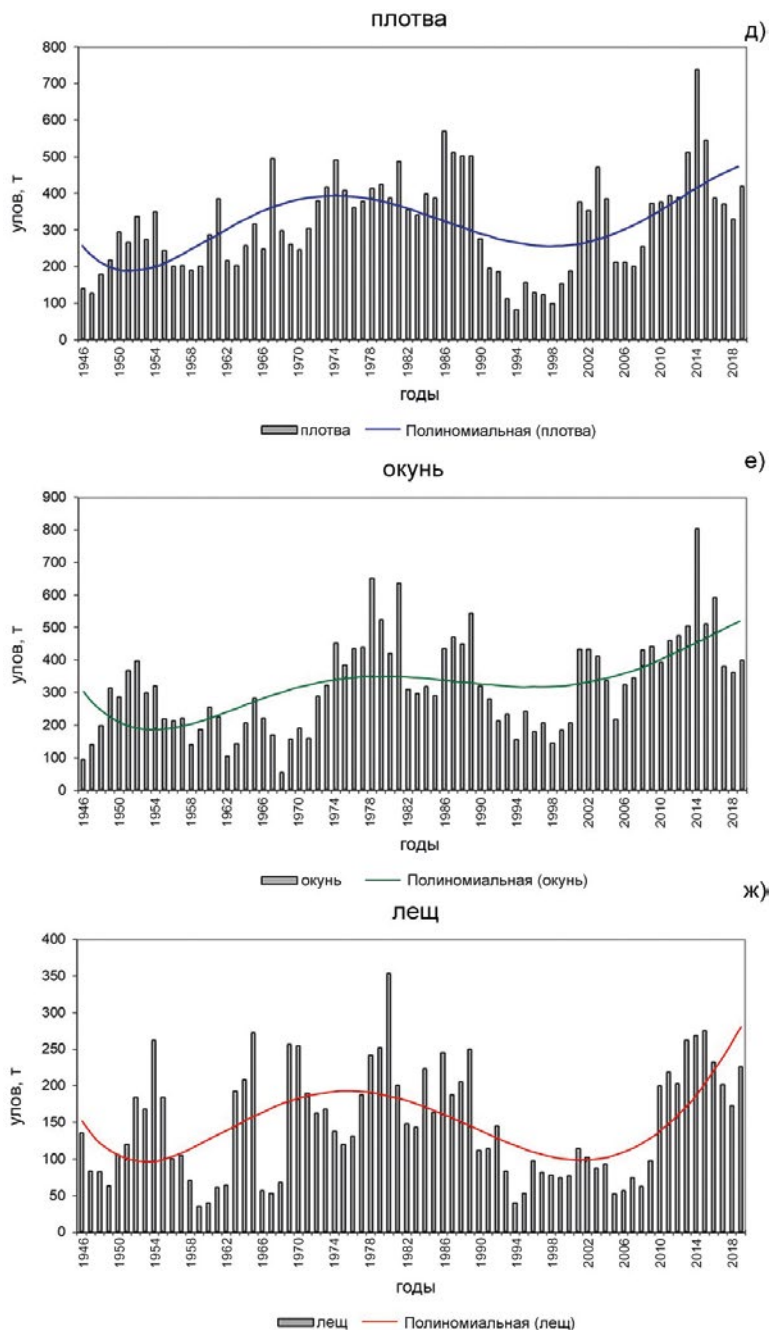


Рис. 9.10.9 – Динамика годовых уловов плотвы (д), окуня (е) и леща (ж) в Ладожском оз. за период 1946–2019 гг.

Материалы исследования всех основных сообществ гидробионтов Ладожского оз., изложенные в настоящей главе, показывают, что наблюдавшиеся в конце XX – начале XXI в. достаточно интенсивные последствия антропогенной трансформации его экосистемы, выразившиеся в становлении так называемого постмезотрофного периода [Поздняков и др., 2009; Курашов и др., 2018], привели к формированию достаточно стабильного в настоящее время состояния водоема. Особенностью современного экологического состояния озера являются процессы, идущие вследствие выраженных климатических изменений, приводящих к увеличению температуры воды, в наибольшей степени, в прибрежной зоне озера. Имеющиеся метеорологические данные позволяют говорить об этом вполне определенно. Именно климатические изменения являются одной из основных причин наблюдающихся трансформаций биологических сообществ водоема.

В силу значительной инерционности экосистемы озера весьма трудно пока выявить последствия климатических изменений для основного продукционного звена экосистемы – фитопланктона. Показатели его развития в целом стабильны, отмечаются незначительные незакономерные межгодовые различия. Однако для южных губ (Петрокрепость, Волховская губа) в 2018–2019 гг. повышения продукционных показателей, возможно, обусловленные именно климатической составляющей, явно прослеживаются. В целом величины продуктивности фитопланктона свидетельствуют о мезотрофном и слабomezотрофном характере экосистемы в различных зонах. В период своего сезонного существования теплоинертная область имеет показатели продуктивности ультраолиготрофных вод. Средние величины биомассы и хлорофилла-а позволяют охарактеризовать Ладожское оз. в летний период как мезотрофный водоем.

С данными по фитопланктону вполне согласуются данные по бактериопланктону, которые показывают, что трофический статус озера по общей численности бактериопланктона не изменился по сравнению с первым десятилетием XXI века и варьировал в 2009–2019 гг., судя по летним данным, от олиго-мезотрофного в гипolimнионе глубоководных районов до типично мезотрофного в мелководном южном прибрежном районе. Этот вывод подтверждается и результатами исследования микопланктона.

В 1990–2010 гг. водные массы различных зон озера по величинам соотношений численности сапрофитных бактерий и общей численности микроорганизмов соответствовали категориям «чистые» и «особо чистые». Однако в 2017–2019 гг. воды всех озерных районов соответствовали категории «особо чистые», что свидетельствует о стабильно высоком качестве вод Ладожского оз.

Одной из наиболее проблемных акваторий озера продолжает оставаться Волховская губа, характеризующаяся наибольшей продуктивностью. Она, по-прежнему, остается районом озера, наиболее подверженным антропогенному эвтрофированию и загрязнению, которые продолжают оставаться причиной-угрозой изменения экосистемы озера. Одним из последствий антропогенно-климатической трансформации озера является формирование специфических группировок водных макрофитов, которые могут служить индикаторами этого процесса. Другим последствием, в частности, является

развитие инвазивных популяций растений (например, рдеста *P. pectinatus*) в южной части озера. На примере данного активного продуцента НОС хорошо прослеживается, как антропогенно-климатическая трансформация водной растительности в Ладожском оз. может приводить к существенным изменениям химизма литоральной зоны, т. е. эколого-биохимических условий обитания гидробионтов. Также выявлено, что антропогенное воздействие на прибрежную зону приводит к снижению общего синтеза НОС водными макрофитами и особенно аллелопатически активных метаболитов, таких как карбоновые кислоты, что улучшает условия для развития нежелательных цианобактерий и, тем самым, ухудшает экологическое состояние водной среды в прибрежной зоне озера.

Данные по зоопланктону в целом по озеру свидетельствуют о стабильности сообщества. Глубоководный и склоновый районы озера по структуре и количественному развитию зоопланктонного сообщества соответствуют олиготрофному статусу озерной экосистемы. Литоральная зона, мелководный и прибрежный районы бухты Петрокрепость и Волховской губы могут быть отнесены к мезотрофному типу.

Исследования макрозообентоса показали, что в профундали озера видовой состав донных биоценозов, их доминирующий комплекс, соотношение основных групп остаются достаточно стабильными. При этом отмечается тенденция увеличения средних значений биомассы в северной глубоководной зоне и снижения этих показателей в южной части озера. Последнее обстоятельство вызывает беспокойство, т. к. снижение уровня воспроизводства бентосных беспозвоночных может быть обусловлено общим уровнем загрязнения южной части Ладоги.

Данные, полученные при исследовании мейобентоса как в основной акватории, так и в литоральной зоне, указывают в целом на стабильное и благоприятное состояние водоема. В то же время площадные исследования в открытой акватории озера в районе г. Питкяранта выявили угнетение донной мейофауны на площади дна в несколько сотен квадратных километров, что определенно связано с негативным влиянием стоков Питкярантского целлюлозного завода, которые поступают непосредственно в открытую акваторию озера.

Полученные данные позволяют заключить, что в настоящее время Ладожское оз. в целом является мезотрофным водоемом с чертами олиготрофии в определенных зонах и периодах года, с высоким качеством своих вод. Для литоральной зоны озера наиболее значимой является антропогенно-климатическая трансформация биоценозов, выражающаяся в формировании специфических растительных ассоциаций, усилении роли растительных и животных популяций видов-вселенцев и снижении контроля развития цианобактерий со стороны макрофитов в результате ослабления синтеза аллелохимиков. Эти обстоятельства вызывают обоснованное беспокойство.

К настоящему времени вселение в озеро новых видов гидробионтов не привело к существенным отрицательным последствиям для аборигенных сообществ озера в целом. Можно говорить об обогащении биоразнообразия за счет вселившихся видов. Вселившиеся в Ладогу виды занимают экологические ниши, в незначительной степени перекрывающиеся с таковыми аборигенными.

ригенных видов, например, по трофическим ресурсам. Оценка реальных последствий биологических инвазий в Ладоге и близком по генезису Онежском оз. должна быть индивидуальна для каждого водоема с обязательным изучением биологии и экологии вселившихся видов.

Озерные формы сига и судак – наиболее ценные ладожские виды рыб, пользующиеся повышенным потребительским спросом и сохранившие до настоящего времени промысловое значение. За последние двадцать лет динамика уловов этих видов рыб имеет устойчивую тенденцию к снижению. Наблюдается снижение промысловых параметров и биологических показателей: возрастного состава, среднего возраста и размеров как сига, так и судака. Среди причин, определивших современное состояние запасов и промысла этих видов рыб, выделяются природные и антропогенные. Первые скорее всего связаны с глобальными климатическими изменениями и соответствующей перестройкой ихтиоценоза водоема, а также с сокращением поступления биогенных элементов в озеро и низкими показателями кормового зообентоса. На природный фактор воздействия на водоем накладываются различные антропогенные влияния, к числу которых относятся:

- неудовлетворительное экологическое состояние водоема и прежде всего мест нереста;
 - неудовлетворительное соблюдение действующих Правил рыболовства;
 - интенсивный браконьерский лов, в т. ч. на нерестилищах;
 - неполное отражение фактических уловов в статистической отчетности;
 - мизерный объем работ по искусственному воспроизводству.
- Для сохранения запасов наиболее ценных в настоящее время промысловых видов рыб Ладоги необходимо принятие комплекса мер по устранению негативного антропогенного влияния на биоту озера. С этой целью требуется выполнение следующих неотложных мер:
- оздоровление экологического состояния озера и его бассейна, прежде всего в районах нерестилищ;
 - усиление мероприятий по охране рыбных ресурсов и соблюдению режимов рыболовства;
 - значительное расширение работ по искусственному воспроизводству запасов ценных видов рыб;
 - разработка и практическое исполнение мер по государственной поддержке ладожского рыболовства.

Глава 10. Современные специфические аспекты антропогенного воздействия на Ладожское озеро

Возрастающее антропогенное воздействие, происходящие климатические изменения, а также интенсивное использование водных ресурсов приводят к выдвиганию на первый план задач, актуальность которых возросла в последнее время. В настоящей главе представлены результаты исследований, которым ранее не уделялось должного внимания и которыми их авторы начали заниматься в основном только в последнее десятилетие.

10.1 Загрязнение искусственными полимерами на примере частиц микропластика

Пластик – один из наиболее востребованных в настоящее время искусственных материалов. Объем производства пластика исчисляется в сотнях миллионов тонн и ежегодно увеличивается. Под пластиком в широком смысле слова понимаются искусственно синтезированные высокомолекулярные соединения (полимеры), получаемые с помощью реакции полимеризации и поликонденсации из низкомолекулярных веществ, выделяемых из угля, нефти и природного газа. К ним относятся различные виды пластмасс, резин, синтетических тканей. При этом лишь небольшая часть пластиковых отходов идет на переработку, а основная часть пластика попадает в окружающую среду. Наибольшая доля потребления приходится на полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид [Geyer et al., 2017]. Процесс полного разложения пластика в природных условиях может занимать сотни лет [Barnes et al., 2009], при этом пластиковые отходы распадаются на мелкие частицы (менее 5 мм), называемые микропластиком [Andrady, 2011].

В зависимости от происхождения микропластик разделяют на первичный и вторичный. Первичный микропластик – это специально произведенные и добавленные в различную продукцию микрочастицы пластика. Вторичный микропластик – это продукт распада крупных фрагментов пластика на более мелкие частицы. Микроскопические частицы пластика крайне сложно изъять из окружающей среды. В настоящее время зарубежные исследователи констатируют наличие частиц микропластика во всех природных средах: от Арктических [Cózar et al., 2017] до Антарктических морских вод [Cincinelli et al., 2017], в донных отложениях [Browne, Galloway, 2010] и в почвах [Corradini et al., 2019].

Частицы пластика в водной среде обрастают биопленкой, состоящей из микроорганизмов и гумусовых веществ. Микропластик может сорбировать на поверхности токсичные вещества, включая устойчивые органические загрязнители и тяжелые металлы. Частицы пластика вместе с токсикантами могут попадать в живые организмы, передаваясь по пищевым цепям [Mato et al., 2001]. Пластиковые материалы часто содержат широкий спектр химических веществ, жесткости, устойчивость к ультрафиолетовому излучению, а также красителей [Browne et al., 2013; Lithner et al., 2009; Moore, 2008; Teuten et al.,

2009]. Многие из данных химических веществ являются токсичными, включая бисфенол-А и фталаты [Hua et al., 2005; Kim et al., 2006; Lithner et al., 2009; Oehlmann et al., 2009; Rochman et al., 2013; Teuten et al., 2009].

Большинство исследований, направленных на изучение проблемы пластикового загрязнения окружающей среды, сфокусированы на морских системах, в то время как пресноводным объектам посвящено лишь 4% работ [Lambert, Wagner, 2018]. Исследователи отмечают, что содержание пластиковых частиц во внутриконтинентальных водных объектах сопоставимо с их количеством в морских водах [Peng et al., 2017]. В настоящее время в России имеется мало сведений о содержании микропластиковых частиц в различных природных средах. Ряд научных исследований содержания частиц микропластика в водах и донных отложениях Балтийского моря был проведен НИИ Океанологии им. Ширшова [Zobkov, Esiukova, 2017].

Для понимания процессов поступления частиц микропластика в природную среду, их транспортировки и трансформации в пределах водных систем необходима информация о содержании таких частиц в различных компонентах водных экосистем (водной толще и донных отложениях). Для установления источников пластикового загрязнения важной дополнительной составляющей является информация о типах преобладающих полимеров, загрязняющих окружающую среду.

В настоящее время не существует единых методов анализа содержания, а также химического состава частиц микропластика в природной среде [Andrady, 2011; Li et al., 2018]. Выбор методик пробоотбора и пробоподготовки напрямую зависит от типа водного объекта. Большое влияние оказывает географическое положение, сезон отбора проб и, как следствие, количество биологического материала и взвешенных частиц в воде. Институт озерадения РАН совершенствует имеющиеся российские и зарубежные методики в данной области и адаптирует их к условиям исследуемых водных объектов северо-запада РФ.

На акватории и водосборе Ладожского оз. с 2018 г. сотрудниками Института озерадения РАН осуществляется регулярный отбор проб воды, донных и береговых отложений в различные сезоны года с помощью насоса и фильтровальной установки, разработанной старшим научным сотрудником С.Г. Каретниковым (рис. 10.1.1).

Вода фильтруется через сетку с размером ячейки 60 и 100 мкм. Размер ячейки сетки выбран на основе результатов российских и зарубежных исследований для возможности потенциального сравнения данных. Объем прокаченной через установку воды фиксируется с помощью счетчика. Осажденный на сетке материал в дальнейшем исследуется при помощи оптических и спектральных методов.

Донные отложения отбираются различными методами в зависимости от типа водного объекта и задач исследования. На Ладожском оз. пробы поверхностного слоя донных отложений отбираются при помощи дночерпателя Экмана – Берджи с борта плавсредства или со льда в зимний период. Для анализа частиц микропластика в воде и донных отложениях оптическими и спектральными методами необходима специальная подготовка проб. Для проб воды, содержащих большое количество биологического материала,

используется мокрое перекисное окисление (30% H_2O_2) лабильного органического вещества. Для исследований донных отложений выполняется предварительная подготовка проб в несколько этапов – отделение микропластика от минерального и органического вещества осадка на основе методик, которые в настоящее время используются в зарубежных и российских исследованиях [Prata et al., 2019; Zobkov, Esiukova, 2017]. Обработка донных отложений включает следующие стадии: плотностное разделение составляющих грунта и растворение лабильного органического вещества.

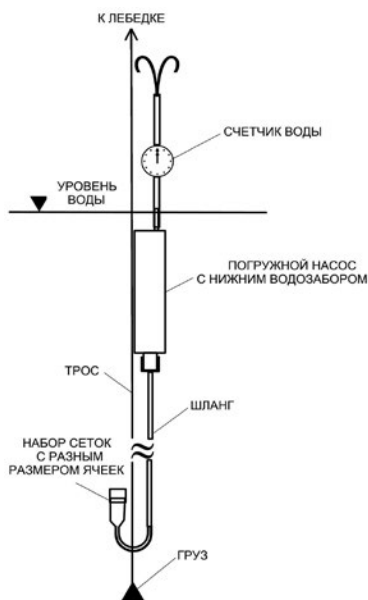


Рис. 10.1.1 – Фильтровальная установка для отбора проб воды

Подготовленные пробы воды и донных отложений на первом этапе анализируются при помощи светового микроскопа. Данный способ позволяет визуально выделить частицы, предварительно идентифицируемые как микропластик, и оценить их концентрацию в пробах. Для визуального определения используются рекомендации, разработанные зарубежными исследователями [Hidalgo-Ruz et al., 2012]. Для упрощения процесса оптической идентификации частиц пластика в мировой практике широко применяются различные липофильные флуоресцирующие красители. В ИНОЗ РАН для этих целей используется краситель «Нильский красный» с дальнейшим анализом при помощи флуоресцентного микроскопа.

При анализе частиц микропластика их идентификацию может затруднять биопленка, образующаяся на поверхности частиц в природной среде, а также их частичная деструкция – результат длительного воздействия факторов окружающей среды. Пластиковые волокна в ряде случаев могут иметь сходные визуальные характеристики с биологическими остатками, например, нитевидными водорослями. Эта проблема может быть решена с помощью спектральных методов – рамановской и ИК-спектроскопии [Araujo et al.,

2018]. Эти методы являются высокоточными и взаимодополняющими, что позволяет анализировать частицы размером от 20 мкм. Используемые методики, которые широко применяются в мировых исследованиях проблемы загрязнения природной среды микропластиком [Prata et al., 2019], позволяют получить информацию о химическом составе анализируемых частиц.

На акватории Ладожского оз. и его притоках были проведены исследования в разные сезоны года. В образцах воды и донных отложений были идентифицированы частицы микропластика в размерном диапазоне от 60 мкм до 5 мм (рис. 10.1.2). Минимальная концентрация частиц микропластика в водной толще на акватории Ладожского оз. (0,02 частицы/литр) зафиксирована в северной части, вблизи острова Валаам. В пробах прибрежной зоны северной части Ладоги в районе залива Импилахти концентрации составили от 0,8 до 1,7 частиц/литр (в среднем – 1,3 частиц/литр), а вблизи о. Кухка – от 0,9 до 1,3 частиц/литр (в среднем – 1,1 частиц/литр). В восточных прибрежных зонах озера концентрация в среднем составляет 1,5 частицы/литр.

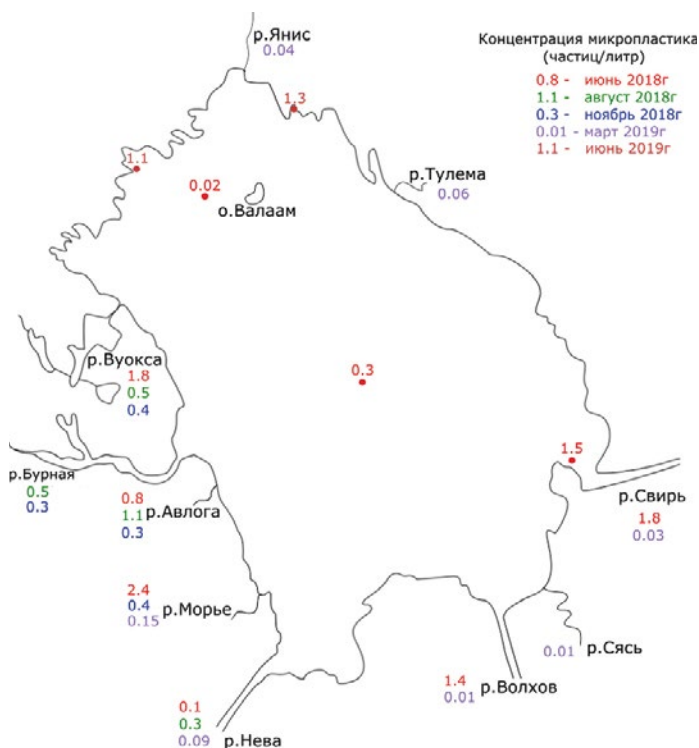


Рис. 10.1.2 – Карта-схема распределения концентраций частиц микропластика в воде притоков и акватории Ладожского оз.

Исследование частиц микропластика также осуществлялось в воде притоков Ладожского оз. (Морье, Авлога, Бурная, Вуокса, Янис, Тулема, Сясь, Свирь, Волхов) и р. Невы в различные сезоны года (рис. 10.1.2). В летний период концентрация микрочастиц пластика значительно превышает концентрацию в зимний (подледный) период. Это связано, в том числе, с тем,

что ледовый покров препятствует прямому попаданию пластика в водоемы. В летний период на притоках Ладожского оз. и р. Неве концентрации частиц микропластика в водной толще составляют от 0,1 частиц/литр (р. Нева) до 2,4 частиц/литр (р. Морье). При этом стоит отметить, что количество частиц более мелкого размерного диапазона значительно превышает количество более крупных частиц.

В пробах донных отложений Ладожского оз. зафиксированы концентрации микропластика, существенно превышающие соответствующие значения в воде. В южной части озера концентрации частиц микропластика в донных отложениях составили от 25 до 70 частиц/кг. Концентрации в западной части акватории составляют от 5 до 15 частиц/кг, в восточной части – от 15 до 40 частиц/кг. Исследования донных отложений в северной части озера осложняются преобладанием илистых фракций в глубоководных донных отложениях. Это требует усовершенствования имеющейся методики пробоподготовки на этапе отделения частиц микропластика от минеральных и органических составляющих осадка. В донных отложениях притоков Ладоги зафиксировано содержание частиц микропластика от 20 до 60 частиц/кг. Эта информация используется для установления возможных источников поступления и перемещения частиц микропластика на водосборе и акватории Ладожского оз. Исследование содержания частиц микропластика как нового типа загрязнения водных объектов становится все более актуальным ввиду ежегодно возрастающих объемов производства и поступления пластика в природные экосистемы.

Таким образом, в результате непродолжительных, но плодотворных исследований последних лет сотрудниками ИНОЗ РАН получены данные о содержании и пространственном распределении частиц микропластика в Ладожском оз., его притоках и р. Неве. Проанализировано пространственное распределение концентрации микропластика в различных средах водных экосистем – водной толще, прибрежных грунтах и донных отложениях. В результате выявлены преобладающие формы частиц, размерный диапазон и количественное содержание.

10.2 Закономерности формирования низкомолекулярного метаболома макрофитов Ладожского озера

На современном этапе развития гидроэкологии фактом является понимание того, что низкомолекулярные органические соединения (НОС) (первичные и вторичные метаболиты) водных растений играют весьма значимую роль в формировании и функционировании сообществ гидробионтов в водных экосистемах [Гуревич, 1978; Fink, 2007; Kurashov et al., 2014]. Низкомолекулярный метаболом (НМ) водных растений (совокупность НОС-метаболитов) закономерно реагирует на изменения в окружающей среде (абиотические и биотические факторы), в том числе на трансформирующие водную среду факторы антропогенного происхождения [Курашов и др., 2018б]. Данные обстоятельства открывают перспективы использования НМ водных макрофитов как одного из ключевых элементов, для оценки и мониторинга экологического состояния водных экосистем.

В Ладожском оз. обитает большое количество макрофитов различных экологических форм [Литоральная..., 2011]. При этом их метабономика практически не изучена. В данной публикации мы остановимся на результатах, полученных всего лишь для трех ведущих видов макрофитов, которые в настоящее время достигают значительного количественного развития в литорали озера и тем самым оказывают значительное воздействие на формирование и функционирование прибрежных биотопов Ладоги: горца земноводного *Persicaria amphibia* (L.) Delarbre, рдеста пронзеннолистного (*Potamogeton perfoliatus* L.) и рдеста гребенчатого (*Potamogeton pectinatus* L.) (рис. 10.2.1).



Рис. 10.2.1 – Горец земноводный (А), рдест пронзеннолистный (Б) и рдест гребенчатый (В) (Ладожское оз.)

Первые два вида широко распространены в Ладожском оз., образуя хорошо развитые ассоциации. В то время как рдест гребенчатый (*Potamogeton pectinatus* L.) в 70–80-х гг. прошлого века отмечался лишь в водных фитоценозах в качестве сопутствующего вида только в северном шхерном геоботаническом районе Ладоги [Распопов, 1985]. Появление вида в Ладожском озере именно в 70-е годы может объясняться начавшейся в эти годы сильной антропогенной трансформацией озера в результате эвтрофирования и загрязнения, этапы которой описаны в [Петрова и др., 2005]. По результатам исследования, проведенного ИНОЗ РАН в 2006 г. [Русанов, 2011], рдест гребенчатый был впервые обнаружен в Волховской губе южного мелководного геоботанического района Ладоги. Волховская губа является одной из акваторий Ладоги, где наиболее сильно сказывается антропогенное воздействие, а также характерны самые высокие показатели индексов биологического загрязнения, отражающие наиболее высокую роль чужеродных видов в этом районе Ладоги [Курашов и др., 2018; Трифонова и др., 2018].

Исследования последующих лет (2010, 2014, 2019 гг.) показали, что вид устойчиво вошел в состав растительных ассоциаций Волховской губы. В настоящее время синтезируемые *P. pectinatus* НОС оказывают влияние на другие компоненты прибрежных сообществ гидробионтов. В свою очередь, в ходе адаптации вида к условиям существования в Ладожском оз. неизбежно происходит изменение НМ вида, т. е. изменяется компонентный состав и содержание НОС. При этом проблема изменения НМ у водных растений в различных участках ареала, в том числе в местах, для которых данный вид является чужеродным, крайне слабо изучена.

Сравнительное исследование компонентного состава НМ рдеста пронзеннолистного (*P. perfoliatus*) и горца земноводного (*P. amphibia* (L.) ос-

новывалось на сборах из различных акваторий Ладожского озера, различающихся по уровню антропогенного воздействия (табл. 10.2.1). Образцы рдеста гребенчатого (*P. pectinatus*) были собраны в Волховской губе. Состав НОС выявляли в гексановых экстрактах на хромато-масс-спектрометрическом комплексе TRACE DSQ II (Thermo Electron Corporation) с квадрупольным масс-анализатором, подробно методика описана в [Kurashov et al., 2018]. Для выявления сходства образцов эфирного масла по составу НОС применялись коэффициенты сходства Жаккара (*J*) [Jaccard, 1901] и Сьёренсена-Чекановски (*Qs*) [Czekanowski, 1922; Sorensen, 1948].

При исследовании НМ горца земноводного в фазе цветения, произрастающего в разнотипных биотопах Ладожского оз. было всего обнаружено 124 НОС, из которых идентифицировано 110. Среди НОС горца земноводного преобладали карбоновые кислоты (50–60% по содержанию), альдегиды (9–14%) и углеводороды (6–9%). НМ *P. amphibia* из биотопа, в недавнем прошлом находившегося под сильным антропогенным воздействием (стоки ЦБК и деревообрабатывающих предприятий), характеризовался наименьшим числом НОС (87 против 107–114 в слабо или ненарушенных местах обитания) и их общим содержанием – в 3–3,5 раза ниже, чем у растений, произрастающих в более благоприятных условиях (табл. 10.2.1). Возможно, что менее интенсивное загрязнение в биотопе в районе Ляскеля сохраняется и по сей день. Известно, что у наземных растений уменьшается количество и снижается качество эфирного масла при увеличении антропогенного воздействия и ухудшении условий произрастания растений [Сотникова, Степень, 2001; Степень, Есякова, 2007; Марчук, Ежов, 2011; Тихонова и др., 2012; Опекунова и др., 2013]. По-видимому, данная закономерность характерна и для водных растений.

Таблица 10.2.1

Число НОС, 3 наиболее обильных компонента, их содержание (%), число карбоновых кислот (Nca) и суммарная концентрация НОС в сухом растении (C_{ср}, мкг/г сух. в.) у *P. perfoliatus* и *P. amphibia*, численность фикоцианинсодержащих планктонных водорослей (BGA, кл/мл) и концентрация хлорофилла-а (Chl, мкг/л) в различных местообитаниях в Ладожском оз.

Местообитание	Число НОС (3 основных компонента (%))	Nca	C _{ср}	BGA	Chl
<i>P. perfoliatus</i>					
Щучий залив (у дамбы)	73 (E) – гекс-2-еналь (14,43%); 4-(2-methyl-3-oxocyclohexyl) butanal (4,19%); фитол (3,85%)	2	38,05	2010	5,9
Щучий залив (у острова)	54 (гексадекановая кислота (13,82%); фитол (9,27%); (E) – гекс-2-еналь (8,81%))	2	85,60	1110	6,0
3-в Импилахти	60 (8- (2,5,5,8A-тетраметил-1,4,4A,5,6,7,8, 8A-октагидро-1-нафталенил) – 6-метил-5-октен-2-ол (14,78%); (E) – гекс-2-еналь (12,63%); гексадекановая кислота (7,06%))	2	7,20	12440	10,4
3-в Лехмолахти	110 (линоленовая кислота (18,20%); тетракозан (10,82%); гексадекановая кислота (10,14%))	11	245,20	890	3,7
Свирская губа	134 (E) – гекс-2-еналь (10,14%); манол (6,04%); гексадекан-1-ол (4,20%))	4	42,47	1410	3,9

Местообитание	Число НОС (3 основных компонента (%))	Nca	C _{ep}	BGA	Chl
<i>P. perfoliatus</i>					
Волховская губа (устье р. Волхов)	77 (E) – гекс-2-еналь (10,82%); гексадекан (8,50%); β-ионон (4,83%)	1	13,00	3330	12,5
Волховская губа (дер. Вороново)	93 (гексадекановая кислота (11,48%); прегнаноол (7,93%); манол (3,23%))	2	19,00	2740	8,4
<i>P. amphibia</i>					
г. Питкяранта	107 (гексадекановая кислота (42,53%); α-линоленовая кислота (6,32); тетрадекановая кислота (4,43%))	8	128,03	1230	6,6
<i>п. Ляскеля</i>	87 (гексадекановая кислота (29,46%); α-линоленовая кислота (10,43%); линолевая кислота (5,48%))	8	41,43	1030	3,2
п. Сорела	110 (гексадекановая кислота (23,39); тетрадекановая кислота (8,33%); цис-9-гексадеценная кислота 5,43%)	8	147,03	2260	4,0

Полужирным шрифтом выделены литоральные местообитания с повышенным антропогенным воздействием.

Как следует из табл. 10.2.1, карбоновые кислоты во всех образцах горца занимали первые 3 места: гексадекановая кислота – 3 первых места, α-линоленовая кислота – два вторых места, тетрадекановая кислота – второе и третье место, линолевая кислота и цис-9-гексадеценная кислота – по одному третьему месту. Значительный синтез жирных кислот горцем земноводным свидетельствует о том, что его хорошо развитые ассоциации оказывают существенное воздействие на фитопланктон в литорали Ладожского оз. в ходе аллелопатических взаимодействий.

Имеющиеся материалы позволили провести оценку сходства компонентного состава эфирных масел образцов *P. amphibia* из разнотипных по уровню антропогенного воздействия исследованных местообитаний (табл. 10.2.2). Когда учитывалось только наличие или отсутствие компонента (сходство по индексам Жаккара и Съеренсена – Чекановски), оказалось, что наиболее сходны были составы НМ горца земноводного, произрастающего в благоприятных условиях без выраженного антропогенного воздействия. НМ горца из биотопа, который подвергался токсическому воздействию отходов деревообрабатывающих производств (Ляскельские шхеры), характеризовался наименьшим сходством с другими образцами. Сходный результат был получен, если учитывались только мажорные компоненты. Также похожий результат был получен при использовании индекса Мориситы с учетом концентраций всех НОС и мажорных компонентов. Таким образом, мажорные компоненты, на долю которых приходилось от 70 до 77% содержания в эфирном масле исследованных образцов, оказывали наибольшее влияние на оценку сходства НМ горца из разных местообитаний, если учитывать количественное содержание отдельных НОС в эфирном масле. Наиболее сильные отличия между местообитанием с токсическим загрязнением были получены при использовании индексов Жаккара и Съеренсена – Чекановски при качественном анализе полного состава НМ.

Таблица 10.2.2

Сходство НМ *P. amphibia* из разных местообитаний в Ладожском оз. по индексам сходства Жаккара (J_1 – по всем соединениям, J_2 – по мажорным соединениям), Сьёренсена – Чекановски (Ks_1 – по всем соединениям, Ks_2 – по мажорным соединениям) и по индексу Мориситы-Хорна (Cmh_1 – для групп соединений, Cmh_2 – для всех соединений)

Индексы сходства	J_1	J_2	Ks_1	Ks_2	Cmh_1	Cmh_2
Питкьяранта – Сорола	0,81	0,55	0,89	0,71	0,97	0,84
Питкьяранта – Ляскеля	0,72	0,61	0,84	0,76	0,98	0,93
Сорола – Ляскеля	0,64	0,61	0,78	0,76	0,99	0,92

В составе НМ *P. perfoliatus* было выявлено от 54 до 134 НОС, при этом наибольшее число соединений было характерно для чистых местообитаний, не подверженных явному антропогенному воздействию. Общеизвестно, что в озерных местообитаниях с увеличением антропогенной нагрузки и трофического статуса биотопа, как правило, наблюдается увеличение концентрации цианобактерий (синезеленых водорослей). Учитывая это, было оценено, как изменяется суммарное содержание НОС у водных растений с увеличением показателей развития фитопланктона. На рис. 10.2.2 и 10.2.3 показано, что у *P. perfoliatus*, произрастающего в Ладожском оз., снижается суммарное содержание НОС при увеличении в водной среде численности фикоцианинсодержащих планктонных организмов (в основном представленных цианобактериями).

Такую же зависимость можно проследить и в отношении зависимости суммарной концентрации НОС ($C_{\text{ср}}$, мкг/г сух. в.) в эфирном масле *P. perfoliatus* от концентрации хлорофилла-а в планктоне (рис. 10.2.3). Эта зависимость несколько менее выражена, поскольку в суммарную концентрацию хлорофилла в воде вносят свой вклад не только цианобактерии, но и другие представители фитопланктона. Таким образом, антропогенное эвтрофирование озерных местообитаний, выражающееся в увеличении численности цианобактерий и всего фитопланктона (оценено по хлорофиллу) в Ладожском оз., приводит к снижению общего уровня синтеза НОС.

В свою очередь макрофиты активно воздействуют на развитие цианобактерий, ограничивая его. Поскольку карбоновые кислоты являются одними из наиболее активных аллелохимиков [Hegazy et al., 2001; Nakai et al., 2005; Hu, Hong, 2008; Zuo et al., 2016; Sun et al., 2016; Kurashov et al., 2018], то в биотопах, где макрофиты не угнетены и синтезируют большее количество карбоновых кислот (по числу и по содержанию), наблюдаются более низкие концентрации цианобактерий (рис. 10.2.4). В этих же местообитаниях отмечено наибольшее число карбоновых кислот в составе НМ (табл. 10.2.1).

На примере *P. perfoliatus* показано, что антропогенное воздействие на озеро приводит к сокращению синтеза карбоновых кислот, что в свою очередь уменьшает эффект аллелопатического воздействия макрофитов в отношении цианобактерий, т.е. способствует их нежелательному развитию в литоральных местообитаниях.

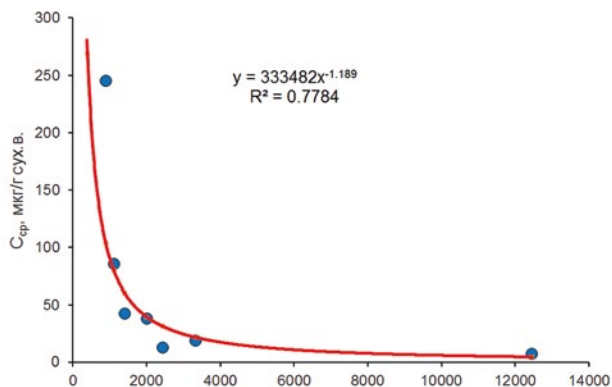


Рис. 10.2.2 – Зависимость суммарной концентрации НОС (C_{cp} , мкг/г сух. в.) в эфирном масле *P. perfoliatus* от концентрации фикоцианинсодержащих представителей фитопланктона (BGA, кл/мл)

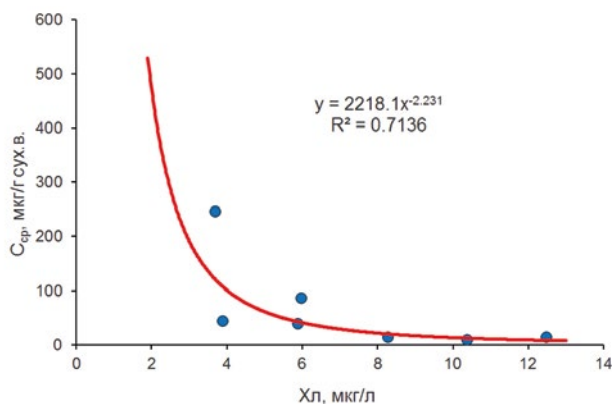


Рис. 10.2.3 – Зависимость суммарной концентрации НОС (C_{cp} , мкг/г сух. в.) в эфирном масле *P. perfoliatus* от концентрации хлорофилла-а в планктоне ($X_{л}$, мкг/л)

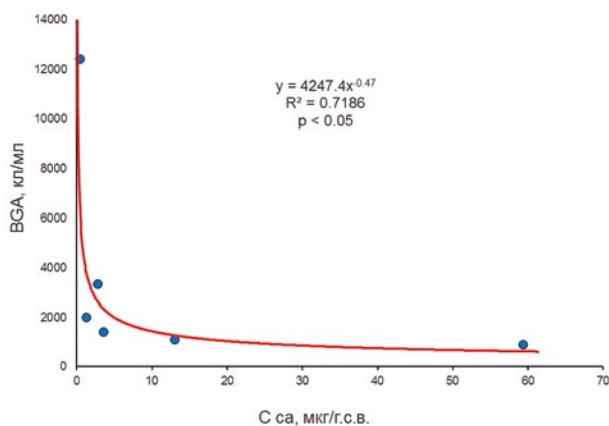


Рис. 10.2.4 – Зависимость концентрации цианобактерий (BGA, кл/мл) от концентрации карбоновых кислот (C_{ca} , мкг/г с. в.) у *P. perfoliatus* в Ладожском оз.

Исследования НМ рдеста гребенчатого интересны с точки зрения крупномасштабных изменений южной части озера в условиях воздействия антропогенного фактора и климатических изменений, выражающихся в увеличении годовых сумм температур, о чем свидетельствуют метеорологические наблюдения [Менжулин, 2013]. Учитывая, что рдест гребенчатый является индикатором эвтрофирования [Penning et al., 2008; Sager, 2009], распространение этого вида в южной части озера маркирует собой антропогенную трансформацию водной растительности Ладоги.

Для инвазионной Ладожской популяции *P. pectinatus* в составе НМ выявлено 112 НОС, в то время как у рдеста, произрастающего в озерах нативного ареала, было обнаружено от 80 до 94 НОС [Kurashov et al., 2020]. При этом только 54 соединения были общими. Общее содержание НОС в эфирном масле, по-видимому, не связано с географическим фактором. Так, абсолютное суммарное содержание НОС было практически идентичным у ладожской популяции (87,89 мкг/г сухой массы растения) и у рдеста из популяций нативного ареала (87,77–203,14 мкг/г сухой массы растения).

У рдеста из Ладожского оз. в составе НМ преобладали кетоны (27,4%) и альдегиды (18,1%), высока была доля карбоновых кислот (9,93%). Многие из этих метаболитов обладают высокой биологической активностью. У растения-вселенца в Волховской губе наиболее обильными мажорными компонентами были: 6,10,14-триметилпентадекан-2-он (9,09% суммарного содержания НОС), (Е) – гекс-2-ен-1-ол (7,71%) и тетрадекановая кислота (6,52%).

Таким образом, антропогенно-климатическая трансформация водной растительности в южной Ладоге, выразившаяся, в частности, в распространении рдеста гребенчатого с высоким уровнем синтеза НОС, привела к изменению химизма литоральной зоны. Подобные эколого-биохимические последствия функционирования популяций чужеродных видов растений (в частности, *P. pectinatus*) неизбежно связаны с изменением среды обитания других видов и сказываются в настоящее время на существовании гидробионтов литорали Ладожского оз., поскольку химические взаимодействия между гидробионтами играют весьма значимую роль в формировании и функционировании водных экосистем [Гуревич, 1978; Fink, 2007; Kurashov et al., 2014]. Основными выводами, сделанными по результатам изложенных в настоящей главе исследований, являются следующие:

- 1) антропогенная трансформация литоральных биотопов приводит к снижению общего синтеза НОС водными макрофитами и особенно аллелопатически активных метаболитов, таких как карбоновые кислоты, что улучшает условия для развития нежелательных цианобактерий и, тем самым, ухудшает экологическое состояние водной среды;

- 2) развитие инвазивных популяций растений (например, *P. pectinatus*) в Ладожском оз. вследствие антропогенно-климатической трансформации водной растительности может приводить к существенным изменениям эколого-биохимических условий обитания гидробионтов в литоральной зоне озера.

10.3 Токсикологическая характеристика среды обитания биологических ресурсов в Ладожском озере

Токсикологические показатели, наряду с гидрологическими и гидрохимическими параметрами, являются основой для оценки состояния водных биологических ресурсов (ВБР), в том числе и такого звена экосистемы, как рыбное население. Для решения задачи токсикологической оценки среды обитания биологических ресурсов в Ладожском оз. использованы результаты литорального рейса ИНОЗ РАН 2019 г. (рис. 8.3), а также экспедиционных исследований ГосНИОРХ в 2019–2020 гг. (рис. 10.3.1). В перечень токсикологических параметров входили нормируемые тяжелые металлы (ТМ) – кадмий, свинец, медь, марганец, нефтяные углеводороды (НУВ) и показатели острой и хронической токсичности с помощью тест – объекта *Daphnia magna* Straus. В качестве вспомогательных параметров, необходимых для интерпретации полученных результатов, использовались минеральный и общий фосфор. Оценка уровня трофии исследуемого водоема по содержанию общего фосфора проводилась по критерию Б. Карлсона [Carlson, 2007].

Пелагиаль и бенталь озера за пределами литоральной зоны (2019 г.)
 Результаты проведенных исследований 2019 г. по токсикологическим показателям представлены в табл. 10.3.1.

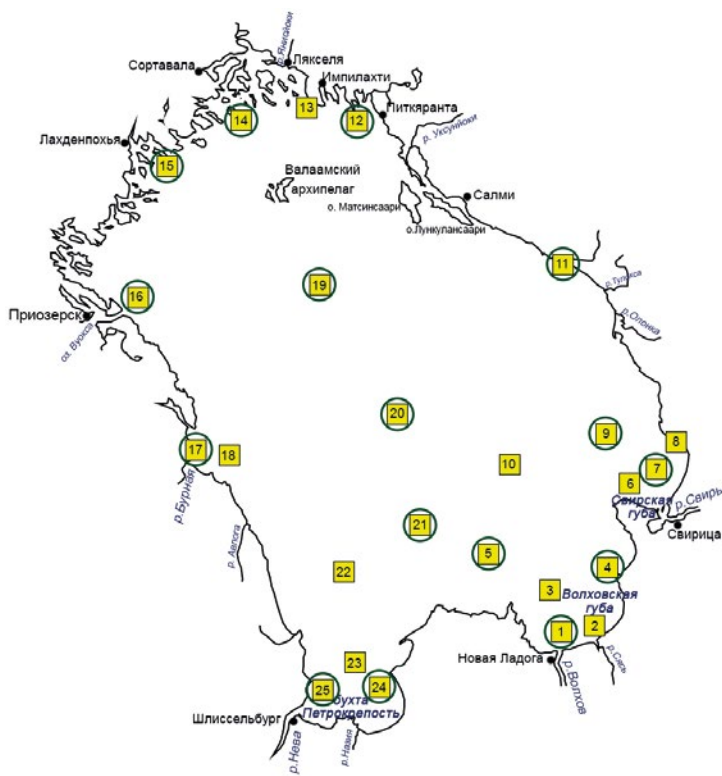


Рис. 10.3.1 – Схема станций отбора проб в открытой части Ладожского оз. для исследования среды обитания ВБР по токсикологическим и гидрохимическим показателям

Таблица 10.3.1

Концентрация тяжелых металлов, НУВ, общего фосфора в пересчете на фосфор ($P_{\text{общ.}}$), хроническая токсичность (В – по выживаемости; П – по плодовитости) в пробах воды Ладожского оз., отобранных в июле – августе 2019 г. на разных горизонтах

Станции отбора (рис. 10.2.1)	h, м	Cd мг/л	Pb мг/л	Cu мг/л	Mn мг/л	Концентрация НУВ, мг/л	$P_{\text{общ.}}$ мг Р/л	Хроническая токсичность
1	6.5	<0,0001	0,0013	0,0130	0,0495	0,04	0,023	не оказывает
3	8.5	<0,0001	0,0004	0,0012	0,0048	0,04	0,017	не оказывает
4	10,0	<0,0001	0,0002	0,0104	0,0181	0,07	0,024	не оказывает
7	9.0	<0,0001	0,0012	0,0052	0,0189	0,45	0,042	не оказывает
8	5.0	–	–	–	–	0,03	0,016	не оказывает
9	24.0	0,0001	0,0010	0,0090	0,0097	0,04	0,008	не оказывает
11	28.0	–	–	–	–	0,03	0,042	не оказывает
12	33.0	0,0006	0,0017	0,0130	0,0031	0,04	0,039	не оказывает
13	90,0	–	–	–	–	0,09	0,024	В, П
14	13.9	<0,0001	0,0020	0,0028	0,0017	0,05	0,036	–
15	8.0	0,0001	0,0051	0,1058	0,0013	–	0,003	П
16	125	<0,0001	0,0018	0,0104	0,0013	0,04	0,013	В, П
19	146	<0,0001	0,0020	0,0018	0,0015	0,05	0,000	не оказывает
20	69	0,0002	0,0013	0,0056	0,0027	0,25	0,025	В
22	17	0,0001	0,0028	0,0140	0,0033	0,10	0,041	не оказывает
25	6	0,0002	0,0010	0,0012	0,0053	0,04	0,018	–
медиана		<0,0001	0,0013	0,009	0,0033	0,04	0,024	
ПДКвр/ другой критерий		0,005	0,006	0,0010	0,010	0,05	0,012– 0,024*	

*Диапазон концентраций общего фосфора в пересчете на фосфор для мезотрофных водоемов по Б. Карлсону [Carlson, 2007]; «–» – анализ не проводился.

Согласно проведенным в 2019 г. исследованиям проб воды на содержание ТМ получено, что концентрации кадмия и свинца были ниже ПДКвр (ПДК для рыбохозяйственных водоемов). Концентрация кадмия была намного ниже ПДКвр и колебалась в пределах от менее чем 0,0001 до 0,0006 мг/л (табл. 10.2.1). Концентрация свинца в единственном случае была близка к ПДКвр, что было обнаружено на ст. 15 (в месте влияния г. Лахденпохья). На всех остальных станциях концентрации свинца были в 2 и более раз ниже ПДКвр. На ст. 15 было обнаружено содержание свинца больше, чем на всех станциях открытой части Ладоги. Концентрация меди во всех пробах воды в 2019 г. превышала ПДКвр, что указывает в большей степени на природную составляющую, нежели антропогенную. Однако в местах с повышенной антропогенной нагрузкой и в зонах влияния рек антропогенная составляющая увеличивала значения высокого природного фона до наибольших из выявленных концентраций меди. Концентрация марганца была

выше ПДКвр в пробах воды трех станций: ст. 1 – в 5 раз, и ст. 4 и 7 – в 1,8 и 1,9 раза соответственно. В воде ст. 9 и 17 концентрация марганца была близка к нормативу. Самые большие превышения норматива концентрации по НУВ отмечены на ст. 7 (Свирская губа) – 9 ПДКвр (0,45 мг/л), 20 (5 ПДКвр) и 22 (5 ПДКвр), что скорее обусловлено содержанием НУВ природного происхождения, связанного с интенсивным развитием фитопланктона.

Так как донные отложения являются «хранилищем информации» об аккумуляции химических веществ, токсикологические исследования грунтов позволяют получить достоверную информацию о наличии загрязнения. В табл. 10.3.2 представлены результаты исследований ТМ, НУВ и хронической токсичности в донных отложениях.

В донных отложениях концентрация кадмия превышала принятый норматив (усредненные почвы мира) [Бреховских, 2006] в пробах со станций 12, 14, 15 и 19 в 1,6–2,2 раза. Концентрация свинца оказалась немного выше норматива в донных отложениях на ст. 15 и была близка к нормативу на ст. 14 и 19. Концентрация меди была выше норматива в донных отложениях на ст. 15 в 1,2 раза и высокой в пробах ст. 12, 14, 16, 19 и 20. Концентрация марганца в донных отложениях ст. 14 выше норматива в 1,5 раза; ст. 15, 16, 19 и 20 – в 4–6 раз. Повышенное содержание марганца в донных отложениях озера отражает особенности «железо-марганцевой провинции на Карельском перешейке» [Семенович, 1966]. Аномально высокие концентрации марганца связаны с аутогенным минералообразованием. В связи с этим повышенные содержания марганца, а также свинца и меди являются специфической особенностью местной геохимической провинции [Субетто и др., 2013]. В донных отложениях со ст. 15 и 14, расположенных в шхерных районах Ладожского оз. близ городов Лахденпохья и Сортавала, обнаружено повышенное содержание НУВ – в 1,4 и 1,2 раза выше регионального норматива. В центральном районе озера (ст. 19) отмечено незначительное превышение концентрации НУВ, что, скорее всего, связано с естественным осадконакоплением (аккумуляцией детрита), поскольку характер грунта представлен серым илом и глиной [Крылова и др., 2020].

Таблица 10.3.2

Концентрация тяжелых металлов (мг/кг), НУВ (мг/кг), показатель хронической токсичности (ХТ: В – по выживаемости; П – по плодовитости), характер грунта в пробах донных отложений Ладожского оз., отобранных в августе 2019 г.

Станции отбора (рис. 10.2.1)	Характер грунта	Cd	Pb	Cu	Mn	НУВ	ХТ
1	Мелкий и круп. песок	0,232	3,2	3,69	192,8	59,2	–
2	Мелкий песок	–	–	–	–	–	не оказывает
3	Мелкий песок	0,196	3,1	1,25	242,2	54,0	не оказывает
4	Серый ил, песок	0,245	5,3	6,30	310,3	69,2	В
5	Камни, песок	–	–	–	–	–	не оказывает
6	Песок с наилом с запахом сероводорода	–	–	–	–	–	В
7	Песок	0,206	2,6	1,42	284,4	51,2	В

Станции отбора (рис. 10.2.1)	Характер грунта	Cd	Pb	Cu	Mn	НУВ	ХТ
8	Песок	0,0522	2,4	2,26	159,5		не оказывает
9	Крупный песок, наилок	0,216	7,2	2,92	400,3	69,6	не оказывает
10	Коричневая глина, серый ил	–	–	–	–	–	не оказывает
11	Мелкие камни, песок	0,3435	5,5	5,22	1370,8		–
12	Серый ил	0,625	10,5	14,33	583,4	86,4	–
14	Серый ил, коричневый ил	0,697	29,4	26,13	1498	246,4	В
15	Серый ил, глина	0,765	39,0	35,62	6434	210,0	–
16	Серый ил	0,232	24,8	28,10	4041	95,2	–
19	Серый ил, глина	0,560	18,5	19,15	4506	200,0	–
20	Серый ил	0,304	5,7	2,04	286,2	113,6	–
22	Песок, камни	0,155	3,76	1,16	169,0	52,8	–
25	камни	0,165	3,7	1,16	169,0	42,4	–
норматив		0,35*	35*	30*	1000*	180**	

* – усредненные почвы мира [Бреховских, 2006]; ** – региональный норматив [Нормы и критерии..., 1996]; «–» – анализ не проводился.

По совокупности полученных результатов исследований проб воды и донных отложений в августе 2019 г. в открытых районах Ладожского оз. можно сделать вывод, что самым неблагоприятным с точки зрения среды обитания ВБР является район, находящийся в месте влияния вод Якимварского залива и г. Лахденпохья (ст. 15). Также неблагоприятными с точки зрения антропогенного влияния являются районы поселков Импилахти, Видлища, районы влияния рр. Янис, Бурной, Свирская губа и Волховская губа.

Литоральная зона (2019 г.) Результаты проведенных исследований в литоральном рейсе 2019 г. позволили получить расширенную картину состояния проблемных мест озера [Андроникова и др., 2011]. В воде превышений ПДКвр по кадмию и свинцу не выявлено. Превышение ПДКвр по меди в 2 и более раза было обнаружено на следующих станциях: ст. 16 (мыс Умоппиуми) – в 3,5 раза, ст. 7 (Андрусовская бухта) – в 2,3 раза, ст. Свирская губа, пляж – в 2,2 раза, ст. 23 (Приозерск) – в 2,9 раза, ст. 26 (Владимирская бухта) – в 2,4 раза, ст. 21 – в 2,8 раза; Якимварский залив, ст. 21 – в 2 раза, ст. С1 Сортавала – в 2,8 раза, ст. 23 Приозерск – в 2,9 раза. Приозерск недалеко от ст. 16 ГХ – в 3,2 раза, ст. 26 Владимирская бухта – в 2,4 раза, ст. 27 (Тайполовский з-в, устье р. Бурной) – в 2,4 раза, ст. у р. Бурная – в 2,5 раза, ст. 30 Осиновец – в 2 раза, и на ст. 1 и 3 Щучьего залива – в 2 раза (табл. 10.3.2). В основном эти превышения могут быть объяснены высоким природным фоном. Превышение ПДКвр по марганцу обнаружено только в Щучьем заливе (более 2 ПДКвр). При этом самое высокое значение на ст. 1 в районе дамбы (2,6 ПДКвр). На ст. 2 Щучьего залива также замечено превышение норматива по НУВ в 6 раз, что, скорее всего, свя-

зано с интенсивной вегетацией водной погруженной растительности (в основном, *Potamogeton perfoliatus*). Превышение по НУВ в воде в 2 и более раз было выявлено на следующих станциях: ст. 10 Питкяранта напротив завода в открытом озере (8,2 ПДК вр), ст. 12 выход из залива Импилахти и ст. 9 Ууксунлахти (4 ПДК вр), у р. Бурная (2,4 ПДК вр), Щучий залив ст. 2 центр (6 ПДК вр). На этих станциях были обнаружены концентрации НУВ в воде от 0,2 до 0,41 мг/л и на них же обнаружены высокие концентрации общего фосфора, что может свидетельствовать об эвтрофировании акваторий. По данным 2019 г., среднее медианное значение концентрации НУВ в открытых районах и литоральной зоне составило 0,04 мг/л, что находится в пределах средних многолетних значений.

По результатам поставленных экспериментов на хроническую токсичность на *D. magna* получено, что вода с некоторых станций обладала токсичными свойствами. Это вода со ст. 16, мыс Умоппиуми (по плодовитости), ст. 12 – выход из залива Импилахти (по выживаемости), у Питкяранты рядом с заводом ЦБК (по плодовитости), ст. 9 – Ууксунлахти (по выживаемости и плодовитости), ст. 20 – о. Путсари (по плодовитости), на ст. Лахденпохья и на выходе из шхерной части в открытом озере (по плодовитости), на 2 ст. у о. Койеонсари (по выживаемости и плодовитости), ст. 27 – Тайполовский з-в в устье р. Бурной (по плодовитости), ст. 28 – Бухта далекая (по плодовитости). Несмотря на то что острой токсичности в исследуемой воде выявлено не было, следует обратить внимание на тот факт, что на станциях в районе посёлков Импилахти и Видлица была отмечена гибель тест-организмов с достаточно высоким по отношению к другим исследуемым пробам процентом (33,3%).

При исследовании проб донных отложений на 3 станциях выявлены высокие концентрации кадмия при ориентире на усредненные почвы УП (0,35 мг/кг) и средние концентрации по медиане в литоральной зоне озера (0,076 мг/кг). В число этих станций вошли Питкяранта рядом с заводом ЦБК (1,7 УП Cd), ст. 7 Андрусовская бухта (0,34 мг/кг) и ст. у г. Лахденпохья (32 мг/кг). Превышение УП по свинцу было отмечено только в Щучьем заливе на ст. 1 (у дамбы). Там была обнаружена концентрация этого элемента 85,83 мг/кг, что составляет 2,5 УП Pb и в 19,5 раза выше среднего значения по литорали озера. Превышение значения УП по меди было выявлено в Якимварском заливе около п. Соролы (ст. 21) (37,38 мг/кг) и на ст. С1 Сортавала (33,28 мг/кг), что немного превысило УП Си и значительно выше средних значений по литоральной части озера – в 10,7 и 9,5 раза соответственно. По марганцу отмечено превышение по УП рядом со ст. 10 Питкяранта у завода ЦБК в 1,6 раза и у пос. Видлица в 1,3 раза при средней концентрации 131 мг/кг. Следует обратить внимание также на ст. Лахденпохья и ст. С1 Сортавала, где обнаружены концентрации марганца выше средней в донных отложениях по озеру в 4,4 и 3,3 раза соответственно. На 2 станциях выявлены превышения норматива в донных отложениях по нефтяным углеводородам. К ним относятся Лахденпохья – 944 мг/кг, что выше более чем в 5 раз норматива и в 16 раз выше средних значений концентраций НУВ в донных отложениях по озеру, и ст. 16 – мыс Умоппиуми (267,2 мг/кг). В Щучьем заливе на ст. 4 обнаруженная концен-

трация совпадает с нормативом. Но только на ст. Лахденпохья по результатам хронического опыта на дафниях было обнаружено, что водная вытяжка из донных отложений оказывала действие по выживаемости. Согласно проведенным экспериментам на хроническую токсичность было получено, что пробы донных отложений со ст. 15 (Ляскеля), ст. 12 выход из залива Импилахти, у п. Видлица в Яккимварском заливе – ст. 21в, Лахденпохья и на двух станциях близ р. Волхов (устье и в 2 км от устья Волхова) обладали хронической токсичностью.

Таким образом, из исследованных станций литоральной зоны озера в 2019 г. по токсикологическим параметрам только 5 станций могут быть оценены как экологически чистые для обитания гидробионтов. К ним можно отнести станции в районе о. Мانتинсари, устье Свири, ст. 17 залив (у п-ва Рауталахти), ст. 26 (Владимирская бухта). Еще на двух других станциях ситуация была достаточно благоприятная (Л3–14 Назия и ст. 2 – Кобона), но опытов по биотестированию в случае этих станций не было.

Пелагиаль и бенталь озера за пределами литоральной зоны (2020 г.)

В июне 2020 г. величины концентраций тяжёлых металлов менялись в целом в воде озера следующим образом. Концентрации кадмия варьировали от 0,0 до 0,0004 мг/л, свинца – от 0,0001 до 0,0022 мг/л, меди – от 0,001 до 0,035 мг/л, марганца – от 0,0 до 0,319 мг/л. Самое высокое значение концентрации меди (34,6 ПДКвр) было обнаружено на ст. 17 в поверхностном горизонте, что может быть связано с влиянием р. Бурной. Самое большое значение концентрации марганца (32 ПДКвр) обнаружено на ст. 16 в среднем слое (устье р. Вуоксы). Самая высокая концентрация кадмия была обнаружена на ст. 22 в придонном слое. Средние по медиане значения концентраций кадмия, свинца и марганца были ниже ПДКвр. По меди отмечено превышение среднего значения по отношению к ПДКвр в 2 раза. Концентрация меди в среднем в деklinальной зоне составляла 0,0042 мг/л, в профундальной и ультрапрофундальной – 0,0035 мг/л. При сравнении с летом и осенью 2019 г. значения по меди в летнее и осеннее время в 2008 г. были ниже в 1,3–3 раза. Следует учитывать, что межгодовая изменчивость концентраций металлов по акватории озера определяется как неоднородностью поступления их с водосбора, так и гидродинамическими условиями в озере [Сусарева, Петрова, 2013].

По результатам биотестирования на пробах воды, отобранной в июне, острой токсичности выявлено не было. Хроническая токсичность воды выявлена только на ст. 24 – правая часть бухты Петрокрепость, где результаты экспериментов показали хроническую токсичность по выживаемости и плодовитости. На ст. 15 (в месте влияния г. Лахденпохья) в среднем горизонте (глубина 85 м) был отмечен большой процент гибели самок по отношению к контрольному опыту. Там же наблюдалось одно из самых больших значений концентрации общего фосфора – 0,035 мг Р/л, и самая большая концентрация минерального фосфора – 0,022 мг Р/л.

В сентябре 2020 г. картина сильно не изменилась. Концентрации кадмия варьировали от 0,0 до 0,0008 мг/л при среднем значении <0,0001; свинца – от 0,0 до 0,0132 мг/л при среднем значении 0,001; меди – от 0,0 до 0,008 мг/л при среднем значении 0,002; марганца – от 0,003 до

0,035 мг/л при среднем значении 0,008. Превышений ПДКвр в среднем по озеру по кадмию, свинцу и марганцу выявлено не было. Концентрации меди в среднем по озеру выше ПДКвр в 2,1 раза. Самое высокое значение концентрации меди (8 ПДКвр) было обнаружено на ст. 16 в поверхностном горизонте, что может быть связано с водосбором р. Вуокса и производными г. Приозерска, поскольку в среднем и нижнем горизонтах концентрации меди были в 4 раза ниже. На станциях с влиянием шхер – 15, 14, 13, 12, 11 – превышение ПДКвр по меди в 6–7 раз наряду с природной составляющей связано с влиянием близлежащих городов и поселков. На некоторых станциях озера обнаружены превышения ПДКвр по свинцу и марганцу. По свинцу самые большие концентрации по-прежнему были обнаружены на ст. 15 (2,2 ПДКвр в среднем и 1,7 ПДКвр в придонном горизонте), что связано с влиянием г. Лахденпохья. Близкое к ПДКвр значение было обнаружено на ст. 11 (в районе п. Видлица). Самое большое значение концентрации марганца (3,5 ПДКвр) обнаружено на ст. 2 в поверхностном горизонте (Волховская губа). Самые высокие концентрации марганца связаны с влиянием р. Сясь. Превышение ПДКвр данного вещества более чем в 2 раза выявлены на ст. 6, 14, 15, 17, 18, 19. По кадмию самые высокие значения были обнаружены на ст. 10, 11, 14, 15, 18. При этом самые высокие значения выявлены на ст. 11 (зона влияния р. Видлица). Согласно приведённым в табл. 10.2.5 значениям, в сентябре 2020 г. средние значения концентраций кадмия, свинца и марганца были ниже ПДКвр. По меди отмечено превышение значения ПДК в 1,6 раза. Концентрация нефтяных углеводородов в среднем (по медиане), как и в 2019 г., составила 0,04 мг/л, что не выходит за пределы ПДКвр. На некоторых станциях в поверхностном горизонте были обнаружены концентрации НУВ выше ПДКвр. В их число вошли ст. 13, где было обнаружено 2 ПДКвр, ст. 16 и 19, где было обнаружено 0,07 и 0,09 мг/л соответственно, ст. 2 и 4 (расположены в акватории Свирской губы), на которых отмечено превышение ПДКвр в 2 и 2,8 раза соответственно. Обнаруженные в воде Ладожского оз. НУВ имеют в большей степени природное происхождение, являясь частью лабильного автохтонного органического вещества озера [Коркишко и др., 1995; Крылова, Коркишко, 2000; Крылова и др., 2000; Коркишко и др., 2001; Коркишко, Крылова, 2002; Игнатьева и др., 2015]. Среднее значение общего фосфора по озеру за исследуемый период составляло 0,018 мг·Р/л, что соответствует мезотрофному статусу.

В донных отложениях концентрация кадмия превышала принятый норматив УП в пробах ст. 10, 11, 14, 15, 16, 19, 25. При этом на ст. 10 и 25 обнаружено незначительное превышение (менее чем в 1,5 раза). На ст. 14 (в районе влияния г. Сортавала) концентрация кадмия превысила норматив в 3 раза, на ст. 15, 16 и 19 – в 1,6–2 раза. Концентрация свинца была близкой к нормативу или немного его превысила на ст. 14, 15, 16, 19. Вклад в увеличение концентрации свинца на ст. 14, 15 и 16 связан не только с природной нагрузкой, но и влиянием близлежащих городов (Сортавала, Лахденпохья, Приозерск). Отмечено превышение норматива по меди на ст. 12, 15, 16, 19 с самой большой концентрацией на ст. 12 (район влияния г. Питкяранта). На ст. 15 и 16 было отмечено превышение

норматива в донных отложениях по марганцу в 4 раза и на ст. 19 в 4,7 раза (табл. 10.2.6). Очень высокие значения содержания марганца в грунте, обнаруженные в сентябре на ст. 20, объясняются, по всей вероятности, наличием в грунте железомарганцевых конкреций, что нередко для донных отложений в этой части акватории озера [Семенович, 1966]. Самые высокие концентрации НУВ отмечены так же, как и в 2019 г., на ст. 13, 14, 15, 16 и 19. Самые высокие концентрации НУВ обнаружены там, где грунт выражен коричнево-серым илом, что говорит о деструкции органического вещества в детрите (ст. 13, 14 и 15).

Анализ представленных результатов натурных исследований позволяет сформулировать следующие выводы.

Отмечающиеся превышения нормативов содержания отдельных токсичных веществ в воде и донных отложениях не носят систематического характера и не являются критическими для рыбного населения озера.

Результаты токсикологических исследований указывают на достаточно благоприятное экологическое состояние большей части акватории Ладожского оз. за исключением локальных участков с выраженным антропогенным воздействием.

Самым неблагоприятным для среды обитания гидробионтов является район, примыкающий к г. Лахденпохья, а самыми чистыми – акватории в районе о. Мانتинсари, устья Свири, залива у п-ва Рауталаhti и Владимирской бухты.

10.4 Воспроизводство рыб и беспозвоночных в условиях загрязнения озера

Загрязнение поверхностных вод во всем мире приняло угрожающие размеры [Walker et al., 2019], что привело к деградации многих рыбохозяйственных водоемов. В первую очередь в северо-западном регионе пострадали наиболее ценные виды сиговых и лососевых рыб. Так, например, объем промысловых водных ресурсов в Финском заливе за последние десять лет снизился более чем в два раза, а численность популяций атлантического лосося, краснокнижных видов (ладожского лосося, палии и волховского сига) в крупнейшем пресноводном водоеме региона, Ладоге, упала до промыслового уровня и поддерживается только заводским воспроизводством, которое недостаточно эффективно [Гарлов и др., 2019; Гарлов, Аршаница, 2019]. Несмотря на заводское воспроизводство, численность балтийской популяции атлантического лосося настолько снизилась, что его промысел с 2009 г. прекратился.

Аналогичная ситуация складывается и с сигами Ладожского оз. Еще в прошлом столетии было отмечено, что в результате загрязнения нерестилищ сига в южной части озера, его промысловые запасы сокращаются в связи с ухудшением условий воспроизводства и активизацией антропогенных процессов [Федорова, Аршаница, 1988], а патологоанатомическое исследование половозрелых особей показало, что они массово поражены токсикозом [Аршаница, 1988]. Результаты проведенных исследований позволяют предположить, что основной причиной снижения запасов и уло-

вов сига и других рыб является воздействие токсикологического фактора на процесс естественного воспроизводства [Аршаница, 1988; Огородникова, Суслопарова, 1995; Аршаница и др., 2008; Аршаница, Ляшенко, 2010; Гребцов, 2014; Стекольников, 2014а]. Это связано как с чувствительностью сига и лосося к воздействию основных типов загрязнения водоемов, так и с продолжительностью инкубационного периода, в течение которого продолжается воздействие загрязняющих веществ при их сублетальном уровне [Аршаница и др., 2018б]. В организм рыб соединения металлов и другие загрязнители попадают, как правило, через дыхательную и пищеварительную системы [Попов, 2002], поэтому без анализа состояния кормовой базы рыб в рыбохозяйственных водоемах невозможно понять последствия воздействия загрязняющих веществ на воспроизводство популяций рыб. Известно, что загрязняющие вещества приводят к развитию различных нарушений и патологий у гидробионтов как на организменном, так и на популяционном уровне [Реакции гидробионтов ..., 1983; Биота северных озер ..., 2012; Макрушин и др., 2013; Choudri, Baawain, 2016; Amoatey, Baawain, 2019; Wokoma, 2019].

В этой связи целью данной работы является выявление взаимосвязи факторов воздействия загрязняющих веществ и ухудшения воспроизводства сообществ беспозвоночных и рыб, что приводит к деградации водных биологических ресурсов в Ладоге.

Основой настоящего исследования послужили результаты работ на рыбободных заводах Ленинградской обл. по воспроизводству лососевых и сиговых рыб. Используются биологические и химико-аналитические методы оценки состояния рыб и среды их обитания [Аршаница, 1988; Аршаница и др., 2017; Аршаница и др., 2018а; 2018б]. Эколого-токсикологические исследования проб воды, атмосферных осадков, элютриатов донных отложений проводились методом биотестирования в соответствии с ФР 1.39.2007.03.222. Для оценки состояния рыб при патолого-анатомическом исследовании использовали методику, позволяющую дать оценку патологического состояния по пятибалльной шкале повреждений [Аршаница, Лесников, 1987]. Химико-аналитические исследования проб воды, элютриатов донных отложений, атмосферных осадков и рыб выполнены на базе испытательной лаборатории продуктов питания и объектов окружающей среды «АНАЛЭКТ» (аттестат аккредитации РОСС. RU. 001МН. 38) института токсикологии Минздрава РФ. Исследования макрозообентоса проводились в соответствии со стандартными методами, которые применяются Институтом озераведения РАН на Ладожском оз. [Курашов и др., 2018]. Также использовались литературные и архивные материалы.

Искусственное воспроизводство ценных видов рыб является базой, на которой основана современная аквакультура. Однако загрязнение источников водоснабжения ряда рыбободных заводов наносит большой ущерб этой отрасли рыбного хозяйства, что показано на примере рыбободных заводов Ленинградской обл. по выращиванию сиговых и лососевых рыб. Волховский рыбободный завод был построен в 1927 г. после возведения плотины Волховской ГЭС в 1925 г., которая перекрыла путь некогда многочисленному волховскому сигу Ладожского оз. к местам его естественного

нереста. Его запасы, несмотря на запуск рыбоводного завода, стали постепенно снижаться и особенно интенсивно – начиная с конца шестидесятых годов прошлого столетия после строительства промышленных предприятий в городах Кириши, В. Новгороде и Волхове. Загрязненные сточные воды предприятий и выбросы загрязняющих веществ в атмосферу превратили р. Волхов в наиболее загрязненный водоем в водной системе: оз. Ильмень – р. Волхов – оз. Ладожское – р. Нева-Невская губа. Это показали клинические исследования 80-х годов прошлого столетия [Влияние загрязнений ..., 1988] и исследования последующих лет [Аршаница, Ляшенко, 2010; Гребцов, 2014; Стекольников, 2014а; 2014б]. Река Волхов – один из основных притоков, определяющих состояние южной части Ладоги в целом и Волховской губы в частности. От истока к устью в р. Волхов попадают бытовые и токсичные стоки промышленных и муниципальных предприятий Великого Новгорода, Киришей, Волховстроя, Новой Ладоги и других населенных пунктов. В 2015 г. воды р. Волхов в районе г. Кириши характеризовались как очень загрязненные (3-й класс, разряд «б») [Об экологической ситуации ..., электронный ресурс (а)]. Не изменилась ситуация и в 2018 г. [Об экологической ситуации ..., электронный ресурс (б)]. Не лучшим образом обстоят дела и с другими крупными притоками южной Ладоги. Воды рр. Свирь, Оять, Паша, Сясь в 2015–2018 гг. характеризовались как загрязненные (3-й класс, разряд «а») [Об экологической ситуации ..., 2016; Об экологической ситуации ..., 2019].

Исследования сезонного распределения металлов в абиотических компонентах и ихтиофауне р. Волхов показали превышения ПДК алюминия, меди, марганца на всех створах от истока до устья, свинца на трех створах, хрома на двух створах. При этом концентрации мышьяка, кадмия, кобальта, никеля и селена не превышали рыбохозяйственных ПДК. Также было показано, что концентрация кислорода, соединений азота, кислотность, БПК были в пределах нормы [Стекольников, 2013; 2014а]. Подобная ситуация с загрязняющими веществами была и в прежние годы [Влияние загрязнений ..., 1988], что приводило к деградации сообществ беспозвоночных в р. Волхов. Так, согласно данным, приведенным в работе [Влияние загрязнений ..., 1988], можно оценить значения индекса Гуднайта и Уитлея (ИГУ) [Goodnight, Whitley, 1961] на всем протяжении р. Волхов (табл. 10.4.1). Лишь в истоке р. Волхов из оз. Ильмень и в устье этой реки состояние ее вод могут быть охарактеризованы по этому индексу как «условно чистые». Однако в случае устьевой зоны низкие значения ИГУ во многом объясняются сгонно-нагонными явлениями вод Ладожского оз., которые разбавляют загрязненные воды Волхова. В то же время индекс сапробности характеризует участки в устье р. Волхов как α - и β - α -мезосапробные (табл. 10.4.1). Проведенные патологоанатомические исследования рыб по всему течению р. Волхов также показали, что токсикоз встречается у 50–100% обследованных экземпляров различных видов рыб, а на некоторых участках реки у 100% рыб [Стекольников, 2014а].

Исследования показали, что наиболее загрязненным участком реки стал верхний бьеф Волховского руслового водохранилища – место водозабора рыбоводного завода. Ихтиофауна на акватории верхнего бьефа оказалась

крайне малочисленна и представлена отдельными видами, тотально поражена токсикозом, нарушено естественное воспроизводство с высоким процентом пораженных личинок [Стекольников, 2014a]. Химико-аналитическое исследование воды, донных отложений, атмосферных осадков и рыб показало наличие всех исследованных металлов, особенно в атмосферных осадках [Гребцов, Стекольников, 2015]. Причем, судя по характеру стоков и атмосферных выбросов, кроме металлов, в них присутствовали токсичные органические вещества, в конечном итоге попадающие в р. Волхов. Биологические методы контроля качества вод оказались высокоинформативными показателями уровня загрязнения верхнего бьефа Волховского водохранилища и реки в целом.

Таблица 10.4.1

Значения численности олигохет ($N_{ол}$, экз./м²) и всего макрозообентоса ($N_{мб}$, экз./м²) [Влияние загрязнений ..., 1988], значения индекса Гуднайта и Уитлея (ИГУ) и класс сапробности на различных участках р. Волхов

Участок реки	$N_{ол}$	$N_{мб}$	ИГУ	Вода	Зона сапробности
Исток Волхова	800	4020	0,20	условно чистая	Олиго- β- мезосапробная
После г. Новгород	3700	4900	0,76	грязная	α мезосапробная
Выше стоков ПО «Акрон» (ранее НПО «Азот»)	2000	4100	0,49	слабо загрязненная	β-α-мезосапробная
Ниже стоков ПО «Акрон» (ранее НПО «Азот») на 500 м	7000	7400	0,95	очень грязная	Полисапробная
Ниже стоков ПО «Акрон» (ранее НПО «Азот») на 1500 м	500	1400	0,36	слабо загрязненная	β-α-мезосапробная
Выше стоков г. Кириши	1100	4700	0,23	условно чистая	β-α-мезосапробная
Сброс Киришского биохимического завода	2500	4700	0,53	загрязненная	α-мезосапробная
Устье р. Черной	2400	3200	0,75	грязная	Полисапробная
Устье канала ГРЭС-19	450	450	1,00	очень грязная	Полисапробная
Выше плотины ГРЭС (левый берег)	100	100	1,00	очень грязная	Полисапробная
Ниже стоков ВАЗ (Волховский алюминиевый завод)	2500	4100	0,61	загрязненная	α-мезосапробная
Выше г. Новая Ладога (левый берег)	400	1600	0,25	условно чистая	β-α-мезосапробная
Выше г. Новая Ладога (правый берег)	4000	9100	0,44	слабо загрязненная	α-мезосапробная
Устье р. Волхов (левый берег)	300	1100	0,27	условно чистая	β-α-мезосапробная
Устье р. Волхов (правый берег)	350	1050	0,33	условно чистая	α-мезосапробная

Имеющаяся информация однозначно свидетельствует о значительном загрязнении вод р. Волхов, которые приносят в Волховскую губу Ладожского оз. большое количество загрязняющих веществ. Влияние загрязненной волховской воды явилось причиной массовых случаев гибели инкубируемой

икры, личинок и молоди сига. Так, в ноябре 1985 г. погибло 977 тыс. экз. инкубируемой икры сига; в мае 1989 г. – 297,4 тыс. подращиваемых личинок; в июне 1996 г. – 109,6 тыс. экз. молоди сига; в июне 1998 г. также наблюдался массовый отход молоди сига, а в 1999 г. произошел повышенный отход инкубируемой икры и т.д. Неоднократные патологоанатомические исследования сига неизменно показывали его тотальное поражение токсокозом [Кольчугина и др., 2010; Стекольников, 2014а]. Выпуск ослабленной и пораженной токсокозом продукции рыбоводного завода (личинок сеголеток) снижает их жизнеспособность и адаптацию в водоеме. Косвенным подтверждением вышеизложенного является факт того, что волховский сиг занесен в Красную книгу как исчезающий вид.

В настоящее время в южной части Ладожского оз. наблюдается неудовлетворительная динамика вылова, особенно в отношении ценных видов рыб. По мнению Л. А. Кудерского [2013], динамика уловов в Ладожском оз. может быть объяснена наличием «долгопериодного цикла изменений продукционного потенциала озера и уловов рыбы в нем». По данным Л. А. Кудерского, фаза низких уловов составляет порядка 14–17 лет и наблюдалась, во-первых, в период с 1955 по 1969 г. и, во-вторых, с 1992 по 2008–2009 гг. Однако, как показывают данные, приведенные в статье [Лукин и др., 2017], к 2015 г. (т.е. к примерной середине ожидаемого периода увеличения уловов) произошло уменьшение уловов или не произошло выхода на уровень, сопоставимый с периодом высокого промысла (1970–1991 гг.) для следующих рыб: лососевые, ряпушка, судак, налим, сиви. Продемонстрировали тенденцию к увеличению показателей вылова окунь, мелкий частик, щука, лещ, корюшка, т.е. в основном рыбы, более устойчивые к ухудшению состояния озерной среды.

Согласно материалам, доступным в [Размышления на берегу Ладоги ...], в 2016, 2017, 2018 гг. наблюдалось дальнейшее снижение уловов сегов и судака. О неудовлетворительном состоянии запасов и снижении уловов судака, сегов, ряпушки, корюшки к 2020 г. говорят материалы заседания северо-западного бассейнового научно-промыслового совета Западного рыбохозяйственного бассейна от 21 июня 2019 г. [Протокол заседания ...].

Южная часть Ладожского оз. является одним из основных рыбопромысловых районов этого водоема, поэтому целесообразно рассмотреть ситуацию с сообществами беспозвоночных, сложившуюся в последние годы. Поступление загрязняющих веществ с притоками в южную часть озера постепенно привело к ухудшению воспроизводства популяций беспозвоночных (кормовой базы рыб), в частности, бентосных беспозвоночных. Так, наблюдается значительное снижение биомассы макробентоса в Волховской губе, одной из самых продуктивных зон озера, от 60-х годов прошлого века к настоящему времени (рис. 10.4.1). Подобное снижение количества, а возможно, и трофического качества донных беспозвоночных в результате воздействия загрязнителей не могло не сказаться на падении уловов и развитии токсокозов у рыб Волховской губы. Аналогичная, но менее выраженная тенденция наблюдается и в губе Петрокрепость (рис. 10.4.2). Эта же тенденция просматривается и для всей южной Ладоги (рис. 10.4.3).

Ранее уже отмечался факт снижения биомасс макробентоса в южной мелководной части Ладоги [Суслопарова и др., 2014; Суслопарова и др., 2017] и в целом в прибрежной зоне озера [Курашов и др., 2018]. Кроме того, по данным [Курашов и др., 2018], в Волховской губе в 2013–2017 гг. наблюдались самые низкие показатели развития летнего зоопланктона (биомасса 0,06–0,30 г/м³). В предыдущие годы биомасса летнего зоопланктона здесь, как правило, превышала 0,5 г/м³, достигая величин 2 и более г/м³. Такой низкий уровень развития зоопланктона, возможно, связан с подавлением воспроизводства планктонных беспозвоночных загрязнителями, поступающими с водами р. Волхов.

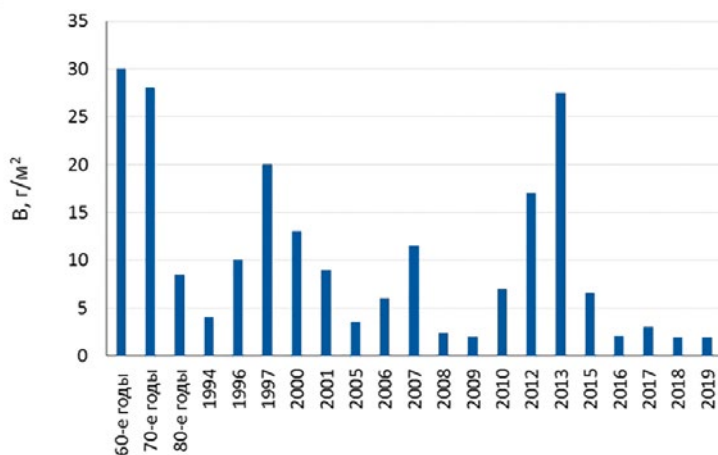


Рис. 10.4.1 – Динамика изменения средних значений (медиана) биомассы макрозообентоса (B , г/м²) в Волховской губе Ладожского оз. (приведены данные по станции 1 «приемный буй» 60°09,6' N, 32°20,9' E)

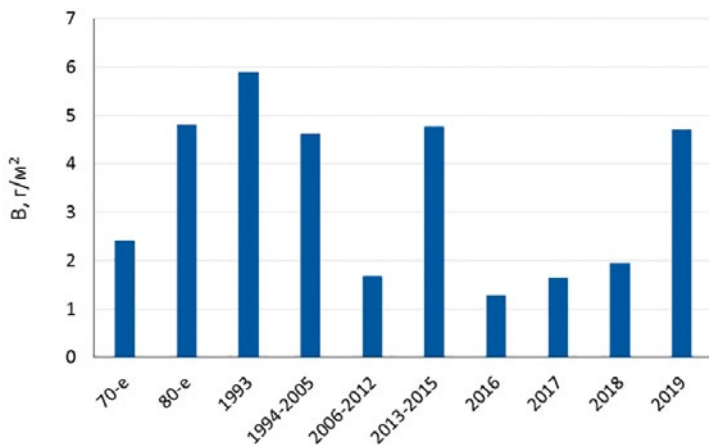


Рис. 10.4.2 – Динамика изменения средних значений (медиана) биомассы макрозообентоса (B , г/м²) в бухте Петрокрепость Ладожского оз.

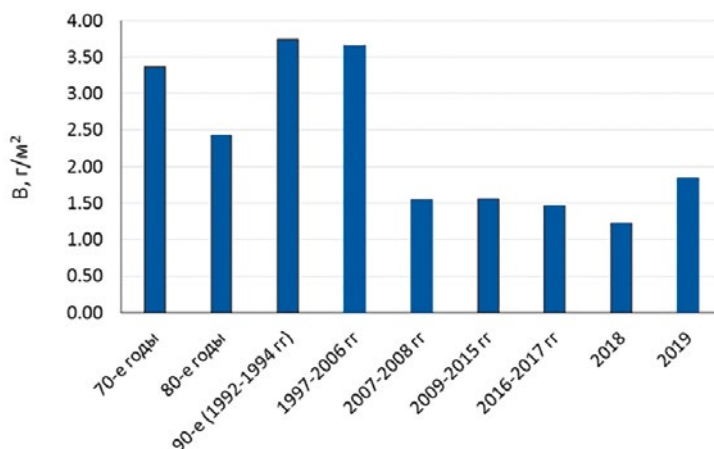


Рис. 10.4.3 – Динамика изменения средних значений (медиана) биомассы макрозообентоса (B , г/м²) в южном прибрежном районе Ладожского оз.

У зоопланктеров из Ладожского оз. (прежде всего из Волховской губы) были обнаружены значительные патологические изменения у большого числа видов [Макрушин и др., 2016]. Причем частота встречаемости патологических изменений в Ладожском оз. была выше, чем у ракообразных из волжских водохранилищ и Финского зал. Это связано с тем, что в низкоминерализованной воде Ладоги вредное действие загрязняющих веществ проявляется сильнее, чем в жесткой воде Волги и Финского зал. [Макрушин и др., 2016].

Возможно также, что особенностью влияния загрязняющих веществ на гидробионтов Ладоги в последние годы и настоящее время, подобно Финскому зал. [Pozdnyakov et al., 2020], является появление и усиление нового фактора загрязнения, а именно влияния микропластика [Fendall, Sewell, 2009; Поздняков, Иванова, 2018] и наночастиц [Анциферова, 2012; Полонский, Асанова, 2018], которые могут трансформировать и усиливать действие «традиционных» загрязняющих веществ, адсорбируя их на своей поверхности [Endo et al., 2005; Ashton, 2010; Frias et al., 2010; Lyon et al., 2007; Sadegh et al., 2017] и доставляя их в пищеварительную систему гидробионтов. При этом наночастицы могут также оказывать на них собственное токсическое воздействие [Lyon et al., 2007; Остроумов и др., 2014; Великородная, Почепцов, 2015]. Экспериментальные исследования на пресноводных рыбах (*Danio rerio* (Hamilton, 1822)) и моллюсках (*Lymnaea stagnalis* (L.)) с введением наночастиц с кормом показали, что наночастицы Fe и его оксида во всех исследованных концентрациях представляли опасность для гидробионтов, значительно увеличивая их смертность (вплоть до 100%), наночастицы Ni и его оксида показали меньшую токсичность, проявлявшуюся в хронических экспериментах [Кожевникова и др., 2017; 2018]. Усиление влияния данного фактора в последние годы может быть связано с возрастающими масштабами внедрения нанотехнологий в различные области производства [Анциферова, 2012]. В результате наночастицы различной природы могут попадать в сточные и поверх-

ностные воды, нарушая процессы естественного воспроизводства рыб и беспозвоночных.

Резюмируя результаты проведенных исследований, можно считать, что одной из основных причин снижения запасов и уловов лососевых и сиговых рыб в рыбохозяйственных водоемах региона, включая Ладожское оз., является воздействие токсикологического фактора на их кормовую базу и воспроизводство их как в естественных, так и в заводских условиях, что особенно выражено сказывается в период раннего онтогенеза – критического периода в жизненном цикле рыб. Профилактика воспроизводства беспозвоночных и рыб в естественных водоемах связана с недопущением загрязнения притоков и самого озера. Это касается прежде всего сиговых и лососевых рыб как наиболее чувствительных ко всем основным типам загрязнения водоемов и длительным сроком инкубационного периода.

В целях профилактики токсикозов рыб на рыбоводных заводах, в первую очередь проектируемых, необходимо оценить уровень и тип загрязнения воды источника с учетом чувствительности, предполагаемого для воспроизводства соответствующего вида рыб. На существующих рыбоводных заводах в целях профилактики токсикоза рыб необходима водоподготовка – для очистки воды от взвешенных веществ, растворимых и эмульгированных соединений, включая нефтепродукты, наночастицы и ионы металлов. Можно рекомендовать ее реагентную обработку коагулянтами и флокулянтами с последующим отстаиванием и/или фильтрованием. Учитывая особенности водоема, для чувствительных сиговых и лососевых рыб необходимо подбирать безопасные реагенты и разрабатывать режим очистки с учетом водопотребления. Кроме того, есть и такие важные резервы, как использование артезианских вод и совершенствование методики искусственного воспроизводства популяций рыб на основе биотехнологических разработок [Гарлов и др., 2020].

Можно отметить, что в последние годы в Ладожском оз., особенно в его южной мелководной зоне, основной зоне размножения и нагула многих видов рыб, и других водоемах региона обострилась негативная ситуация нарушения воспроизводства рыб и беспозвоночных, что привело к падению вылова особенно ценных рыбных ресурсов. Необходимо принятие неотложных мер по сокращению поступления загрязняющих веществ в крупнейшее озеро Европы и другие важные рыбохозяйственные водоемы Северо-Западного региона.

10.5 Тяжелые металлы в промысловых видах рыб Ладожского озера

Ихтиофауна Ладожского оз. включает более 50 видов и разновидностей рыб. В рыбопродукционном отношении озеро неоднородно. Оно может быть подразделено на две тесно связанные, но не эквивалентные части: первая и основная – это обширные открытые акватории озера, где обитают так называемые озерные виды, вторая – прибрежная мелководная зона [Кудерский, 2013].

Исследовалось содержание тяжелых металлов – ТМ – в мышечных тканях промысловых рыб Ладожского оз. с целью оценки пригодности их ис-

пользования как продукта питания человека. Оценка основана на существующих нормативах допустимых концентраций токсикантов в пищевых продуктах [Гигиенические требования..., 2001]. В мышечных тканях рыб в настоящее время нормируется содержание наиболее токсичных элементов: кадмия, свинца, мышьяка и ртути по допустимой остаточной концентрации (ДОК) в пищевой рыбе.

Концентрации нормируемых элементов определялись в мышечных тканях рыб, выловленных в наиболее богатых в промысловом отношении участках прибрежной южной части озера: Шлиссельбургская губа, Новолadoжский канал, Волховская губа, устье р. Волхов, устье р. Сясь, Свирская губа, о. Сухо, о. Пайгач, районы Дубно, Вороново. Рассмотрены результаты анализов мышечных тканей рыб, выловленных в период с апреля по ноябрь в 2017–2020 гг. Преобладали следующие виды рыб: плотва, лещ, окунь. Приведены также данные по содержанию тяжелых металлов в щуке.

Анализы осуществлялись методом инверсионной вольтамперометрии и атомно-абсорбционным методом, по утвержденным методикам [Методика выполнения... – ПНД Ф 16.1.40–03; Методика количественного химического анализа..., 2009]. В мышечной ткани рыб определяли содержание нормируемых в настоящее время в пищевой рыбе микроэлементов – кадмия, свинца, мышьяка, ртути [СанПиН 2.3.2.560–96; СанПиН 2.3.2.1078–01]. Результаты анализов представлены в табл. 10.5.1–10.5.4. Для сравнения в некоторых случаях приведены результаты, полученные в 2013 г. В числителе приведены средние значения, в знаменателе – пределы колебаний. В этих же таблицах приведены допустимые концентрации определяемых элементов в пищевой рыбе.

Как следует из результатов, приведенных в табл. 10.5.1, концентрация нормируемых элементов в мышцах плотвы в большинстве проб не превышает допустимой для пищевой рыбы. Небольшие превышения обнаружены в единичных экземплярах. Так, по свинцу – 1,1 мкг/г – в мышцах плотвы, выловленной в бухте Петрокрепость (Шлиссельбургская губа) в октябре 2020 г. Концентрация ртути несколько превышает ДОК в экземплярах, выловленных в Волховской губе – 0,32–0,39 мкг/г – август – сентябрь 2013 г. и май 2018 г. соответственно. Почти двукратное превышение ДОК по ртути – 0,61 мкг/г обнаружено в мышцах плотвы, выловленной вблизи о. Сухо – август 2017 г., и 0,57 и 0,53 мкг/г – в Свирской губе и вблизи Осиновецкого маяка в апреле и августе 2020 г. соответственно. Кадмий в мышцах плотвы либо не обнаруживался, либо его концентрация была значительно ниже допустимой.

Как следует из результатов, приведенных в табл. 10.5.2, концентрация нормируемых элементов в мышцах леща в большинстве проб не превышает допустимой для пищевой рыбы. Превышения обнаружены в единичных экземплярах. По свинцу – незначительное превышение – 1,1 мкг/г – в мышцах леща, выловленного в устье р. Волхов в сентябре 2020 г. Концентрация мышьяка оказалась выше ДОК – 1,4 мкг/г в мышцах леща, выловленного в районе Шлиссельбурга в мае 2020 г. В некоторых пробах концентрация мышьяка близка к ДОК – 0,84–0,90 мкг/г – это лещи, выловленные в районе Шлиссельбурга в ноябре 2017 г., в устьях рр. Волхов и Сясь и в Свирской

губе – выловленные в 2020 г. Концентрация ртути превышает допустимую в мышцах леща, выловленного в Волховской губе, – 0,79 мкг/г в сентябре 2017 г. и в Свирской губе – 0,62 мкг/г – в апреле 2020 г. Кадмий в мышцах леща либо не обнаруживался, либо его концентрация была значительно ниже допустимой.

Таблица 10.5.1

**Концентрации ТМ (мкг/г сырой массы)
в мышцах плотвы (результаты 2013 и 2017–2020 гг.)**

Место отлова	Дата отлова	Cd	Pb	As	Hg
Волховская губа	08–09.2013	<0,001	<u>0,05</u> 0,02–0,07	<u>0,03</u> 0,01–0,04	<u>0,27</u> 0,22–0,32
Свирская губа	08.2017	0,006	0,037	0,33	0,27
о. Сухо	08.2017	0,004	0,027	0,36	0,61
Дубно	08.2017	0,006	0,100	0,33	0,27
Шлиссельбургская губа	11.2017	<u>0,004</u> 0,002– 0,005	<u>0,014</u> 0,003– 0,032	<u>0,61</u> 0,42–0,68	<u>0,15</u> 0,07–0,18
Шлиссельбургская губа	05.2018	<0,001	0,109	0,32	0,10
Новоладожский канал	05.2018	<0,001	0,033	0,15	0,12
Волховская губа, р-он ЦБК	05.2018	0,002	0,061	0,20	0,39
р-он Петрокрепости	07–08.2019	<0,001	0,241	1,29	0,04
Свирская губа	04.2020	0,003	0,018	0,49	0,57
Шлиссельбургская губа	05.2020	<0,001	<u>0,68</u> 0,64–0,72	<u>0,56</u> 0,30–0,83	<u>0,16</u> 0,14–0,18
Шлиссельбургская губа	09.2020	<0,001	<u>0,25</u> 0,22–0,27	<u>0,64</u> 0,57–0,70	<u>0,18</u> 0,09–0,27
Сухоневская банка, Осиновецкий маяк	08.2020	0,002	<u>0,07</u> 0,004–0,010	<u>0,53</u> 0,34–0,67	<u>0,18</u> 0,02–0,53
Шлиссельбургская губа	10.2020	<0,001	1,11	0,45	0,21
ДОК в пищевой рыбе, мкг/г		0,20	1,0	1,0	0,3 – не хищная 0,6 – хищная

По имеющимся данным за 1990–1991 гг. [Перевозников, Богданова, 1999], в мышечной ткани леща, выловленного в июне – августе в Волховской губе, концентрация кадмия была 0,11 мкг/г, что более чем на 2 порядка выше, чем в настоящее время (табл. 10.5.2). Содержание свинца (0,55 мкг/г) было близко к значениям, полученным в последние годы. В 1996 г. в Свирской губе в мышечной ткани леща была обнаружена концентрация свинца 0,05 мг/л [Перевозников, Лашевская, 2000]. Концентрации свинца примерно такого же порядка были обнаружены в мышечной ткани леща в Свирской губе в 2020 г. Концентрация ртути в леще из устья р. Волхов в 1991 г. составила 0,3 мкг/г. Это значение было гораздо выше, чем в лещах, выловленных в Волховской губе в 2019–2020 гг. (в 3–6 раз).

Таблица 10.5.2

**Концентрации ТМ (мкг/г сырой массы) в мышцах леща
(результаты 2013 и 2017–2020 гг.)**

Место отлова	Дата отлова	Cd	Pb	As	Hg
Волховская губа	08–09.2013	<0,001	0,06	0,01	<u>0,26</u> 0,13–0,38
устье р. Волхов	08.2017	0,004	0,036	0,26	0,79
Сясьстрой	08.2017	0,002	0,050	0,24	0,16
о. Пайгач	08.2017	0,004	0,047	0,37	0,04
Шлиссельбургская губа	11.2017	<u>0,006</u> 0,003–0,012	<u>0,19</u> 0,16–0,20	<u>0,63</u> 0,35–0,84	<u>0,10</u> 0,09–0,11
Волховская губа, ЦБК	05.2018	0,002	0,022	0,43	0,14
Волховская губа, центр	05.2018	<0,001	0,018	0,52	0,11
Волховская губа	07–08.2019	<0,001	0,156	0,16	0,05
Шлиссельбургская губа	07–08.2019	0,002	0,204	0,33	0,03
Свирская губа	04.2020	0,002	0,023	0,96	0,62
Шлиссельбургская губа	05.2020	<0,001	0,712	1,36	0,14
устье р. Сясь	05.2020	<0,001	0,287	0,86	0,16
устье р. Волхов	09.2020	<u>0,003</u> 0,001–0,007	<u>0,676</u> 0,23–1,12	<u>0,68</u> 0,47– 0,90	<u>0,10</u> 0,07–0,13
ДОК в пищевой рыбе, мкг/г		0,20	1,0	1,0	0,3 – не хищная 0,6 – хищная

Как следует из результатов, приведенных в табл. 10.5.3, концентрация нормируемых элементов в мышцах окуня в большинстве проб не превышает допустимой для пищевой рыбы. Обнаружены превышения допустимой концентрации свинца в мышечных тканях окуней, выловленных в районе Шлиссельбурга в сентябре 2020 г., – 1,2–2,3 мкг/г. Близка к ДОК концентрация мышьяка в мышцах окуня, выловленного в Шлиссельбургской губе в июле 2019 г. – 0,96 мкг/г. В 1987 г. в мышечной ткани окуня, выловленного в районе Осиновца, было обнаружено 0,41 мкг/г свинца [Перевозников, Лащевская, 2000]. В 2020 г. в этом же районе обнаруженные концентрации свинца в мышцах окуня были в 20 раз меньше (табл. 10.5.3). В мышцах щуки превышений ДОК обнаружено не было. Близка к ДОК была концентрация мышьяка в мышцах щуки из Новолadoжского канала в 2018 г. – 0,90 мкг/г. При сравнении с данными за 1990 г. [Перевозников, Богданова, 1999] можно отметить, что концентрация ртути в щуке (0,23 мкг/г), выловленной в устье р. Волхов, была выше примерно в 4 раза, чем в Волховской губе в 2019 г.

Анализировались и другие виды рыб, реже встречающиеся в южной части Ладожского оз., – ряпушка, чехонь, судак, ерш, корюшка, голавль, карась, налим. В мышечных тканях этих рыб превышений допустимых для пищевой рыбы концентраций нормируемых ТМ не обнаружено.

Таблица 10.5.3

Концентрации ТМ в мышцах окуня (результаты 2013 и 2017–2020 гг.)

Место отлова	Дата отлова	Cd	Pb	As	Hg
Волховская губа	08–09.2013	<0,001	0,05	0,01	0,26
Шлиссельбургская губа	11.2017	<u>0,004</u> 0,003–0,005	<u>0,079</u> 0,017–0,258	<u>0,36</u> 0,13–0,73	<u>0,15</u> 0,11–0,22
бухта Глубокое	05.2018	<0,001	0,017	0,30	0,32
Волховская губа, р. Сясь ЦБК	05.2018	0,002	0,041	0,30	0,55
Шлиссельбургская губа	07.2019	<0,001	0,037	0,96	0,04
Волховская губа	08.2019	0,001	0,016	0,31	0,06
Сухоневская банка	08.2020	0,001	<u>0,020</u> 0,011–0,028	<u>0,32</u> 0,21–0,51	<u>0,33</u> 0,04–0,55
Шлиссельбургская губа	09.2020	<u>0,019</u> 0,029–0,009	<u>1,76</u> 1,20–2,32	<u>0,51</u> 0,36–0,66	<u>0,14</u> 0,06–0,22
ДОК в пищевой рыбе, мкг/г		0,20	1,0	1,0	0,3 – не хищная 0,6 – хищная

Хочется обратить внимание на то, что принятые нормативы допустимых концентраций ТМ в рыбах разработаны с позиций пригодности их как продуктов питания человека, при этом неизвестно, насколько эти концентрации безвредны для самих рыб. Некоторое представление по этому вопросу можно получить, зная фоновые концентрации микроэлементов в рыбах, обитающих в местах, не подверженных техногенному воздействию: 0,1 мкг·Cd/г, 0,45 мкг·Pb/г, 0,1 мкг·As/г, 0,15 мкг·Hg/г 0,1 [Phipps, 1976]. Нетрудно видеть, что фоновые концентрации нормируемых элементов в рыбах значительно ниже допустимых в пищевой рыбе. Известно, что многие живые организмы, в том числе и рыбы, чувствительнее к загрязняющим веществам, чем люди. Поэтому по тяжелым металлам ПДК для воды рыбохозяйственных водоемов (ПДК_{вр}) значительно ниже, чем ПДК для питьевой воды [Предельно допустимые концентрации..., 2004].

Таблица 10.5.4

Концентрации ТМ в мышцах щуки (результаты 2017–2020 гг.)

Место отлова	Дата отлова	Cd	Pb	As	Hg
Сясьстрой	08.2017	0,004	0,023	0,36	0,28
Шлиссельбургская губа	05.2018	0,002	0,160	0,41	0,13
Новоладожский канал	05.2018	<0,001	0,049	0,90	0,29
Волховская губа	08.2019	<0,001	0,071	0,15	0,06
устье р. Сясь	05.2020	<0,001	0,192	0,36	0,11
ДОК в пищевой рыбе, мкг/г		0,20	1,0	1,0	0,3 – не хищная 0,6 – хищная

Представленный материал позволяет сделать вывод, что за последние 30 лет антропогенная трансформация озера не привела к существенному ухудшению состояния промысловых рыб по накоплению ТМ. По ряду металлов отмечено снижение концентраций, что указывает на улучшение ситуации в основных промысловых районах озера (относительно их загрязнения ТМ). Случаи превышения установленных нормативов содержания ТМ в пищевой рыбе обнаружены вблизи населенных пунктов с развитой промышленностью, в устьях рек, в бухтах с низким водообменом, что является тревожным симптомом, заставляющим задуматься о путях предотвращения дальнейшего загрязнения Ладоги.

10.6 Состояние популяции ладожской кольчатой нерпы в связи с воздействием природных и антропогенных факторов

При оценке состояния экосистемы Ладожского оз. необходимо учитывать продуктивность сообществ водоема на каждом трофическом уровне, их взаимодействие с другими группами организмов на всех уровнях [Улицhev, Труханова, 2017]. Ладожская нерпа (*Pusa hispida ladogensis* Nordquist), эндемичный подвид кольчатой нерпы, занесенный в Красную книгу Российской Федерации, является консументом высшего порядка, т.е. занимает верхний трофический уровень в экосистеме озера и тем самым замыкает пищевую цепь.

Цель исследования – определение текущего состояния популяции ладожской кольчатой нерпы в контексте сезонных изменений экологических факторов, а также выявление степени обособленности тюленей, обитающих в шхерном районе озера.

Нерпа – пагетодный (т.е. размножающийся на дрейфующих или прибрежных ледовых полях) вид, тем не менее значительная часть его годового жизненного цикла связана с образованием скоплений на суше. Эти скопления формируются как непосредственно на берегах озера и островов, так и на отдельных камнях («лудах») главным образом в северной и южной частях Ладожского оз. Кольчатая нерпа – типичный представитель арктической фауны, обитает на самой южной границе ареала вида и, следовательно, крайне чувствительна к изменениям в температурном режиме, особенно в период размножения. Для ластоногих, которые размножаются на льдах, длительность периода лактации и выкармливания потомства зависит от ледовых условий. Низкие показатели воспроизводства косвенно указывают на наличие источников негативного воздействия, как природного, так и антропогенного происхождения. Ладожская нерпа питается некрупной добычей, предпочитая стадные виды рыб, формирующие скопления высокой плотности. Размер добычи обычно составляет 5–10 см. При этом в рационе присутствуют 10–15 разнообразных видов рыб с 2–4 доминирующими видами в каждой из частей ареала. Ладожская кольчатая нерпа главным образом употребляет в пищу такие пресноводные виды рыб, как корюшка, ряпушка, налим, окунь, плотва, сиг, которые составляют 60–90% пищевого рациона тюленя [Антонюк, 1975; Агафонова и др., 2015]. Суточная норма потребления рыбы ла-

дожской нерпой составляет 2–3 кг [Филатов, 1978]. По методу В. Я. Бергера [Бергер, 2007], определено ориентировочное годовое потребление рыбы всей популяцией ладожской нерпы, которое составляет для корюшки – 33450 ц, ряпушки – 12045 ц, ерша – 3723 ц, и налима – 2354 ц. Основным пищевым конкурентом ладожской нерпы из рыб является судак. Нерпа причиняет существенный ущерб промысловому рыболовству во всех районах озера. Наиболее часто повреждаемые виды рыб в уловах – это сиг и судак.

Учет тюленей в период размножения, включая учет живого приплода, а также щенков, погибших в первые месяцы жизни, не только предоставляет данные об общей численности и репродуктивном потенциале популяции, но и определяет степень пригодности климатических условий и качества кормовой базы для воспроизводства кольчатой нерпы. В настоящее время нет постоянного учета общей численности ладожских тюленей. Содержательные работы по данной тематике были опубликованы в 70-е гг. [Антонюк 1975; Жеглов и др. 1971], согласно которым в начале XX века численность нерпы составляла около 20000 особей. В дальнейшем численность начала снижаться вследствие промысла и прилова животных в рыбацких сетях. Охота на ладожских нерп была запрещена в 1975 г., и подвид был занесен в Красную книгу России [Агафонова и др., 2015], тем не менее высокий уровень антропогенного воздействия продолжал негативно влиять на экосистему озера. Учет тюленей, проведенный в апреле 2001 г., показал, что численность рассматриваемого подвида «минимальна за всю историю его изучения» – около 3000–5000 животных [Веревкин 2002]. И только в последние десятилетия после принятия радикальных природоохранных мер численность нерпы стала увеличиваться, причем ежегодный естественный прирост популяции составляет 6% в год [Филатов, 1990]. Последний широкомасштабный учет тюленей на акватории Ладожского оз. состоялся в 2012 г. с применением легкомоторной авиации. Приблизительная оценка ладожской популяции составила 4000–6000 животных [Антонюк, 1975].

Авиационные методы исследования, традиционно применяемые при работе с морскими млекопитающими, являются дорогостоящими и потенциально опасными. Современные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) позволяют не только удешевить и обезопасить процесс съемки животных с воздуха, но и способны поднять в воздух целый комплекс съемочной аппаратуры [Уличев, 2018]. В рамках настоящего исследования сотрудниками ИНОЗ РАН были применены методы изучения с помощью дистанционных технических средств для выявления и уточнения локальных залежек нерпы. Совместно с ИПЭЭ РАН впервые проведена апробация использования средства спутниковой телеметрии с целью выявления маршрутов миграций тюленей по всей акватории Ладожского оз. Помимо подсчета численности животных, наблюдения с БПЛА позволили проводить этологические исследования, например, отслеживать перемещения нерпы в воде и под водой при относительно высокой прозрачности воды (рис. 10.6.1) [Медведев и др., 2017а]. В весенние и летние полевые сезоны с 2015 по 2018 г. сотрудниками ИНОЗ РАН были проведены экспедиции с целью учета численности ладожской нерпы с применением БПЛА [Медведев и др., 2017б; Уличев, 2018]. Район проведения исследований включал материковую часть и острова

шхерного района Ладожского оз. от о. Пеллотсаари до п-ва Хунукка, а также воды Валаамского архипелага, на котором летом на рекреационных залежках собирается до 800 тюленей. Кроме того, по видеоматериалам, снятым на камеру БПЛА, проводился анализ поведения животных на залежках и, в частности, их реакции на источники беспокойства [Медведев и др., 2017 а].



Рис. 10.6.1 – Наблюдение и учет ладожской кольчатой нерпы с помощью БПЛА

В весенний период тюлени проходят этап ежегодной линьки и наиболее продолжительное время проводят вне воды и, следовательно, более доступны для наблюдений. В местах обнаружения лежек нерпы проводился параллельный учет численности при визуальном наблюдении с борта судна и с БПЛА. Объединение двух методов позволило производить наиболее полную и корректную оценку численности нерпы [Уличев, 2018]. В перспективе возможно использование БПЛА с целью верификации данных дистанционного зондирования Земли, полученных с борта самолета или спутника (ледовая обстановка, скопление животных на акватории Ладожского озера, состояние береговых лежищ и др.).

В ноябре 2017 г. впервые проведено изучение использования самцом ладожской нерпы акватории Ладожского оз. в осенне-зимний период [Глазов, 2019]. Удалось установить, что все время прослеживания (с ноября 2017 г. по февраль 2018 г.) тюлень активно перемещался только в юго-восточной части озера, периодически заходя в устьевые участки крупных рек. Эти районы характеризуются высокой биопродуктивностью и большой концентрацией кормовых объектов. До становления льда нерпа фиксировалась в мелководных прибрежных районах, подверженных высокой антропогенной нагрузке. После начала образования ледового покрова тюлень переместился в более глубоководные районы озера, свободные ото льда.

С целью выявления потенциально пригодных для залегания кольчатой нерпы участков по всей акватории и оценки степени их используемости жи-

вотными по материалам полевых сезонов 2015–2018 гг. сотрудниками ИНОЗ РАН составлен кадастр локальных мест обитаний тюленей. Кадастр отображает постоянные и временные группировки животных с учётом изменений гидрологического режима озера (по показателю «уровень Ладожского оз.») и береговой линии, потенциально пригодных для залежек тюленей. Характеристика каждого места обитания животных представляет подробное геоморфологическое описание рельефа береговой зоны с выявлением сезонных и годовых различий, при этом особое внимание уделяется участкам линьки и отдыха тюленей, т. е. каменистым и песчаным отмелям – лудам, рифам.



Рис. 10.6.2 – Нерпа на месте весеннего термобара на траверзе юго-востока острова Лусиккайнлуото, 9 мая 2017 г.

При общей оценке состояния популяции ладожской нерпы отмечено влияние гидрологических факторов, которые могут воздействовать на численность, место обитания и жизненный цикл животных, в частности, таких, как колебание уровня воды вследствие изменения гидрологического режима в Ладожском оз. и тип ледового покрова. Во время проведения учетных работ южнее острова Лусиккайнлуото наблюдалось явление термобара (рис. 10.6.2), при этом непосредственно в зоне термобара на поверхности были зафиксированы кольчатые нерпы. Как известно, водные массы по разные стороны термобара обладают различными физическими и химическими свойствами, что также отражается на специфике распределения и численности водных организмов [Мелентьев, 2010]. Развитие планктонных организмов, а также миграции рыб следуют за движением термобара, следовательно, сезонные перемещения кольчатой нерпы могут быть частично обусловлены и таким гидрологическим явлением.

Одним из важнейших факторов, влияющим на распределение кольчатой нерпы, является уровень воды. В весеннем полевом сезоне 2017 г. при учете численности с наблюдаемой части акватории при прохождении стандартным маршрутом, от о. Пелотсаари и далее южнее в сторону о. Лусиккайнлуото (шхеры в районе пос. Ляскеля), удалось зафиксировать гораздо

меньшее количество особей (72 особи) по сравнению с 2015–2016 гг. (135 и 231 особь, соответственно). Это объясняется изменившимися гидрологическими условиями, т. е. подъемом уровня воды и затоплением мест линьки животных. Изменение уровня воды, связанное с увеличением доли притока (83–89%), количеством осадков (11–15%) в приходной части баланса в многоводные годы [Догановский и др., 2013] и спецификой весеннего таяния льдов в Ладожском оз., непосредственно определяет расположение мест весенней линьки тюленей. Так, в начале мая 2017 г. уровень воды в шхерном районе был значительно выше по сравнению с двумя предыдущими годами; многие каменистые отмели и луды в районе островов Райпатсаари и Лусик-кайнлуото, которые нерпы обычно используют для линных залежек, оказались затопленными (рис. 10.6.3).

В 2018 г. уровень воды был еще выше, и здесь было встречено максимально низкое количество животных – всего 6 экземпляров. Сыграло роль также то, что в исследуемом районе в 2018 г. вместо обычного ледового покрова был сформирован т. н. «кислый» лед, на котором животные не могли размещаться не проваливаясь. Данный участок акватории освободился ото льда раньше открытой части южнее островов, что необычно для этого района [Уличев, Дудакова, 2019].

Минимальная площадь ледового покрова в 2019–2020 гг. привела к репродуктивному кризису в популяции ладожской кольчатой нерпы. Выживаемость приплода составила всего лишь 5%. При стопроцентном покрытии озера льдом, максимально возможная численность популяции может составлять до 24–28 тысяч особей, после чего животные начнут испытывать нехватку субстрата для рождения и выкармливания потомства [Trukhanova, 2013]. Однако следует учитывать, что далеко не весь лед является пригодным для устройства ценных логовищ и залегания кольчатой нерпы, при этом доля торосистых участков варьирует от года к году в зависимости от специфики становления ледового покрова (температурного режима, силы и направления ветров и пр.). Тем не менее при уменьшении доступной площади льда животные начинают выбирать менее пригодные для размножения участки [Медведев и др., 2006].

Приблизительно четверть популяции ладожских нерп обитают в настоящее время на севере озера в шхерах, и вполне вероятно, что именно здесь процент выживаемости приплода в этот критический зимне-весенний сезон 2019–2020 гг. был наиболее высок, так как зимой и весной в шхерах и на островах в особенности не было существенного воздействия фактора беспокойства: туристов и даже рыбаков, пресса хищников (волки, лисы, одичавшие собаки), воздействия штормовых волн в заливах бухтах.

Необходимо отметить, что в последнее время на фоне увеличения численности животных отмечается ухудшение климатических и гидрологических условий (ледовые условия значительно смягчились, вероятность наступления зимы со 100%-й ледовитостью ежегодно снижается), которые негативно влияют на репродуктивный успех тюленей. Возрастает и антропогенное воздействие на среду их обитания. Ежегодно отмечается увеличение гибели животных в рыболовецких сетях. Происходит деградация мест обитания нерпы по причине загрязнения прибрежной акватории и увеличе-

ния воздействия фактора беспокойства (туризм, рыболовство). В перспективе необходимо выявить степень обособленности животных, обитающих в шхерном районе, от основной «южной» популяции, на основе сравнения биометрических и генетических параметров (анализ митохондриальной ДНК, фотоидентификация особей с последующим анализом и выявлением фенотипов). С учетом крайне ограниченных данных о филогении ладожской кольчатой нерпы и степени обособленности подвида, рекомендуется организация отбора проб тканей ладожской кольчатой нерпы (совместно с мечением, а также при работе с трупами) для проведения молекулярного анализа и сравнения с другими подвидами кольчатой нерпы и другими видами настоящих тюленей. В связи с отсутствием доступных современных численных данных о состоянии рыбных запасов (кормовой базы нерпы) Ладожского оз., крайне важно организовать проведение комплексного ихтиологического и дистанционного мониторинга состояния водоема.



Рис. 10.6.3 – Изменение уровня воды у северо-восточного берега о. Лусиккайнлуото в мае 2016–2018 г. по данным аэроснимков с БПЛА (стрелка указывает на «перемычку» между большой основной частью острова и его малым участком)

Глава 11. Водная система Валаамского архипелага

Валаамский архипелаг расположен в северной, глубоководной части Ладожского оз. Его акватория благодаря своему местоположению и отсутствию влияния вод притоков мало подвержена направленному антропогенному воздействию. Водная система архипелага включает три зоны, различающиеся по целому комплексу лимнологических параметров: прибрежная зона; два самых крупных внутренних водоема – оз. Сисяярви (Сисьярви) и оз. Лещевое (Глухое), связанных с Ладогой и между собой мелководными протоками, а также 9 малых лесных озер.

Уникальность водной системы связана с разнообразием биотопов прибрежной зоны Валаамского архипелага. С одной стороны, это открытые участки с большим перепадом глубин, мелководные закрытые и открытые бухты, глубокие заливы и протоки между островами. С другой – это внутренние озера различного происхождения, отличающиеся неповторимым сочетанием значений лимнологических параметров. Акватория архипелага вместе с внутренними озерами занимает площадь не более 50 км². Размещение разнотипных водных объектов на небольшой площади позволяет оценить изменчивость структуры сообществ гидробионтов в небольшом географическом масштабе, а также выявить важнейшие факторы, ее определяющие.

Валаамские острова относятся к особо охраняемым природным территориям регионального значения (Республика Карелия) и в значительной степени сохраняют фоновый режим функционирования. Долгие годы (до 1918 г.) Валаам был примером гармоничного сосуществования человека и природы. В дальнейшем в истории природопользования островов были различные периоды. В настоящее время, когда Валаамский монастырь практически полностью восстановлен и активно развивается, необходимо уделить внимание разработке стратегии устойчивого развития Валаамского архипелага и внедрению экологически безопасных методов природопользования для сохранения его уникальных экосистем.

В настоящей главе рассматриваются результаты исследований этой уникальной водной системы, проводимые на базе Учебно-научной станции РГГМУ на о-ве Валаам (УНС «Валаам») с 1996 г. Натурные наблюдения за гидрологическими, гидрохимическими и гидробиологическими параметрами прибрежной зоны проводились на 18 станциях (рис. 11.1) в период максимального прогрева воды. На открытом участке в заливе Крестовый, а также в малой Никоновской и Монастырской бухтах пробы отбирались ежемесячно с июня по сентябрь. Такая же регулярность наблюдений соблюдалась и для внутренних озер.

Измерение температуры производили по всей толще воды с использованием малогабаритного цифрового погружного термодатчика. В периоды с выраженной термической стратификацией в малых озерах на станциях с глубинами менее 4 м измерения проводились через каждые 0,5 м, на более глубоких станциях – через 1 м и более, в прибрежной части Ладожского озера – в зависимости от распределения температуры в толще воды.



Рис. 11.1 – Схема расположения станций отбора проб на акватории Валаамского архипелага: 1 – залив Крестовый, 2 – Большая Никоновская бухта, 3 – Малая Никоновская бухта, 4 – у о-ва Иоанна Предтеча, 5 – Естественная протока, 6 – у Никольского скита, 7 – Петровский залив, 8 – у о-ва Дубровка, 9 – у о-ва Святой, 10 – у о-ва Лембас, 11 – у о-ва Савватия, 12 – Тростяной залив, 13 – у о-ва Сухой, 14 – Дивная бухта ст. 1, 15 – Дивная бухта ст. 2, 16 – Дивная бухта ст. 3, 17 – Лещевый залив, 18 – Монастырская бухта; 19 – оз. Оссииво, 20 – оз. Черное

Анализ гидрохимических параметров во все исследуемые периоды и на всех станциях осуществлялся по стандартным или общепринятым методикам [Алекин, Семенов, Скопинцев, 1973]. Более подробно методы анализа описаны в предыдущих работах [Степанова, Шарафутдинова, Воякина, 2010; Чернышев и др., 2020].

Пробы для учета таксономического состава, численности и биомассы фитопланктона отбирали батометром Богорова ($V = 1,6$ л). Отлов производили через один метр в зависимости от глубины станции; в дальнейшем использовали интегральную пробу объемом 1,0 л. Для фиксации применяли кислый раствор Люголя в модификации Усачева с дальнейшей дофиксацией 40%-м формалином [Усачев, 1961]. Методы пробоподготовки и обработки проб фитопланктона подробно рассмотрены в [Степанова и др., 2020].

Пробы сетяного зоопланктона отбирались средней количественной сетью Джеди с ячейкой 180 мкм (три протяжки с поверхности до дна). Интегральные пробы для изучения мелкой размерной фракции зоопланктона отбирались тем же батометром, что и для фитопланктона, в середине каждого метра до глубины 5,5 м (при наличии). Фиксацию проб осуществляли 40%-м формалином до рекомендованной методиками концентрации 4% [Абакумов, 1992].

Данные о растительном покрове водной системы архипелага получены при полевых исследованиях ее различных участков. В прибрежной зоне Ладожского оз. обследованы заливы Невод, Мельничный и Пойменный, а также бухты Дивная, Малая Никоновская, Московская, Монастырская и Золотая. Работы проводились в конце июля и начале августа по общепринятой методике [Катанская, 1981]. При обследованиях Ладожского побережья использовалось водолазное оборудование, что дало возможность проследить изменение характера зарастания по глубине от уреза воды до внешних границ растительных группировок [Степанова и др., 2020].

Исследования зообентоса прибрежной зоны Ладожского оз. проводились в июле 2017–2018 гг., полевые работы были ограничены глубиной 25 м. Использовался модифицированный метод трансект Голикова – Скарлато [Голиков, Скарлато, 1988; Дудакова, 2016; Зуев, Зуева 2013]. Важно отметить, что отбор проб бентоса проводился с помощью поршневого пробоотборника авторской конструкции [Зуев, Зуева, 2013]. Зообентос малых лесных озер и крупных водоемов, постоянно связанных с Ладожским оз. (оз. Лещевое и Сисяярви), описан по данным 1996–2008 гг. Пробы отбирались в период открытой воды и максимального развития сообществ на 5–7 станциях в малых озерах и 8–12 в крупных, на каждой станции трижды. Станции размещались в точках максимальной и преобладающей глубины, и в основных ассоциациях макрофитов. Пробы грунта или высшей водной растительности отбирали по стандартным гидробиологическим методикам [Панов, Павлов, 1986]. Качественные пробы для определения таксономического состава отбирались с помощью различных орудий лова (скребок, пробоотборник Панова – Павлова [Методические..., 1989], дночерпатель Экмана – Берджа). Количественные пробы отбирались дночерпателем Экмана – Берджа (площадь облова – $1/40 \text{ м}^2$). В каждой пробе определяли численность и биомассу. Определение беспозвоночных проводили до таксонов различного ранга.

11.1 Прибрежная зона Ладожского озера

Прибрежная зона Валаамского архипелага отличается разнообразием биотопов и включает в себя открытые участки с большим перепадом глубины, мелководные закрытые и открытые бухты, глубокие заливы и протоки между островами. Глубина станций изменяется от 1 м в литоральной зоне до 40 м в глубоких заливах западного и южного побережья, а также в районе удаленных островов архипелага, например, у о-ва Святой.

С 2013 г. организованы логгерные наблюдения за динамикой температуры в поверхностных горизонтах воды на двух станциях с глубинами 10 и 20 м [Влияние изменений климата..., 2013; Степанова и др., 2020]. Самыми холодными за последние годы были 2017 и 2019 гг., самыми теплыми – 2014 и 2018 гг. Число дней со значением температуры воды выше 15°C в холодные годы не превышает 30 дней, тогда как в теплые годы этот показатель может достигать 64 дней. В отдельные годы после сильных продолжительных штормов температура воды даже в период максимального прогрева опускалась ниже 10°C . Так, в 2013 г. в июле среднесуточная температура достигла $6,5^\circ \text{C}$, а в августе 2019 г. – $8,1^\circ \text{C}$. По средним многолетним дан-

ным продолжительность теплого периода со значением температуры воды выше 10 °С составляет 100 дней, его минимальная продолжительность отмечена в 2019 г. (94 дня). Этот период наиболее благоприятен для развития водных организмов, он продолжается с первой декады июля по первую декаду октября [Степанова и др., 2020].

Значения гидрохимических параметров в период проведения съемок варьировали от года к году незначительно. Как показано ранее [Степанова и др., 2020], выявленный диапазон значений исследованных параметров сопоставим со значениями для открытых участков северной глубоководной части Ладожского оз. [Румянцев, 2002; Филатов, 2000]. Исключение составляет Монастырская бухта.

Для водоемов с невысокой цветностью воды прозрачность можно рассматривать как один из важнейших интегральных параметров при оценке состояния озерных экосистем. По данным съемок за 2000–2019 гг., средние значения прозрачности изменялись год от года незначительно (рис. 11.1.1). В период максимального прогрева воды наиболее высокими значениями прозрачности отличались 2009 г. и 2017 г. В июле 2009 г. в заливе Лещевый (южное побережье) было зафиксировано максимальное для этого периода наблюдений значение – 4,7 м. Минимальное значение отмечено в закрытой островами Малой Никоновской бухте. Анализ всей выборки значений прозрачности (230 измерений, включая данные по Монастырской бухте) показал, что 50% значений лежат в диапазоне от 2,2 до 3,0 м [Степанова и др., 2020].

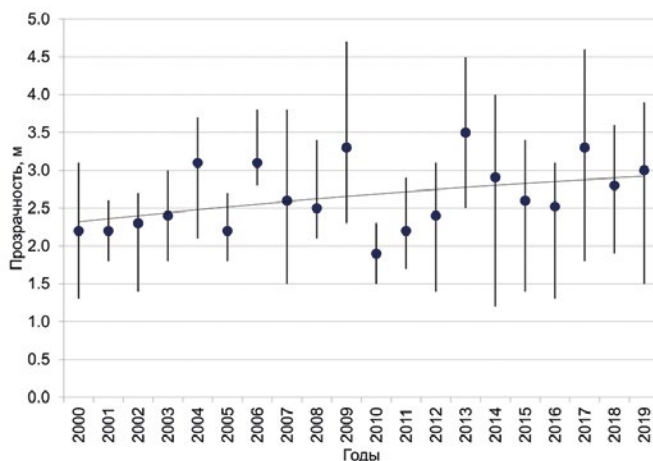


Рис. 11.1.1 – Средние и экстремальные значения прозрачности воды (м) в годы исследований за июль – август 2000–2019 гг. ($n=230$)

В прибрежной зоне Валаамского архипелага был отмечен 181 таксон водорослей и цианобактерий рангом ниже рода. По видовому богатству преобладали зеленые (29% общего числа), цианобактерии (19%) и диатомовые (18%) водоросли. В целом альгофлора различных участков акватории была очень разнородна. Только 11 общих видов (3%) можно отнести к типичным для всех участков водной системы Валаамского архипелага.

В их число входили: из золотистых – *Dinobryon divergens*; из диатомовых – виды рода *Aulacoseira*; из криптофитовых – *Chroomonas acuta* и виды рода *Cryptomonas*; из эвгленовых – *Trachelomonas volvocina*; из зеленых – *Monoraphidium griffithii* [Воякина, 2009а; Воякина, 2009б]. Сезонная динамика фитопланктона в исследованных участках обычно совпадает с таковой в глубоководном районе Ладожского оз. В весенний и раннелетний период отмечается максимальная вегетация диатомовых водорослей, затем по мере прогрева воды в планктоне начинают доминировать виды золотистых, криптофитовых, динофитовых водорослей и цианобактерий. Часто в период максимального прогрева воды отмечается пик в ходе сезонной динамики численности и биомассы фитопланктона. В осенний период опять наибольшее значение имели диатомовые водоросли. Максимальные средние значения биомассы фитопланктона были характерны для Монастырской бухты (9,9 мг/л), минимальные – для участка в заливе Крестовый (3,7 мг/л) [Степанова и др., 2020; Воякина, 2009а; Воякина, 2009б].

По показателям обилия во все годы исследования на большинстве станций доминировали различные виды цианобактерий (от 50 до 90% общей биомассы). На станциях, расположенных на открытых или более глубоких участках побережья, наряду с ними отмечалось массовое развитие криптофитовых водорослей, а в закрытых мелководных заливах преобладали зеленые (хлорококковые) водоросли. Чаще всего в состав видов-доминант входили *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfsex Bornet et Flahaut (1886), *Limnotherix planctonica* (Wolos) Meffert (1988), *Woronichinia compacta* (Lemm.) Komárek & Hindák (1988). Из криптофитовых чаще всего встречались виды рода *Cryptomonas* (*C. erosa* Ehr. (1832), *C. ovata* Ehr. (1838), *C. rostrata* Skuja (1948)), *Komma caudata* (Geitler) Hill (1991), из отдела зеленых водорослей – *Chlamydomonas* spp., *Coenococcus planctonicus* Korsh. (1953), *Botryococcus braunii* Kütz. (1849). Максимальные средние значения численности и биомассы фитопланктона были отмечены для различных станций в Дивной бухте (южное побережье), минимальные – в заливе Крестовый (западное побережье).

По показателям обилия во все годы исследования на большинстве станций доминировали различные виды цианобактерий. В разные годы они создавали от 20 до 95% общей биомассы. На станциях, расположенных на открытых или более глубоких участках побережья наряду с ними отмечалось массовое развитие криптофитовых водорослей, а в закрытых мелководных заливах преобладали зеленые (хлорококковые) водоросли. Структура фитопланктона в исследованной акватории варьировала значительно в зависимости от года. По средним многолетним значениям биомассы фитопланктона выделяются 2003 г. с минимальными значениями (среднее значение 0,97 мг/л) и 2001 г. с максимальными значениями (11,93 мг/л) [Воякина, 2009б].

Межгодовые различия в структуре планктона связаны, прежде всего, с особенностями температурной стратификации и характеристиками ветрового режима. В годы со штилевыми условиями различия между станциями были наиболее существенны. В разные годы в состав видов-доминантов входили *Dolichospermum spiroides* (Kleb.) Wacklin et al. (2009), *Aphanizomenon*

flos-aquae, *Limnothrix planctonica*, *Planktothrix agardhii* (Gom.) Anag. & Kom. (1988), и виды рода *Woronichinia*. Несмотря на то что в период максимального прогрева воды в прибрежной зоне Валаамского архипелага доминируют потенциально токсичные виды цианобактерий, информация о содержании цианотоксинов отсутствует. Это связано, прежде всего, с невысоким уровнем вегетации цианобактерий в последнее время и неблагоприятными погодными условиями.

Зоопланктон представлен 40 видами ракообразных (Cladocera – 22 вида, Copepoda – 18 видов) и 24 видами коловраток. Большую часть его составляют голарктические и палеарктические виды (65%), на долю широко распространенных видов приходится 35%. Для описываемых станций отмечено высокое сходство видового состава, значения коэффициента Жаккара варьировали от 85 до 98%. Среди ракообразных наиболее часто встречались и входили в состав доминантного комплекса *Mesocyclops leuckarti*, *Thermocyclops oithonoides*, *Daphnia cristata*, *Eudiaptomus gracilis*, а также представители рода *Bosmina* (особенно *Bosmina crassicornis*). На глубоководных участках акватории существенную часть биомассы формировали также *Cyclops lacustris*, *Limnocalanus macrurus*. В состав доминантного комплекса в различные годы в разных участках акватории входили и многие виды коловраток, такие как *Asplanchna priodonta*, *Conochilus unicornis*, *Polyarthra dolichoptera*, *Kellicottia longispina*, *Synchaeta stylata*, *Keratella quadrata*, *K. cochlearis*, *Bipalpus hudsoni*.

Для участков акватории, сохраняющих фоновый режим функционирования, характерны значительные колебания индекса Шеннона (0,9–3,1). Так же, как и для фитопланктона, наиболее высокие значения видового разнообразия отмечены на открытых участках прибрежной зоны. Для открытых участков прибрежной зоны характерно преобладание Cyclopoida и незначительная роль в сообществе Cladocera (по данным интегрального относительного обилия). В закрытых бухтах преобладали Cladocera (36%) и Rotatoria (28%), наименьшая доля приходилась на Calanoida (15%), однако по биомассе здесь всегда доминировали коловратки. В 2001–2003 гг. *Asplanchna priodonta* формировала от 50 до 85% общей биомассы зоопланктона [Stepanova, 2009]. В последние годы доля этого вида в общей биомассе зоопланктона существенно ниже.

Мелководные закрытые участки, такие как Дивная или Золотая бухты, существенно отличаются от других биотопов прибрежной зоны. Значения биомассы зоопланктона здесь могли достигать 2–3,5 мг/л, тогда как на других станциях значения редко превышали 0,5 мг/л. В целом за годы исследований для всех участков акватории выявлены широкие диапазоны значений биомассы (0,09–5,60 мг/л).

Благодаря работам [Распопов, 1961; 1968; 1985; 2011] собрано много сведений о макрофитах Ладоги. В том числе и для шхерного геоботанического района, в который входит Валаамский архипелаг. В прибрежной зоне в районе архипелага растительный покров развит слабо. Он чаще всего отсутствует в областях открытых берегов и формируется лишь в заливах и бухтах. Крайне редко, в сезоны с отсутствием штормовых условий, на удалении от берега развиваются разреженные заросли рдеста

Potamogeton perfoliatus или водного лютика *Ranunculus schmalhauseni*. Заливы юго-западного побережья острова также практически лишены водных макрофитов. Верхняя литораль этих участков сложена скалами, их обломками и валунами и, следовательно, неблагоприятна для обитания этих растений. Водные растения других частей архипелага были изучены в разные годы [Зуева, 2015; Экосистемы Валаамского архипелага..., 2016]. Это акватории заливов Невод, Мельничный и Дивной бухты, расположенные в юго-восточной части Валаама, бухты Малая Никоновская, Московская, Монастырская и Пойменного залива – в северо-западной, а также Золотой бухта, которая находится на северо-востоке архипелага. Таксономический список макрофитов изученных заливов складывается из 71 вида растений, относящихся к 6 отделам. Большую часть из них (93%) составляют представители отдела Magnoliophyta, причем на долю Magnolipsida приходится 35 видов (53%), а Liliopsida – 31 вид (47%). Кроме цветковых, в списке присутствуют виды растений из отделов: Charophyta (*Nitella flexilis*), Bryophyta (*Fontinalis antipyretica*), Equisetophyta (*Equisetum fluviatile*), Lycopodiophyta (*Isoetes lacustris* и *I. echinospora*) и Marchantiophyta (*Ricciocarpus natans*). Если в [Распопов, 2011] для всего Ладожского оз. указывается 138 видов макрофитов (без мхов и макроводорослей), то на исследованной, сравнительно небольшой акватории обнаружена половина всех водных растений водоема. Это позволяет говорить об относительном богатстве локальной флоры побережья архипелага и еще раз подтверждает тезис о шхерном геоботаническом районе, как наиболее флористически разнообразном.

При анализе распределения видов по экологическим группам выявлено, что в целом во флоре преобладают водные (в широком смысле) растения, т.е. принадлежащие к экогруппам с 1 по 3. Их насчитывается 42 вида. Истинно-водные растения (гидрофиты) также представлены довольно хорошо – 19 видов. Остальные 29 видов – это гидрофиты-мезофиты.

Наибольшее видовое богатство и разнообразие макрофитов присуще заливам Московскому (38 видов), Пойменному (35) и Малой Никоновской бухте (35). Индекс Шеннона для флор этих акваторий равен или более 5,0 бит. В остальных заливах количество видов не превышает 30. Причем в бухте Дивной их менее 20 и относительно невысоко видовое разнообразие (4,1 бит), хотя она глубоко врывается в сушу и имеет сложную форму с плесами и кутами, благоприятную для развития водных растений. Минимальные же значения двух этих характеристик выявлены в бухте Золотая (7 видов) для всех экогрупп макрофитов.

Общими для всех исследованных заливов оказались два вида водных растений, это – *Eleocharis palustris* и *Potamogeton perfoliatus*. Высока ($\geq 75\%$) встречаемость у *Elodea canadensis*, *Phalaroides arundinacea*, *Equisetum fluviatile*, *Carex acuta*, *Myosotis palustris*, *Persicaria amphibia*, *Potamogeton gramineus*, *Ranunculus repens*, *R. reptans*. Подробные работы, проведенные в бухте Малая Никоновская в 2015–2018 гг. с использованием водолазного оборудования, позволили выяснить нижнюю границу зоны обитания макрофитов в этом заливе [Экосистемы Валаамского архипелага..., 2016]. Так, представители вида *Elodea canadensis* во все годы исследований встречались до глубины 10 м.

В донных сообществах подводных склонов (до глубины 25 м) побережья Валаамского архипелага были отмечены следующие таксономические группы зообентоса: олигохеты, двустворчатые и брюхоногие моллюски, пиявки, ракообразные, гидры, планарии, водные клещи и насекомые. Насекомые представлены наиболее разнообразно. Зафиксированы подуры, клопы, жуки (имаго и личинки) и в наибольшей степени личинки насекомых с полуводным циклом развития: подёнки, веснянки, мошки, стрекозы, хирономиды, мокрецы и ручейники. Наибольшее количество таксонов было отмечено среди личинок комаров-хирономид, олигохет, личинок ручейников и брюхоногих моллюсков.

Наибольшим таксономическим разнообразием отличалась верхняя 5-метровая часть подводного склона на закрытых от прибоя участках побережья, наименьшим – участки на глубине свыше 20 м. Ядро бентоценозов прибрежных мелководий составляли ракообразные: реликтовые *Pallaseopsis quadrispinosa* и *Mysis relicta*, изоподы *Asellus aquaticus* и натурализовавшийся байкальский вселенец *Gmelinoides fasciatus* [Berezina et al., 2009; Курашов и др., 2012]. Наиболее распространенными видами олигохет были: *Lamprodrilus isoporus*, *Stylaria lacustris*, *Spirosperma ferox*, многочисленные мелкие наидиды родов *Nais*, *Stylaria*, *Vejdovskyella* и неполовозрелая молодь семейства Tubificidae. Среди брюхоногих моллюсков существенный вклад в биомассу вносили представители семейства Valvatidae; из двустворчатых – некрупные, но многочисленные представители семейства Sphaeriidae. Повсеместно были распространены личинки ручейников *Agraylea multipunctata*, *Polycentropus flavomaculatus*, *Lepidostoma hirtum* и крупные таксоны семейства Limnephilidae. Высокой численностью отличались также *Synorthocladius*, *Paratendipes* и *Polypedilum*. Более чем на 60% станций были отмечены водные клещи (отряда Acariformes). Остальные группы были встречены в значительно меньшем количестве.

Во всем диапазоне прибрежных мелководий распределение таксонов не было достоверно связано с распределением грунтов. Единственное исключение составляли участки с аккумуляцией илистых частиц в центральной яме Малой Никоновской бухты, где доминировали пелофильные олигохеты. На подводных склонах отмечены границы распространения некоторых групп видов. Для наиболее массовых видов можно отметить, что бокоплав *G. fasciatus*, личинки поденок, веснянок, ручейников не образовывали скоплений на глубине более 9 м. Реликтовые ракообразные: *P. quadrispinosa*, напротив, обнаруживался на глубине более 3 м, а мизиды – на глубине более 15 м. Состав фауны беспозвоночных до глубины 15–20 м определяется открытостью побережья, то есть интенсивностью ветро-волнового воздействия. На закрытых и полукрытых участках литорали богатейшее сообщество отмечено на глубине от 1 до 5 м. У открытого побережья разнообразие и обилие зообентоса существенно меньше.

Наибольшая плотность поселения отмечена на песчаных и каменистых станциях в центре полукрытого залива, наименьшая – на глубинах свыше 20 м, на валунах и жидких илах (рис. 11.1.2). В целом значения параметра варьировали от 20 до 36407 экз./м². На большинстве станций доминировали по плотности поселения личинки комаров-хирономид. В мелководной

бухте залива Крестового также был высок вклад в численность ракообразных, в Малой Никоновской бухте – олигохет. Наибольший индивидуальный вклад в численность сообществ вносил бокоплав *G. fasciatus*. Максимум биомассы бентоса отмечен на станциях в центре полузакрытой бухты Крестового залива и на мелководьях закрытой бухты Малой Никоновской, а минимум – на глубинах свыше 18 м (рис. 11.1.3). Общий диапазон варьирования – от 0,12 до 34,55 г/м². Наибольший вклад в биомассу вносили также ракообразные и в меньшей степени моллюски и крупные личинки ручейников. В основном это было вызвано обилием чужеродных амфипод *G. fasciatus* и аборигенных бокоплавов *P. quadrispinosa*.

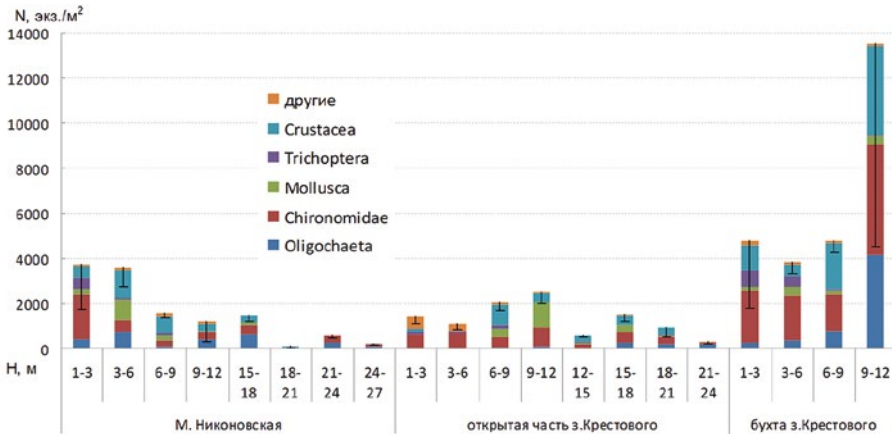


Рис. 11.1.2 – Средняя численность (N , экз./м²) зообентоса на горизонтах на различных акваториях побережья о. Валаам

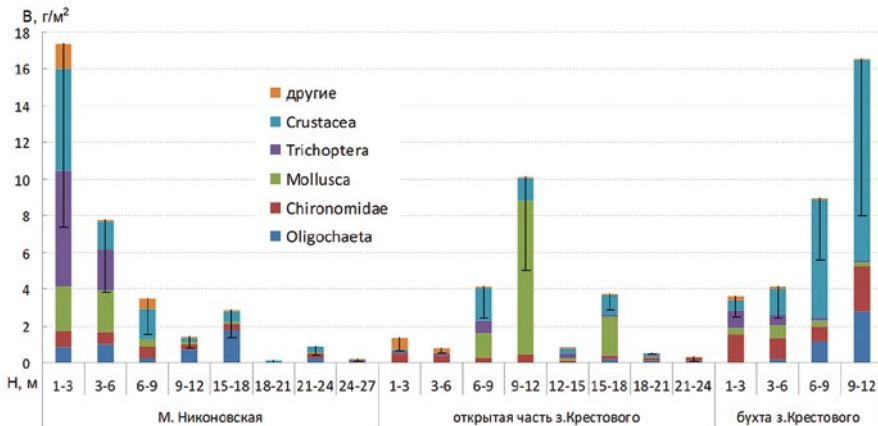


Рис. 11.1.3 – Средняя биомасса (B , г/м²) зообентоса на горизонтах на различных акваториях побережья о. Валаам

Только две бухты прибрежной акватории подвержены интенсивному антропогенному воздействию – Монастырская и Малая Никоновская.

Монастырская бухта имеет сложную форму, с максимальными глубинами (до 19 м) на входе в бухту. Ее кутовая часть отделена от открытого побережья отмелями и островками, между которыми тянется узкий желоб с глубинами до 10 м. Ковш находится в южной, сравнительно мелководной, части губы, здесь преобладают глубины от 7 до 10 м. В бухте более двух столетий располагаются грузовые причалы, дно захламлено бревнами. Начиная с 2001 по 2006 г. в бухту поступали неочищенные коммунально-бытовые стоки п. Валаам в связи с реконструкцией очистных сооружений. После реконструкции и установки дополнительной накопительной емкости (2016 г.) аварийные сбросы случаются редко.

Для анализа степени антропогенного воздействия сопоставлены данные по открытому участку бухты с интенсивной динамикой вод и куту, где располагаются причал и сброс коммунально-бытовых вод. В открытой части бухты значения всех исследованных параметров не выходили за пределы значений, выявленных за годы исследований. В биотических сообществах не отмечено никаких изменений в структурных показателях. Тогда как в куту бухты целый ряд параметров подвергся существенной перестройке в период реконструкции очистных сооружений и поступления неочищенных коммунально-бытовых вод в 2002–2006 гг. (табл. 11.1.1).

Таблица 11.1.1

Средние и экстремальные значения ряда лимнологических показателей в разные периоды исследования Монастырской бухты (кут)

Показатели	1996–2001 гг.	2002–2006 гг.	2007–2019 гг.
Прозрачность воды, м	2,4 (1,3–3,4)	1,3 (0,7–2,2)	1,7 (0,8–2,3)
O ₂ дно, %, мг/л	75 (50–100)	68 (31–94)	71 (36–94)
NH ₄ дно, мг/л	0,8 (0,3–1,6)	4,9 (0,9–7,5)	0,62 (0,22–1,98)
CO ₂ пов, мг/л	5,0 (1,8–9,8)	11,5 (2,1–39,6)	3,3 (0,2–4,05)
CO ₂ дно, мг/л	8,5 (2,6–20,0)	34,9 (11,4–124,1)	11,1 (1,4–33,4)
Нфито, млн. кл/л	4,0 (0,2–16,1)	14,5 (4,0–30,9)	Нет данных
Вфито, мг/л	4,56 (0,30–22,1)	9,88 (2,79–15,99)	Нет данных
Нзоо, экз/л	45,5 (1,9–134,5)	80,0 (2,1–289,1)	Нет данных
Взоо, мг/л	0,28 (0,01–1,68)	0,86 (0,21–1,60)	Нет данных
Трофический инд. Карлсона, TSI (SD)	47,4	56,2	52,3

Как видно из табл. 11.1.1, произошло изменение газового режима в придонных горизонтах. Были отмечены высокие концентрации углекислого газа, особенно в августе и сентябре 2006 г. В среднем значения содержания растворенного кислорода в придонных слоях практически не изменились, однако произошло расширение диапазона значений. В августе и сентябре 2003–2005 гг. здесь были отмечены минимальные концентрации для всего периода исследования. Заметно уменьшились значения прозрачности, достигнув абсолютного минимума 0,7 м в 2003 г. (рис. 11.1.4).

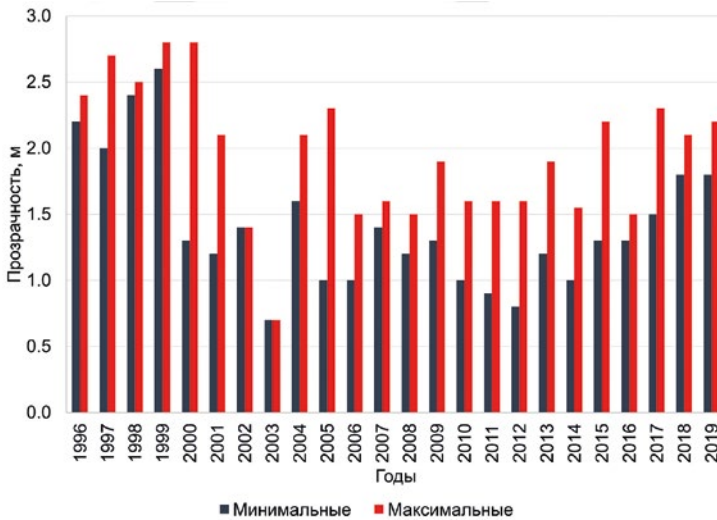


Рис. 11.1.4 – Экстремальные значения прозрачности воды в Монастырской бухте

Также в период восстановления с 2007 г. минимальные за вегетационный сезон значения прозрачности оставались низкими в связи с аварийными сбросами. С 2016 г. после введения в эксплуатацию дополнительной накопительной емкости очистные сооружения начали работать в безаварийном режиме, и значения прозрачности начали увеличиваться [Степанова и др., 2016]. Максимальное содержание CO_2 в придонных горизонтах оставалось высоким до 2017 г., в последние годы оно не превышает 22,0 мг/л при среднем значении 7,2 мг/л.

В планктонных сообществах произошло значительное увеличение численности и биомассы, обусловленное развитием мелких форм. В фитопланктоне в последние годы стали доминировать виды рода *Oscillatoria*, в зоопланктоне – мелкие коловратки родов *Polyarthra* и *Brachionus*. В зоопланктонном сообществе значительную роль стали играть виды, встречавшиеся в прошлые годы исследований единично, например *Daphnia longispina*. Преобладание в планктоне перечисленных выше видов и родов свидетельствует об ускорении процесса эвтрофирования бухты. Произошли изменения в сезонной динамике фито- и зоопланктона, в течение всего периода открытой воды были отмечены высокие значения численности и биомассы, тогда как в прошлые годы наблюдались только два периода с высоким количественным развитием [Степанова, 1998; Воякина, 2003].

В период интенсивного воздействия для сообществ зообентоса было характерно значительное обеднение видового состава на акватории всей бухты. Было обнаружено всего 9 видов личинок насекомых и моллюсков, а также олигохеты (до вида не определялись). Показано отсутствие выраженной сезонной динамики количественного развития бентоса на конкретных станциях [Степанова и др., 2016]. При этом показатели обилия существенно варьировали по акватории бухты: численность от 200 до 2000 экз./м², биомасса от 0,5 до 40 г/м². Максимальные значения биомассы бентоса были

зафиксированы в районе стока и на станции напротив него. Здесь в основном доминировали олигохеты. Высокие количественные показатели этой группы свидетельствуют о сильном органическом загрязнении и неблагоприятной экологической ситуации в целом. На ряде станций зообентос имел невысокие показатели обилия и характеризовался обедненным видовым составом с доминированием личинок мух – *Ceratopogonidae* и *Diptera indet.* Сообщества открытого участка у выхода из бухты можно охарактеризовать как типичное для незагрязненных песчано-каменистых открытых участков побережья Валаамского архипелага. Зообентос здесь имеет низкое количественное развитие [Степанова и др., 2016].

По значению коэффициента Карлсона (TSI) Монастырская бухта в «фоновый период» относилась к слабomezотрофному типу водоемов, а по содержанию аммонийного азота в придонных горизонтах и биомассе фитопланктона – к мезотрофному. По показателям зоопланктона она соответствовала олиготрофному типу. В период воздействия ситуация существенно изменилась по большинству показателей, включая биомассу фитопланктона. По этому показателю бухта перешла к эвтрофному типу водоемов, по TSI и биомассе зоопланктона характеризовалась переходным состоянием между мезо- и эвтрофией. В последние годы отмечается позитивная тенденция, значения исследованных параметров начинают приближаться к «фоновым», разница между экстремальными значениями прозрачности существенно сократилась (рис. 11.1.4). Для Монастырской бухты также показано накопление ряда тяжелых металлов в донных отложениях в кутовой части бухты, связанное в том числе с эксплуатацией грузовых и пассажирских причалов [Панова, Болотова, 2000].

Малая Никоновская бухта также имеет сложную форму, ее кутовая часть имеет форму чаши, она отделена от озера островами. Средняя и максимальная глубины бухты составляют 16,8 и 25,5 м соответственно, а площадь ее акватории составляет 0,85 км². Сложение литорали разнообразно: побережье представляет собой как выходы скал и россыпи валунов, так и песчаные отмели с выходами глин [Экосистемы Валаамского архипелага..., 2016]. В бухте с 2001 г. функционирует рыбозаводное (преимущественно форелевое) хозяйство. Это одно из крупнейших садковых хозяйств Карелии, с 2015 г. по 2019 г. здесь производилось от 50 до 70 т рыбной продукции в год. За период функционирования форелевого хозяйства значения лимнологических параметров варьировали в широком диапазоне. В период максимального прогрева воды (июль – август) на глубоких точках не всегда формировалась четко выраженная температурная стратификация. Для акватории бухты были характерны высокие значения прозрачности (2,4–4,9 м).

На поверхности высоко содержание растворенного кислорода (80–126% насыщения), в то же время в летний период (июль – август) в придонных горизонтах его содержание понижено (12–65%). Периодически отмечались высокие значения концентраций биогенных элементов в поверхностном и придонном горизонтах. В июле 2015 г. концентрация аммонийного азота (0,65 мг/л) и фосфатов (0,031 мг/л) на поверхности воды была максимальной (табл. 11.1.2).

Таблица 11.1.2

Средние значения ряда гидрохимических параметров по данным за 2015–2018 гг.

Определяемые показатели	Малая Никоновская бухта	
	поверхность	дно
Аммонийный азот	0,401	0,425
Нитриты	0,015	0,015
Фосфаты	0,006	0,060
Вал Р	0,020	0,083
Мутность	2,7	3,1
Цветность	33,5	33,7

В составе фитопланктона Малой Никоновской бухты было обнаружено 92 таксона рангом ниже рода из 8 отделов. По числу видов преобладали диатомовые и цианобактерии. Показатели обилия фитопланктона также значительно варьировали за исследованный период, биомасса фитопланктона изменялась от 0,8 до 13,0 мг/л (среднее значение было 4,1 мг/л). Чаще всего в состав видов доминант входили *Aphanizomenon flos-aquae*, *Planktolyngbya limnetica*, *Woronichinia sp.* и виды рода *Aulacoseira* и *Cryptomonas* [Воякина, 2003].

В составе зоопланктона бухты идентифицировано 32 вида ракообразных (Cladocera – 15, Copepoda – 17) и 18 видов коловраток. В летний период в состав доминантного комплекса входили *Polyarthra dolichoptera*, *Synchaeta stylata*, *Conochilus unicornis*, *Asplanchna priodonta*, *Cyclops lacustris*, *Eudiaptomus gracilis*, *Thermocyclops oithonoides* и *Daphnia cristata*. В период выраженной термической стратификации доля коловраток в общей численности достигала 90%. Значения общей биомассы зоопланктона варьировали от 0,12 до 0,50 мг/л, индекса Шеннона – от 1,5 до 2,5 бит [Степанова, 1998].

Дно центральной части бухты практически безжизненно. На нескольких станциях отмечены единичные экземпляры олигохет Tubificidae. На скалистых стенках и каменистых свалах бухты до глубин 16 м – напротив, присутствует характерная для северной части Ладоги фауна реликтовых ракообразных, амфибиотических насекомых, моллюсков и олигохет (*Pallaseopsis quadrispinosa*, *Monoporeia affinis*, *Valvata sp.*, *Tanytarsus gr. gregarius*). Всего отмечено 85 таксонов.

Большая площадь бухты, сложная береговая линия, различные субстраты на литорали создают условия для формирования высокого видового богатства и разнообразия водных макрофитов. Число видов растений здесь насчитывает 36, причем 10 из них – истинно водные. Индекс Шеннона очень высок (5,0 бит/экз.).

В 2006 и 2015 гг. проводились подробные обследования бухты, которые показали, что всё дно профундали занято разными типами ила [Зуев, Зуева, 2013; Степанова и др., 2016; Зуева и др., 2018]. Описано бактериальное покрытие (мат), сформировавшееся в районе форелевого хозяйства. По данным 2006 г., мат занимал площадь непосредственно под садками на глубине

более 24 м. К 2015 г. площадь мата значительно увеличилась, граница его распространения примерно совпадала с изобатой 15 м, что составило треть площади кутовой части бухты.

Таким образом, в Малой Никоновской бухте не было выявлено существенных изменений растительного покрова, структуры фито-, зоопланктона и лимнологических характеристик. По всей видимости, это связано с водообменом поверхностного слоя вод бухты с остальной частью Ладоги. Поэтому все наблюдаемые параметры практически не выходят из значений нормы для открытой части озера. Однако несмотря на относительно благополучную экологическую ситуацию в поверхностных горизонтах, на дне происходит накопление органических веществ из-за затрудненного водообмена. Это отражается в характеристиках зообентоса и донных осадков (включая бактериальный мат) бухты.

Кроме того, для прибрежной зоны Валаамского архипелага можно сформулировать следующие основные выводы.

Динамический фактор и температура воды в значительной степени определяют распространение исследованных сообществ. Относительно высокие показатели обилия фито- и зоопланктона были характерны для закрытых от ветрового и волнового перемешивания участков прибрежной зоны. Здесь отмечалась активная вегетация макрофитов, формировались высокопродуктивные сообщества зообентоса. Биомасса фито- и зоопланктона открытых участков прибрежной зоны Валаамского архипелага сравнима с их биомассой в северном глубоководном районе [Филатов, 2000; Румянцев, 2002], а биомасса в закрытых зонах меньше значений по данным, опубликованным для прибрежной зоны Ладожского озера [Литоральная зона ..., 2011].

Межгодовые различия в количественном развитии планктона вызваны гидрологическими условиями конкретных лет. Анализ влияния температуры воды на структуру сообщества планктона прибрежной зоны Валаамского архипелага показал, что существенное увеличение температуры воды (которое можно связать с общим потеплением климата) не приводило к увеличению количественного развития организмов планктона. Влияние прогрева сказывалось на уменьшении различий между участками прибрежной зоны: существенно уменьшались значения вертикальных и горизонтальных градиентов температуры, содержания кислорода и других гидрохимических параметров. Вследствие этого структура планктонных комплексов становилась менее разнообразной, высокого количественного развития достигали эврибионтные виды, значения показателей видового разнообразия существенно уменьшались [Влияние изменений климата..., 2013].

Выполнено исследование обитания макрофитов и зообентоса на твердых грунтах и на сложном рельефе прибрежного склона. Трансформация литоральной фауны в профундальную отмечалась до глубины 16 м. Во всем этом диапазоне отмечались скопления гидробионтов. Литоральная фауна (включающая большинство групп личинок насекомых, часть ракообразных и моллюсков) распространена в различных условиях до глубины 10–12 м, что вместе с данными о распространении макрофитов позволяет расширить границу литоральной зоны до 10 м вместо принятого ранее значения 8,5 м.

Значительная часть прибрежной зоны Валаамского архипелага сохраняет фоновый режим функционирования. По показателям обилия фито- и зоопланктона, зообентоса, прозрачности воды и содержанию хлорофилла-а в пределах прибрежной зоны Валаамского архипелага преобладают участки с олиго- и мезотрофным статусом. Исключение составляет Монастырская бухта, находящаяся в эвтрофном состоянии. Это связано с большим разнообразием биотопов, характерным для исследуемой акватории, а также локальной антропогенной нагрузкой.

11.2 Внутренние озера, связанные с Ладогой

Оз. Сисяярви имеет сложную удлинённо-вытянутую форму с лопастным расчленением и состоит из восьми заливов, к самым глубоководным участкам относятся Московский и Скитский заливы, а также центральная часть озера. Центральная часть озера (салма) – открытая, небольшая по площади, ориентирована с запада на восток, с глубиной – до 11 м. Это самое большое по площади озеро архипелага – 80,5 га, его водосборная площадь максимальна для внутренних озёр – 557,3 га. Для водоема характерны резкие перепады глубин, максимальная глубина – 19 м, средняя – 7,5 м [Экосистемы Валаамского архипелага..., 2016]. Оз. Сисяярви – олигогумусный, нейтрально-олигощелочной водоем, для участков с глубинами более 8 м в летний период характерна термическая стратификация и кислородная дихотомия.

Непосредственными источниками антропогенного воздействия на оз. Сисяярви являются: монастырская ферма (30–60 голов крупного рогатого скота, до 100 голов куриц), коммунально-бытовые стоки, садки рыбо-разводной фермы (мальки сиговых – форель и лосось), строительные и дорожные работы на водосборе, загрязнение и механическое перемешивание маломерными судами. Оз. Сисяярви испытывало влияние стоков с фермы начиная с первой трети 19 века, с 40-х по конец 80-х годов 20-го века ферма находилась в запустении. После возрождения Валаамского монастыря началось активное восстановление фермы. В 2001 г. произошло увеличение интенсивности стоков с фермы в связи с увеличением поголовья крупного рогатого скота. В 2005 г. в салме озера были установлены садки рыбо-разводной фермы, но условия озера, такие как пониженное содержание кислорода в толще воды, высокая мутность, накопление углекислого газа, оказались неблагоприятны для жизни мальков, поэтому в 2010 г. они были сняты. В 2014 г. на животноводческой ферме были установлены очистные сооружения, которые позволили очищать большую часть коммунально-бытовых стоков и стоков от фермы.

При анализе источников, видов и временных интервалов антропогенного воздействия на оз. Сисяярви, а также межгодовой динамики основных гидрохимических параметров и прозрачности воды были выделены три основных периода антропогенного воздействия, которые условно определены как период естественного состояния озера до 2000 г., период значительной антропогенной нагрузки с 2001 по 2010 г. и период восстановления водоема после 2011 г. (табл. 11.2.1).

Таблица 11.2.1

Средние и экстремальные значения ряда гидрохимических показателей в различные периоды антропогенной нагрузки на оз. Сисяярви

Параметр	1996–2000	2001–2010	2011–2019
pH, пов	7,0	7,2 (6,9–9,0)	7,2 (7,0–8,3)
O ₂ < 20% (дно)	15,0%	54,8%	55,5%
Кислородная дихотомия, % случаев	48,3%	66,3%	62,5%
O ₂ (дно) %	43,0 (14,2–90,5)	20,8 (0,0–78,7)	26,2 (0,0–93,6)
CO ₂ (поверхность), мг/л	–	7,9 (0,9–16,7)	2,6 (0,2–9,5)
CO ₂ (дно) мг/л	–	48,6 (4,4–149,6)	16,2 (0,5–63,4)
NH ₄ дно, мг/л	Нет данных	Нет данных	0,56 (0,34–2,08)
SD, м	2,5 (1,6–4,6)	2,0 (1,1–2,7)	1,9 (1,2–2,7)
Трофический индекс Карлсона, TSI (SD)	45	50	51

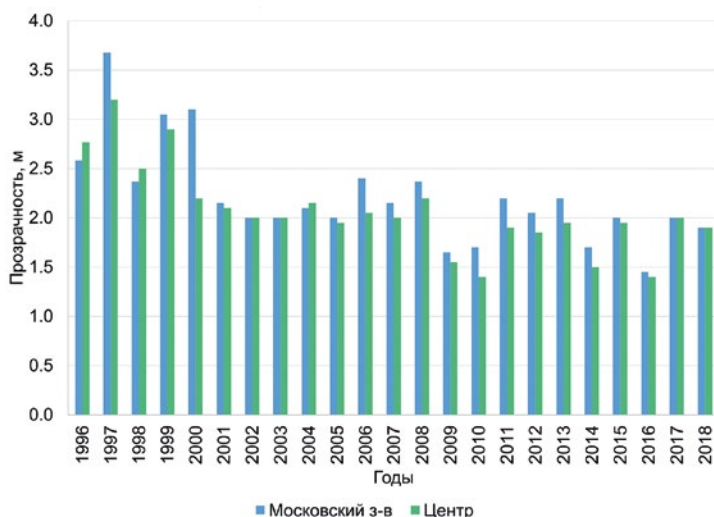


Рис. 11.2.1 – Средние значения прозрачности воды в двух участках озера Сисяярви в летний период

Анализ значений гидрохимических параметров по трем станциям за разные периоды воздействия показал, что в озере происходят значительные изменения, которые могут быть связаны в первую очередь с интенсивностью воздействия антропогенных факторов. В частности, pH имел наибольший разброс значений в период наиболее сильной антропогенной нагрузки, особенно в придонных горизонтах. В тот же период наблюдалось пресыщение кислородом поверхностных слоев и возникновение заморов в придонных слоях. Кроме того, накопление углекислого газа на дне озера в годы сильной антропогенной нагрузки свидетельствует о разложении большого количества органического вещества, что также связано с процессом эвтрофирования.

В последующий период содержание углекислого газа на дне существенно снизилось. Прозрачность воды имела наибольшие значения, а также значительные амплитуды только в период условно естественного состояния озера, в последующие периоды они существенно снизились (рис. 11.2.1).

Индекс Карлсона показал, что в период условно естественного состояния водоем находился на стадии мезотрофии, но в последующие годы усилились процессы эвтрофирования озера. В составе фитопланктона было обнаружено 182 вида водорослей, относящихся к 9 отделам: Cyanoprokaryota – 31, Dinophyta – 9, Euglenophyta – 21, Raphidophyta – 1, Cryptophyta – 9, Chrysophyta – 17, Xanthophyta – 1, Bacillariophyta – 37, Chlorophyta – 57. По видовому богатству преобладали зеленые (31%), диатомовые (20%) водоросли и цианопрокариоты (17%). Зоопланктон оз. Сисяярви представлен 40 видами ракообразных (Cladocera – 19, Copepoda – 21) и 22 видами Rotatoria. В сезонной динамике планктона отмечено два пика количественного развития: раннелетний и позднелетний. Минимальные значения численности и биомассы фито- и зоопланктона были отмечены в начале июля. По биомассе фитопланктона первый пик вызван доминированием диатомовых и золотистых; второй – обусловлен вегетацией цианопрокариот и рафидофитовых водорослей. В начале лета в озере массовыми были: *Aulacoseira italica*, *A. islandica*, *Tabellaria fenestrata*, *Cyclotella spp.*, *Dinobryon bavaricum* и *D. divergens*. В течение большей части сезона активно вегетировали синезеленые водоросли (*Aphanizomenon flos-aquae*, *Oscillatoria ornata*, *Gomphosphaeria lacustris*). В зоопланктоне по численности и биомассе доминировали представители *Cyclopoida*, *Calanoida* и *Rotatoria*. Высокого количественного развития достигали следующие виды: *Eudiaptomus graciloides*, *Thermocyclops oithonoides*, *Mesocyclops leuckarti*, *Daphnia cristata*, *Chydorus sphaericus*, *Asplanchna priodonta*, *Synchaeta stylata*, *Kellicottia longispina*, *Keratella quadrata*. Выявлены существенные градиенты показателей видовой и размерной структур планктонных сообществ. Биомасса фитопланктона колебалась от 0,4 до 8,9 мг/л, зоопланктона – от 0,01 до 6,10 мг/л. Индекс Шеннона, как для фито-, так и для зоопланктона, изменялся от 1,0 до 3,7 бит/мг. Временная составляющая (межгодовые и «сезонные» изменения) вносили максимальный вклад в изменчивость планктонных комплексов оз. Сисяярви [Воякина, 2006; Степанова, 2002].

Лещевое оз. представляет собой водоем со сложнорассеченной формой котловины, в которой можно выделить довольно обособленные западную и восточную части. Его общая площадь составляет 23,8 га, а водосбор охватывает территорию в 245,4 га [Чернышев и др., 2020]. Глубина водоема в среднем не превышает 3,2 м, в свою очередь максимальная глубина может достигать 7,5 м. Лещевое оз. имеет связь с Ладожским оз. через протоку. В связи с этим в различные периоды наблюдений высокий уровень воды в Ладоге способствовал подъему воды в оз. Лещевое [Степанова, Шарафутдинова, Воякина, 2010; Чернышев и др., 2020]. Следует упомянуть, что за весь период натурных наблюдений водоем сохранял режим, близкий к фоновому, и не подвергался значительному антропогенному воздействию. Однако с 2015 г. в северо-восточной части водосбора регулярно проводятся мелиорации лугов, расположенных близко к урезу воды [Экосистемы Валаамского архипелага..., 2016].

Лещевое оз. относится к олигоациднотнейтральным мезогумусным мезополижелезистым водным объектам [Степанова, Шарафутдинова, Воякина, 2010]. В летний период водоем прогревается довольно равномерно по всей толще, выраженная температурная стратификация наблюдается только в восточной части с глубинами более 5 м. Там же могут наблюдаться периоды кислородной дихотомии и заморные явления в придонных горизонтах [Чернышев и др., 2020]. Гидрохимический режим озера в целом отличается заметной стабильностью [Степанова, 2019], однако при усилении антропогенного воздействия диапазоны и средние значения ряда гидрохимических параметров несколько изменились (табл. 11.2.2).

Как видно из табл. 11.2.2, диапазоны характеристик, связанных с процессами поступления и разложением органического вещества, после проведения мелиорации несколько изменились. Так, максимальное значение прозрачности в период более поздних наблюдений уменьшился по сравнению с фоновым периодом в 1,4 раза, несколько снизилось среднее значение. Для показателя цветности было обнаружено увеличение минимальных значений в 2015–2019 гг. на всех горизонтах отбора. Диапазоны концентрации растворенного кислорода и содержания общего органического вещества существенно не изменились. Это может быть связано с поступлением с мелиорируемых полей плохорастворимых соединений. Помимо этого, в озере могут присутствовать автохтонные и лабильные формы органического вещества, которые не определяются методом перманганатной окисляемости. Обнаружено снижение максимального значения pH в поверхностном горизонте в 1,2 раза, что может говорить о более активном поступлении с мелиорируемых полей органических и неорганических кислот.

Таблица 11.2.2

Диапазоны и средние экстремальные значения лимнологических параметров оз. Лещевое до и после начала мелиоративных работ

Период	Горизонт	SD, м	O ₂ , мг/л	CO ₂ , мг/л	pH	ООВ _{Мп} , мгО/л	Цветность, °Pt-Co
1998–2014	Пов-ть	0,6–1,7 (1,1)	6,0–11,7 (8,4)	0,4–29,0 (7,8)	6–8,5 (7,2)	13,5–47,7 (21,5)	40–130 (79)
	Дно		0,0–9,5 (2,6)	0,3–132,0 (39,4)	6–7,6 (6,6)	13,9–49,2 (22,5)	42–740 (240)
2015–2019	Пов-ть	0,6–1,2 (0,9)	5,2–9,8 (7,9)	1,2–22,0 (5,5)	6,2–7,4 (6,8)	8,2–45,9 (18,5)	45–117 (82)
	Дно		0,0–9,5 (2,9)	2,3–69,5 (29,7)	5,7–7,2 (6,4)	7,4–52,2 (20,5)	48–352 (179)

В альгофлоре оз. Лещевое за исследуемый период было идентифицировано 82 таксона рангом ниже рода из 8 отделов: Cyanoprokaryota – 9, Dinophyta – 3, Euglenophyta – 14, Raphidophyta – 1, Cryptophyta – 4, Chrysophyta – 6, Xanthophyta – 1, Bacillariophyta – 19, Chlorophyta – 25. По числу видов преобладают зеленые (30%), диатомовые (23%) и эвгленовые (18%) водоросли. Показатели обилия фитопланктона в озере варьи-

вали значительно: общая численность изменялась от 0,8 до 143,5 млн кл./л (среднее значение было 13,4 млн кл./л); биомасса – от 3,1 до 35,9 мг/л (среднее значение – 12,3). По численности в озере доминировали цианопрокариоты, рафидофитовые и зеленые водоросли. Основной вклад в общую биомассу фитопланктона вносили рафидофитовые водоросли, в среднем на их долю приходилось 65%. Второй группой, доминирующей по биомассе, были диатомовые водоросли (в среднем 10% от общей биомассы). В состав доминирующих видов входили *Aphanizomenon flos-aquae*, *Aphanothece clathrata*, *Microcystis aeruginosa*, *Gonyostomum semen*, *Botriococcus braunii*.

В настоящее время значительной перестройки фитопланктона в оз. Лещевое из-за проведения мелиоративных работ на водосборной площади не выявлено. Возможно, это связано в первую очередь с экологией основного доминирующего вида *G. semen*, так как этот вид приспособлен к обитанию в гумифицированных озерах с высоким содержанием органического вещества, с низкими значениями pH и невысокой прозрачностью воды.

В сетянном зоопланктоне оз. Лещевое в пелагиали встречается 17 видов, тогда как в литорали их количество может увеличиваться до 26, преимущественно за счет представителей Cladocera. Наиболее массовыми являются *Thermocyclops oithonoides*, *Eudiaptomus graciloides*, *Daphnia cristata* Sars.. Для последних лет зафиксирована выраженная пространственная изменчивость численности и биомассы сетяного зоопланктона. Как было показано ранее, наибольшая численность и биомасса были зафиксированы в пелагиали западной и восточной частей. Наименьшие значения обнаружены в литорали восточной части, наиболее близкой к мелиорируемым лугам [Чернышев, 2020a]. Анализ структурных характеристик сетяного зоопланктона позволил выделить показатели, для которых наблюдалась некоторая степень временной вариабельности (табл. 11.2.3).

Таблица 11.2.3

Экстремальные и средние значения некоторых структурных характеристик зоопланктона оз. Лещевое в различные периоды наблюдений

Показатель	Период наблюдений			
	1997–1999	2008–2014	2016	2017–2020
Численность, экз./дм ³	1,87–13,01 (7,45)	10,11–21,85 (15,70)	12,60–42,44 (24,75)	4,16–32,34 (15,33)
Биомасса, мг/дм ³	0,02–0,46 (0,19)	0,36–1,23 (0,71)	0,66–1,21 (0,94)	0,07–1,12 (0,39)
$N_{\text{Clad}}/N_{\text{Cope}}$	0,31–1,14 (0,57)	0,22–3,76 (0,83)	0,09–0,33 (0,21)	0,09–0,82 (0,40)

В 1997–1999 гг. зоопланктон отличался относительно невысокими средними значениями как численности, так и биомассы. В дальнейшем в 2008–2014 гг. эти показатели увеличились в 2 и 3,7 раза соответственно. Все это может говорить о протекании процессов эвтрофирования в водоеме. Максимальных значений численность и биомасса достигают в 2016 г., на следующий год после проведения мелиораций. Такой резкий рост связан с активным развитием мелких циклопов в этом году. Довольно существенно изменилось соотношение численности *Cladocera* и *Copepoda* ($N_{\text{Clad}}/N_{\text{Cope}}$).

Так, до проведения мелиораций наблюдались значения $N_{\text{Clad}}/N_{\text{Cop}}$, превышающие единицу, что говорит о периодах преобладания в озере *Cladocera*. После 2016 г. максимумы $N_{\text{Clad}}/N_{\text{Cop}}$ не превышали 0,82, то есть в водоеме постоянно доминировали *Copepoda*. Помимо изменения структурных показателей, было зафиксировано изменение в соотношении основных таксономических групп (рис. 11.2.2). В фоновый период 1997–1999 гг. доли крупных таксономических групп были сходными и находились в диапазоне от 25 до 35%. То есть явного доминирования какой-либо группы не наблюдалось. В более поздние годы наблюдалась иная ситуация. Так, после проведения мелиораций доля *Cyclopoida* увеличилась почти в 2 раза по сравнению с фоновым периодом, а доля *Calanoida* сократилась более чем в 1,5 раза. Численность *Cladocera* несколько сократилась, тогда как доля *Asplanchna sp.* за все исследованные периоды была довольно стабильной. Все это может быть связано с угнетением видов-фильтраторов *Calanoida* и *Cladocera* за счет засорения их фильтрационного аппарата минеральными и органическими взвесями, поступающими в основном с мелиорируемых лугов через дренажную канаву [Чернышев, 2020b]. Определение размерных характеристик и состава этих взвесей требует специальных исследований.

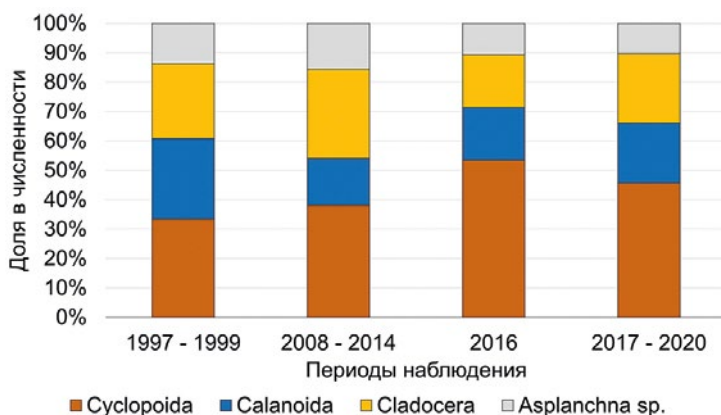


Рис. 11.2.2 – Доля крупных таксонов зоопланктона в общей численности в различные периоды наблюдений

В связи со сложной формой водоема и большой площадью литорали в нем сформированы благоприятные условия для роста водных растений. Заросли макрофитов занимают до 15% площади озера. Наибольшая степень зарастания наблюдается в мелководных заливах в связи с большей площадью литорали. В озере отмечено 50 таксонов макрофитов, из которых лишь 13 гидрофиты. Это следующие виды: *Elodea canadensis*, *Fontinalis antipyretica*, *Lemna minor*, *Nuphar lutea*, *Nymphaea candida*, *Persicaria amphibia*, *Potamogeton compressus*, *P. gramineus*, *P. natans*, *P. perfoliatus*, *Ricciocarpus natans*, *Utricularia minor*, *U. vulgaris*. Высокое разнообразие околководных растений и указывает на благоприятные для них условия в прибрежье – плавное изменение глубины, небольшой процент скалистых участков. Поэтому большая часть озера окаймлена зарослями осок и злаков.

В воде наибольшей встречаемостью характеризуются кубышка *Nuphar lutea* (96%) и ежеголовник *Sparganium emersum* (89%).

Видовой состав зообентоса внутренних озер Валаамского архипелага на момент исследования насчитывал 146 таксонов различного ранга, без учета видов семейства *Chironomidae* [Куличенко, 2004; Куличенко, 2006]. Доминирующими таксонами являлись ручейники (30 таксонов), стрекозы (20 таксонов), моллюски (24 таксонов, из которых 20 видов отнесены к *Gastropoda*). В озерах Сисяярви и Лещевое идентифицировано 84 и 97 таксонов беспозвоночных надвидового ранга соответственно. В этих водоемах, по данным 1996–2008 гг., высоким количеством таксонов характеризовались ручейники и брюхоногие моллюски – 14 и 21 таксон соответственно. Это, вероятно, связано не только с благоприятными условиями для развития бентосных организмов, но и с наличием постоянной связи озер между собой и с Ладожским оз. Отмечено высокое сходство сообществ зообентоса озер, значение коэффициента видового сходства Жаккара составило 0,54.

Для озер характерно мозаичное распределение зообентоса, так, в оз. Лещевое численность изменялась от 40 до 2 103 экз./м², биомасса – от 0,16 до 77,2 г/м². Для оз. Сисяярви диапазон варьирования был значительно уже: 40–727 экз./м², 0,38–8,80 г/м². Личинки стрекоз *Cordulia aenea* и комаров-хирономид составляли до 50–95% по численности и 45–90% по биомассе. Доминирующий комплекс хирономид интенсивно развивался на этих станциях в литорали озер в ассоциациях рдестов и кубышки желтой.

Два самых крупных внутренних озера Валаамского архипелага имеют значительное сходство по видовому составу зоопланктона, зообентоса и макрофитов, для них характерно значительное видовое богатство водной флоры и фауны. Озера на протяжении длительного времени были подвержены антропогенному воздействию, особенно оз. Сисяярви. Для них выделены периоды условно фонового функционирования и интенсивного антропогенного воздействия. Важно отметить, что в последние годы интенсивность этого воздействия существенно сократилась. Для оз. Лещевое наиболее сильный отклик на проведение мелиорационных работ на водосборе показало сообщество зоопланктона. Гидрохимические параметры, прозрачность воды и показатели фитопланктона изменились незначительно. Для оз. Сисяярви результаты натурных исследований (до 2007 г.) гидрохимических показателей и прозрачности воды, а также данные по фито- и зоопланктону свидетельствуют о начальной стадии антропогенного эвтрофирования.

11.3 Малые изолированные лесные озера

Большинство малых озер несущественно различаются по абсолютным значениям площади зеркала, средней и максимальной глубинам (табл. 11.3.1). Уровень воды в них на 2,5–3 м превышает уровень Ладожского оз.

Озера с наибольшей глубиной – Игуменское и Черное – характеризуются выраженной термической стратификацией в течение всего периода открытой воды, что связано не только с формой котловины и отсутствием ветрового перемешивания, но также с составом и содержанием органических и неорганических веществ в воде. В этих водоемах в период с июня по сентябрь

придонная температура остается практически постоянной (от 4,0 до 4,2 °С), объем гипolimниона в них не менее 30% от общего объема водной массы. В большинстве остальных водоемов выраженная термическая стратификация формируется в основном с середины июня по середину августа [Степанова, Шарафутдинова, Воякина, 2010].

Таблица 11.3.1

Лимнологические параметры озер Валаамского архипелага, 1998–2019 гг.

Озеро	S, км ²	h _{макс} , м	SD, м	pH	Электропроводность, мкСм/см	Цветность, °Pt-Co	*ООВ _{Мп} , мгО/л
Игуменское	0,022	8,0	1,2–2,8	6,5–7,5	28–52	55–90	11,8–28,6
Черное	0,008	8,5	1,4–2,6	6,4–7,5	29–52	60–90	8,0–28,2
Оссиено	0,003	2,4	0,9–1,4	5,6–7,1	48–58	60–110	7,0–26,9
Крестовое	0,014	3,1	0,7–1,7	7,3–8,6	32–50	80–212	29,1–53,5
Антониевское	0,028	3,5	0,5–1,7	5,5–7,5	23–34	150–275	22,0–58,2
Симняховское	0,019	2,1	0,3–1,2	5,2–6,5	26–33	97–172	24,3–45,4
Витальевское	0,005	1,9	0,4–1,1	6,2–7,1	36–63	130–223	21,1–44,0
Никоновское	0,011	4,0	0,1–1,2	5,8–7,6	55–63	90–260	20,1–42,9
Германовское	0,010	3,7	0,4–1,1	4,0–5,9	30–42	92–296	17,4–42,5

*– Перманганатная окисляемость

Большинство малых озер Валаамского архипелага сохраняют фоновый режим функционирования. Для озер характерны низкие значения прозрачности и высокая цветность воды, а также высокое содержание общего органического вещества (выше 18 мгО/л), что типично для малых лесных озер Карелии [Озера Карелии, 2013]. Особо выделяется только группа Коневских озер, поверхностные горизонты которых отличаются более низким содержанием аллохтонного органического вещества и, как следствие, меньшими значениями цветности и большей прозрачностью воды. Для водоемов также были характерны высокие концентрации ряда биогенных элементов, таких как железо и фосфор, что связано с особенностями подстилающих пород острова и особенностями почвенного покрова [Матинян, Урусевская, 1999]. Различия между озерами обусловлены, прежде всего, особенностями структурных характеристик водосборного бассейна и морфометрическими показателями.

Только четыре из исследованных водоемов оказались типичными для Карелии. В ходе сопоставления с другими водоемами карельского берега [Озера Карелии, 2013] было установлено, что озера о. Валаам отличаются повышенным содержанием органического вещества, железа и минеральных форм фосфора, а также относительно высокой минерализацией [Степанова, Шарафутдинова, Воякина, 2010]. Озера Игуменское и Черное могут быть отнесены к неопisanному ранее для Карелии типу озер, отличительной

особенностью которого являются существенные вертикальные градиенты большинства исследованных параметров.

Озера Валаамского архипелага различались по видовому составу, соотношению таксономических групп и уровню вегетации фитопланктона. В фитопланктоне озер Валаамского архипелага было обнаружено 312 таксонов рангом ниже рода из десяти отделов. По числу видов на всех участках акватории Валаамского архипелага преобладали зеленые (31%), диатомовые (22%), эвгленовые (18%) водоросли и цианопрокарисы (11%). При анализе видового состава в целом для акватории Валаамского архипелага отмечено значительное богатство видов, характерное как для северных, больших глубоководных озер, так и для малых озер Финляндии. Это вызвано разнообразием биотопов, характерных для водной системы. Несмотря на то что большинство озер имеет сходный трофический статус, показатели обилия фитопланктона в них сильно варьируют. Так, численность изменяется от 0,1 до 676,6 млн кл/л, а биомасса – от 0,1 до 105,2 мг/л. При анализе показателей обилия фитопланктона были выявлены значительные диапазоны численности и биомассы, как в конкретном озере, так и для всех малых озер. Наибольшее значение рафидофитовые имели в полигумусном оз. Витальевское. В кислых озерах зеленые водоросли создавали основную биомассу на протяжении всего периода исследования [Воякина, 2016]. В большинстве озер в планктоне чаще всего доминировали виды: *Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralfs ex Born. Et Flah., *Limnithrix planctonica* (Wołosz.) Meffert., *Planktolingbya limnetica* (Lemmerm.) Komark.-Legn. & Cronberg, *Gonyostomum semen* (Ehr.) Diesing. В кислых озерах активно вегетировали виды родов *Cryptomonas* Ehr., а также *Elakatothrix genevensis* (Reverd.) Hind., *Oocystis lacustris* Chod.

Для хода сезонной динамики фитопланктона в большинстве малых озер была отмечена значительная межгодовая вариабельность. Так, например, в оз. Игуменское было отмечено два пика фитопланктона за счет вегетации диатомовых и золотистых, и рафидофитовых. В озерах Никоновское и Крестовое чаще всего наблюдался один позднелетний пик за счет вегетации рафидофитовых водорослей. В оз. Германовское большую часть сезона в разные годы доминировали хлорококковые водоросли, формируя один летний максимальный пик. Для сравнения озер по таксономической структуре для каждого отдела водорослей были использованы среднемноголетние значения биомассы за весь период исследования. В большинстве озер по таксономической структуре было характерно доминирование рафидофитовых водорослей. Наибольшее значение эта группа играла в оз. Витальевское. В озерах Симняховское и Германовское зеленые водоросли создавали основную биомассу на протяжении всего периода исследования.

За период исследования в 2011–2018 гг. концентрация хлорофилла-а варьировала в озерах в широком диапазоне от 0,87 до 109,2 мкг/л, среднемноголетнее значение было 25,0 мкг/л. Содержание различных видов хлорофиллов в озерах Валаама значительно варьировало как от озера к озеру, так и в течение сезона. Показано, что в течение периода исследования в большинстве озер значительно различаются данные, полученные для проб из поверхностных горизонтов и интегральных, что, безусловно, связано с прогревом воды и температурной стратификацией. Минимальные значе-

ния хлорофилла-а были отмечены в полиацидном оз. Германовское, максимальное – в оз. Витальевское [Воякина, 2017].

В исследованных 9 озерах острова Валаам встречено 58 видов водных и околоводных растений. Практически на всех обследованных озерах встречаются *Calla palustris*, *Comarum palustre*, *Nuphar lutea*, *Sphagnum* sp. Гидрофиты представлены 18 видами: *Batrachospermum turfosum*, *Callitriche palustris*, *Elodea canadensis*, *Fontinalis antipyretica*, *Hydrocharis morsus-ranae*, *Lemna minor*, *Nitella flexilis*, *Nuphar lutea*, *Nymphaea candida*, *Persicaria amphibia*, *Potamogeton alpinus*, *P. berchtoldii*, *P. gramineus*, *P. natans*, *P. obtusifolius*, *Utricularia intermedia*, *U. minor*, *U. vulgaris*. На основе состава водной флоры, с помощью кластерного анализа, было выделено 4 группы озёр. Первая группа включала в себя озера Игуменское, Черное, Оссиёво, Виталиевское, Никоновское. Сообщества макрофитов занимают в этих озерах от 5 до 25% их площади. Водная флора относительно богата и содержит от 17 до 24 видов, причем доля истинно водных растений в ней довольно высока: от 30 до 50%. Группа 2 состоит лишь из одного озера Крестового; проективное покрытие растений составляет 5%. Здесь встречено 20 видов водных растений, 45% из которых гидрофиты. Следующая, третья группа так же представлена лишь ацидным оз. Германовским; проективное покрытие макрофитов очень мало (около 1%). Водная флора обеднена, она сложена 9 видами растений, причем 33% из них настоящие водные. Последняя, 4-я группа, – оз. Симняховское и оз. Антониевское; в этих водоемах площадь зарослей макрофитов составляет 5–10% от площади водного зеркала. Водная флора также небогата, она включает 11 видов макрофитов, доля гидрофитов невелика и составляет, соответственно, 27 и 36%.

Для малых лесных озер характерно небольшое количество видов зообентоса по сравнению, например, с оз. Лещевое, что связано с их небольшой площадью, особенностями газового режима и содержанием гуминовых соединений. Для небольших сильно гумифицированных озер Оссиёво и Германовское характерно не более 8–14 видов зообентоса. В свою очередь, в центральной части котловин озер Игуменское, Черное формируется неблагоприятный газовый режим, присутствие сероводорода приводит к практически полному исчезновению зообентоса. Здесь нерегулярно наблюдались только представители рода *Chaoborus* sp.

Отмеченные особенности формирования таксономического состава зообентоса малых озер Валаамского архипелага подтверждаются величинами коэффициента сходства сообществ. Максимальная величина коэффициента Жаккара (0,42) характерна для озер Игуменское и Черное. Для остальных лесных озер отмечены более низкие значения коэффициента видового сходства (0,05–0,35). По таксономической структуре мелководные зарастающие озера Оссиёво и Симняховское выделялись среди других слабо сточных озер. Для них характерно отсутствие ряда крупных таксонов (пиявок и моллюсков) и малое число видов в остальных.

Исследованные озера существенно отличались по видовому разнообразию бентоса. Достаточно высокие значения индекса Шеннона – Уивера отмечены на станциях в прибрежной части озер Игуменское, Черное. Так, например, в оз. Игуменское этот показатель варьировал в течение сезона

от 2,1 до 3,1 бит/экз. Однако высокие значения индекса видового разнообразия могут наблюдаться в озерах и при низком количественном развитии зообентоса. Например, в оз. Оссиёво, для которого характерны одни из самых минимальных значений численности и биомассы, значения индекса видового разнообразия Шеннона – Уивера не опускались ниже 1,3 бит/экз., а максимальные значения индекса составляли 3,5 бит/экз.

Сравнительный анализ имеющихся классификаций озер по структурным показателям основных сообществ показывает хорошую согласованность выделяемых групп озер для макрофитов, зоопланктона и бентоса. Ранее было показано, что при увеличении видового богатства и разнообразия макрофитов видовое разнообразие и биомасса зоопланктона возрастают [Степанова, Зуева, Воякина, 2010]. В планктоне увеличивается количество литоральных видов и видов-детритофагов. Это подтверждается и взаимосвязью между долей гидрофитов в видовом списке и биомассой и видовым разнообразием зоопланктона. При увеличении зарастания истинно водными видами также увеличивается доля коловраток в общей численности и биомассе зоопланктона. Значения коэффициентов корреляции достоверные и изменяются от 0,58 до 0,77 [Степанова, Зуева, Воякина, 2010]. Кубышка желтая (*Nuphar lutea*) характеризуется наибольшими площадями зарастания в исследованных водоемах. В ее зарослях отмечены максимальные значения биомассы бентоса. Развитие этого гидрофита в водоеме не только способствует установлению и поддержанию благоприятного газового режима, но и структурированию донных осадков и увеличению содержания «молодого» детрита в них. Мало разложившиеся растительные остатки и ассоциированные с ними бактериальные комплексы занимают в рационе бентосных организмов значительное место. Сами растения рдестов и кубышки, кроме того, часто служат субстратом для развития и обитания личинок ранних возрастов многих видов беспозвоночных. Важно также отметить, что общая площадь зарастания макрофитами не связана с показателями их видового разнообразия.

Оз. Германовское значительно отличается от других водоемов низкими значениями видового богатства и видового разнообразия всех исследованных сообществ, а также монодоминированием. Важно также отметить, что виды, выступающие здесь в качестве доминант, в других озерах характеризуются относительно невысоким количественным развитием. Для зоопланктона это – *Ceriodaphnia quadrangula*, а для бентоса – *Asellus aquaticus*. Для этого озера отмечена минимальная площадь проективного покрытия макрофитов (1%) и наименьшие значения хлорофилла-а по сравнению с малыми озерами о. Валаам. Определенный по значениям первичной продукции трофический статус этого водоема хорошо согласуется с данными по анализу экологических амплитуд по трофности сфагновых мхов переходного болота на водосборе оз. Германовское [Комолова, 2015]. Нами также показано [Комолова и др., 2015] существенное влияние заболоченного водосбора на внутриводоёмные процессы.

Антропогенное воздействие затронуло экосистему оз. Никоновское, на его водосборе в 2007 г. была проведена мелиорация лугов на площади 15,2 га, что составляет около 15% водосбора [Экосистемы Валаамского архипелага..., 2016]. В результате отмечено резкое снижение прозрачности

воды (SD), которая наиболее быстро отреагировала на изменения стока с водосбора. Среднее значение прозрачности воды за период естественного функционирования водосбора составляло 0,7 метра. В период антропогенного воздействия минимальное значение прозрачности было зафиксировано в сентябре 2012 г. (0,1 м). Причины резкого изменения прозрачности связаны с особенностями проведения работ. Мелиоративные работы проводились с использованием экскаватора, дренажные каналы были углублены местами до 1,5–2,0 м. Вследствие того, что с поверхностным стоком в озеро началось поступление не только органического вещества, но и минеральных взвесей (песок и глина), произошло существенное изменение его гидрофизических и гидрохимических параметров [Экосистемы Валаамского архипелага..., 2016]. В озере произошло увеличение содержания общего органического вещества по всей толще воды, существенно изменился газовый режим. В настоящее время происходит существенная перестройка всех сообществ гидробионтов, ее последствия плохо предсказуемы; исследования этого процесса одна из основных задач для будущих исследований.

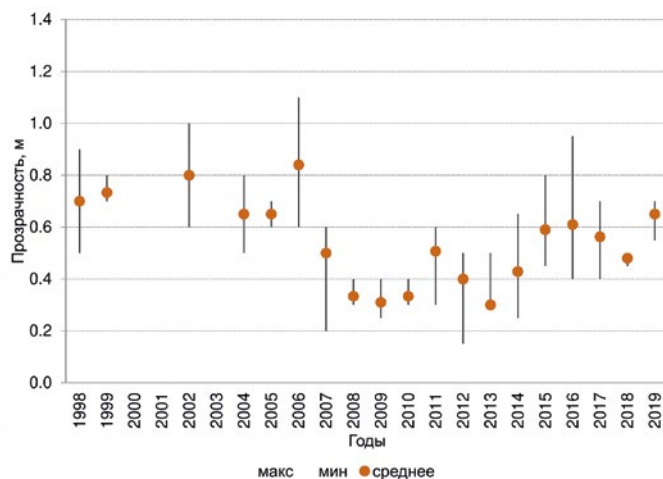


Рис. 11.3.1 – Средние и экстремальные значения прозрачности воды в оз. Никоновское

В заключении важно отметить, что большинство из всесторонне исследованных водных объектов Валаамского архипелага могут рассматриваться, как эталонные при изучении нарушенных антропогенным воздействием экосистем. Важно отметить, что наблюдения фонового состояния разнотипных экосистем севера таежной зоны играют важную роль в изучении влияния глобального изменения климата на локальном уровне. При этом для каждой из описанных зон Валаамского архипелага показано наличие водных объектов, подверженных антропогенному воздействию, связанному с активной хозяйственной деятельностью Валаамского монастыря последние два десятилетия. Стоки с монастырской фермы, недостаточно очищенные коммунально-бытовые стоки, пассажирские и грузовые причалы, загрязнение и механическое перемешивание поверхностных горизонтов воды

теплоходами и маломерными судами, садки рыборазводной фермы, а также строительные и дорожные работы, прокладка линий электропередачи, реконструкция и строительство новых скитов на водосборах озер и заливов; автотранспорт, рекреационная деятельность, связанная с православным паломничеством и туризмом, – далеко не полный перечень воздействий.

Наиболее интенсивное влияние оказывается на прибрежную зону архипелага. Для Малой Никоновской бухты источником антропогенного воздействия являлось рыборазводное хозяйство. В ходе проведенных работ не выявлено существенных изменений лимнологических характеристик в поверхностных слоях водной массы по сравнению с открытой акваторией. Однако несмотря на относительно благополучную экологическую ситуацию в поверхностных горизонтах, на дне происходит накопление органических веществ. Бактериальное покрытие (мат), сформировавшееся в результате воздействия садков, увеличивает свою площадь и в настоящее время занимает треть кутовой части бухты.

Для изолированной части Монастырской бухты, испытывающей более длительное антропогенное воздействие, отмечены серьезные перестройки в биологических сообществах и экстремальные значения ряда параметров, которые ранее не наблюдались в прибрежной зоне архипелага. В настоящее время трофический статус бухты оценивается как эвтрофный. Это связано прежде всего с локальной антропогенной нагрузкой в виде коммунально-бытовых стоков поселка Валаам и работой причалов. Важно также отметить, что открытая часть бухты сохраняет фоновый режим функционирования.

В связи со значительной площадью, объемом воды и наличием водообмена с открытой частью Ладожского оз. в бухтах происходят процессы самоочищения. Так, после начала безаварийной работы очистных сооружений экологическая ситуация в Монастырской бухте стала улучшаться, что говорит о высоком потенциале восстановления водного объекта. Однако поступление загрязняющих веществ в прибрежную зону происходит постоянно, но при разбавлении водами глубоководной части Ладоги оно не всегда прослеживается. Между тем, эти вещества никуда не исчезают, они аккумулируются в донных отложениях и в телах гидробионтов, включаясь в разветвленную трофическую сеть Ладожского оз.

Озера, имеющие водообмен, с Ладогой также подвержены антропогенному воздействию. Наиболее продолжительное и интенсивное воздействие оказывается на оз. Сисяярви. Как результат – изменение трофического статуса, определённого по прозрачности и данным по первичной продукции, ухудшение газового режима. Мелиорационные работы на водосборе оз. Лещевое привели к изменениям в структурных показателях зоопланктона, но на данный момент существенно не затронули фитопланктон и гидрохимические параметры.

Единственный водоем среди малых лесных озер на которое оказали влияние мелиоративные работы на его водосборе – оз. Никоновского. Здесь произошли существенные изменения прозрачности, цветности, а также газового режима. Это связано с поступлением из мелиорационных канав не только органических веществ, но и минеральных взвесей в значительном объеме. В настоящее время сток из канав существенно сократился,

и для некоторых параметров отмечена благоприятная тенденция на возобновление фоновых значений. В связи с небольшими глубинами и площадью зеркала, а также большим удельным водосбором озеро характеризуется высокой уязвимостью. Воздействия затронули и водосборы озер Крестовое и Антониевское, но на данном этапе исследования негативных тенденций в изменении исследуемых параметров не выявлено. Однако расчет уязвимости водоемов по методике В. В. Дмитриева позволил отнести все малые лесные озера к IV классу, что соответствует высокой степени уязвимости. Значения балльно-индексной оценки варьировали от 26 до 27 [Дмитриев, Фрумин, 2004].

Потепление климата сказывается на прогреве водной массы. Анализ влияния температуры воды на структуру сообщества планктона прибрежной зоны Валаамского архипелага показал, что существенное увеличение температуры воды, которое можно связать с общим потеплением, пока не приводило к увеличению количественного развития организмов планктона. Межгодовые различия в количественном развитии планктона вызваны гидрологическими условиями конкретных лет. В то же время влияние прогрева сказывалось на уменьшении различий между участками прибрежной зоны. Существенно уменьшались значения вертикальных и горизонтальных градиентов температуры, содержания кислорода и других гидрохимических параметров. Вследствие этого структура планктонных комплексов становилась менее разнообразной, высокого количественного развития достигали эврибионтные виды, значения показателей видового разнообразия существенно уменьшались [Влияние изменений климата..., 2013].

Анализ состояния всей водной системы Валаамского архипелага в 1996–2019 гг. показал, что трофический статус ее зон неоднороден. Так, прибрежная зона Ладожского оз. относится преимущественно к олиго- и мезотрофному типу. Монастырская бухта может классифицироваться как эвтрофный водоем. Озера Сисяярви и Лещевое, связанные с Ладогой протоками, а также малые озера имеют мезотрофный статус.

Глава 12. Математическое моделирование как инструмент оценки влияния хозяйственных и климатических факторов на озеро и прогноза их последствий

Математическая модель – формализованное представление существующих знаний о закономерностях и особенностях развития изучаемых природных систем и отдельных процессов в виде математических выражений. Основное предназначение моделей – получение новой информации об описываемых системах и процессах, когда натурные наблюдения затруднены или невозможны.

12.1 Особенности моделирования экосистемы Ладожского озера на начальных этапах развития исследований

В 1960–1970 гг. Ладожское оз., как и многие другие крупнейшие озера мира, подверглось антропогенному эвтрофированию из-за роста биогенной нагрузки, которая к началу 1980-х годов выросла на Ладоге почти в 3,5 раза, от 2430 т Р/год до 8100 т Р/год [Антропогенное..., 1982]. Для диагноза состояния экосистем и прогноза возможных изменений термогидродинамики (ТГД) и экосистем Ладожского оз. были проведены натурные эксперименты и созданы математические модели [Ладожское..., 1987; Меншуткин, Воробьева, 1987]. Обзоры разработанных и использованных для Ладожского оз. одно-, двух- и трехмерных (3D) математических моделей и имеющих натурных экспериментальных наблюдений были представлены в ряде работ [Кондратьев и др., 2002; Меншуткин и др., 2013; 2014]. В них показано, что наибольшее распространение получили модели, формулируемые в виде краевых задач для систем одно-, двух- и трехмерных дифференциальных уравнений переноса как консервативных, так и неконсервативных примесей в водной среде. Эти уравнения включают нелинейные операторы, описывающие трансформацию живого и мертвого органического вещества (фитопланктона, зоопланктона, бактериопланктона, бентоса, детрита) и растворенных в воде биогенных элементов (углерода, азота, фосфора и кремния). Исходя из конкретных задач построения моделей и особенностей озер, в состав моделей экосистем иногда включаются рыбы, макрофиты, учитывается наличие растворенного в воде кислорода и его обмен с атмосферой через поверхность воды [Меншуткин, 2010]. В настоящем разделе рассмотрены особенности использования только трехмерных математических моделей для оценки состояния и долгосрочных изменений экосистем Ладожского оз. в сезонных и климатических масштабах. При достаточно большом разнообразии созданных моделей может возникнуть вопрос, а нужно ли еще создавать новые математические модели экосистем для Ладожского оз. или же воспользоваться уже ранее созданными? Например, комплексом трехмерных (3D) математических моделей ТГД и экосистем, разработанных в СПб ЭМИ РАН и при участии ИНОЗ РАН и ИВПС КарНЦ РАН [Астраханцев

и др., 2003; Меншуткин и др., 2013; 2014; Rukhovets, Filatov, 2010], которые являются «авторскими» и пока не получившими широкого распространения среди пользователей. Можно воспользоваться моделями, доведенными до стадии «продукта» в виде кода: POM, ECOM, ELCOM, EFDC, CANDIA, NEMO, – и др., которые применялись для моделирования экосистем Великих американских озер [Dupontetal., 2011; Yerubandy, 2010; Belecky, Schwab, 2008]. Например, одним из современных комплексов NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean), разработанным для океана [Madec, 2012], но который применялся также и для крупных стратифицированных озер. Среди ряда достоинств в комплексе NEMO имеется возможность использовать несколько систем координат, что позволяет строить глобальные и региональные реализации, обеспечить удовлетворительное разрешение приповерхностных и придонных погранслоев. Для параметризации подсеточных процессов в NEMO применяются модели замыкания, например, Меллора и Ямады. Также предусмотрен интерфейс для подключения модели воспроизведения ледового режима и модели биохимических трансформаций для оценки качества воды, а также возможность использования глобальных моделей циркуляции атмосферы для задания внешних воздействий. То есть в комплексе NEMO имеются определенные преимущества перед разработками СПб ЭМИ РАН. Применение одного из современных стандартных комплексов моделей Biogeochemical Flux Model – BFM [Vichi, 2013] для внутренних водоемов, а именно для Средиземного и Балтийского [Vichi et al., 2004] и Белого морей [Chernov et al., 2018], весьма перспективен, но наличие большого числа (несколько десятков) входных параметров для химико-биологического блока, многие из которых трудно корректно определить по натурным данным, ограничивает возможности применения модели для Ладожского оз. Кроме того, для указанных стандартных модельных комплексов невозможно внести изменения в код, например, учесть важную роль водных грибов и бактериопланктона в дополнительном поступлении биогенных элементов в озеро, что было выявлено в ходе натурных экспериментов после уменьшения антропогенной нагрузки с 1992 г. [Петрова и др., 2005]. В то время как в специально разработанных для Ладожского оз. 3D-моделях [Руховец и др. 2011; Меншуткин и др., 2013] это оказалось возможным сделать. Многолетний опыт позволил показать [Jorgensen, 1994; Меншуткин, 2010], что при конструировании экологических моделей озер «самым важным является наличие качественных исходных данных, а стремление к возможно большей детализации должно быть уравновешено пониманием того, что резкий рост числа переменных в модели, как правило, не улучшает модель. При наличии большого числа и разнообразия математических моделей экосистем необходимо учитывать то, что даже при сходстве абиотических условий и общности основных механизмов функционирования экосистем крупнейших озер мира приоритетность механизмов формирования экосистем в этих озерах различается...», и потому требуется создание или совершенствование моделей для уникальных экосистем крупных озер, таких как Байкал, Ладожское, Онежское, Великие американские и др. озера мира [Зилов, 2006; Меншуткин и др., 2014; Mooij, 2010]. Подобный подход с использованием ограниченных, но надежно определен-

ных параметров, был использован в оригинальных 3D-моделях экосистемы климатического масштаба, созданных для Балтийского моря [Pitknen, 2007; Savchuk, 2002; Рябченко и др., 2008], а также Белого моря [Белое море..., 2007]. Поскольку полнота описания свойств реальной озерной экосистемы ее моделью зависит от доброкачественности теории, положенной в основу модели, и от точности используемой информации о состоянии реального озера [Меншуткин, 2010]. В этом случае для уникальной экосистемы Ладожского оз. было отдано предпочтение использованию и совершенствованию комплекса моделей, специально разработанного для озера [Астраханцев и др., 2003]).

Практически все модели экосистемы, разработанные в СПб ЭМИ РАН и в ИНОЗ РАН, в той или иной степени представляют собой развитие модели экосистемы Ладожского оз., описанной в [Меншуткин, Воробьева, 1987]. Основная цель разработанных моделей для Ладожского оз. состояла прежде всего в определении реакции экосистемы на рост фосфорной нагрузки озера при увеличении антропогенного влияния и процесса эвтрофирования озера. Биотический блок этих моделей был построен на основе данных наблюдений за состоянием экосистемы озера в период 1976–1979 гг. Поэтому он не учитывал изменения в экосистеме озера, наметившиеся во второй половине 80-х годов и после 1992 г., когда последовало резкое уменьшение антропогенной нагрузки на экосистему, при этом возросла роль растворенного органического вещества, бактериопланктона, водных грибов во внутриводоемном обороте фосфора. После 1992 г. в период развитого термоклина в озере возникли зоны с пониженным содержанием кислорода, было отмечено также изменение видового состава доминирующих групп фитопланктона [Ладожское озеро, 2002; Петрова и др., 2005]. С конца 1980-х гг. на водосборе озера отмечалось заметное потепление климата, что проявилось в изменении стока с водосбора и отражении на гидрологическом и химико-биологическом режимах озера [Голицын и др., 2000; Румянцев и др., 2002; Петрова и др., 2005; Курашов, 2002], что должно учитываться при моделировании. В обзорных работах [Кондратьев и др., 2002; Развитие..., 1999] были рассмотрены имеющиеся до 2002 г. разработки моделей для ТГД и экосистемы Ладожского оз. Отмечалось, что если для описания ТГД процессов, состояние математического моделирования Ладожского оз. относительно удовлетворительное, то для понимания происходящих изменений биогеохимических процессов не хватало сведений, необходимых для адекватного описания поведения гидробионтов под воздействием факторов внешней среды в новых условиях уменьшения антропогенной нагрузки и при потеплении климата. Для ряда моделей отмечено слабое представление поведения бентоса, учет процессов обмена на границе вода – дно. Решение указанных проблем потребовало как совершенствования имеющихся моделей с более корректной параметризацией химико-биологических процессов, а также постановки специальных натурных экспериментов, получение новых данных мониторинга, что ограничивалось возможностями экспериментальной базы как академических институтов, так и организаций Росгидромета, после 1991 г. Основной вывод работы [Кондратьев и др., 2002] состоял в том, что существующее на 2002 г.

состояние математического моделирования, постановка новых натурных экспериментов и существующая система мониторинга озера не являются удовлетворительными для надежного прогноза происходящих изменений экосистемы Ладожского оз.

Если одной из важнейших проблем, связанной с изменением экосистем Ладожского оз. до 1991 г., было антропогенное эвтрофирование и загрязнение озера, то после – актуальными стали исследования, связанные с резким уменьшением фосфорной нагрузки в среднем с 6040 т Р/год в период 1984–1995 гг. до 3580 т Р/год в 1996–2005 гг., но относительно медленным восстановлением экосистемы озера [Ладожское..., 1992; Расплетина, Сусарева, 2002] и с заметным влиянием потепления климата на экосистему озера [Румянцев, Драбкова, 2007]. В работах [Меншуткин и др., 2014; Руховец и др., 2006; 2011; 2013] представлены модели, в которых учтены новые сведения об экосистеме озера, полученные экспериментально [Петрова и др., 2005]. В СПб ЭМИ РАН при сотрудничестве с ИНОЗ РАН был создан комплекс согласованных моделей ТГД и экосистемы озера (КГТМ – Климатическая гидротермодинамическая модель) и Комплекс моделей экосистемы Ладожского оз. (КМЭЛО). Биотическая часть первой или базовой модели экосистемы Ладоги [Меншуткин, Воробьева, 1987] стала основой для всех последующих моделей [Астраханцев и др., 2003; Rukhovets, Filatov, 2010; Руховец и др., 2013]. Модели включали фитопланктон, представленный девятью комплексами, зоопланктон, разделенный на хищный и мирный (фильтрующий), детрит, растворенное в воде органическое вещество, растворенный в воде кислород и растворенный в воде минеральный фосфор – единственный биогенный элемент, используемый в этих моделях. Кроме того, в одну из моделей включена подмодель зообентоса [Астраханцев и др., 2003]. При помощи этих моделей воспроизведен процесс антропогенного эвтрофирования Ладожского оз. 1962–2000 гг., т. е. в период интенсивной антропогенной нагрузки, а также при ее резком падении в 1992 г. По данным численных экспериментов на модели была изучена роль внутренней фосфорной нагрузки – потока фосфора из донных отложений, а также получены оценки возможных изменений в экосистеме озера под влиянием глобального потепления [Руховец и др., 2006]. Впервые для Ладожского и Онежского озер в вычислительных экспериментах были рассчитаны допустимые пределы нагрузок по сбросу в водоёмы фосфора и азота. В работах этого этапа исследований [Руховец и др., 2006; 2010; 2011] получены оценки возможных изменений их экосистем под влиянием возможных изменений климата вследствие глобального потепления. Результаты вычислительных экспериментов показали, что по крайней мере до середины 21-го века изменения в ТГД режиме и в экосистеме озера будут незначительными, и по-прежнему основным фактором, определяющим изменения в экосистемах, будет антропогенная нагрузка [Rukhovets, Filatov, 2010].

В созданном комплексе моделей были учтены экспериментальные данные, полученные Н. А. Петровой [2005], которая показала, что с середины 1980-х годов в планктоне Ладожского оз. выросла численность криптофитовых водорослей. Другим примером таких данных могут служить водные грибы, роль которых как деструкторов стала сопоставима с влиянием бак-

териопланктона [Иофина 1992; Петрова и др., 2005]. Совершенствование моделей экосистем оказалось проблематичным из-за того, что после 1991 г. не удается в нужном объеме поставить натурные эксперименты и получить новые экспериментальные данные мониторинга. С учетом полученных новых сведений об экосистеме озера были разработаны так называемые адаптационные модели [Руховец и др., 2013], структура которых может меняться под влиянием изменения внешних воздействий. Именно такие модели могут использоваться для прогностических расчетов. К классу адаптационных моделей могут относиться модели сукцессии фитопланктона.

В публикациях [Петрова и др., 2005; Румянцев, Драбкова, 2007] процесс трансформации экосистемы Ладожского оз. представлен как последовательность этапов, в течение которых трансформация экосистемы протекала по-разному. Таких этапов до 2005 г. было выделено четыре: 1959–1962, 1976–1983, 1984–1995 и 1996–2005, для которых выполнены соответствующие натурные и вычислительные эксперименты [Расплетина, 2006; Петрова и др., 2005; Румянцев и Драбкова, 2007; Ладога, 2013]. Первая модель сукцессии была представлена в [Меншуткин, Воробьева, 1989] для фитопланктонного сообщества Волховской губы. А для всего озера модель сукцессии создана позднее под руководством Л. А. Руховца [Rukhovets et al., 2003]. С ее помощью воспроизведено функционирование экосистемы Ладоги для периода 1961–1995 гг., включающей условия изменяющейся фосфорной нагрузки в 1961–2000 гг. По экспериментальным данным [Петрова и др., 2005] было отмечено, что существенное снижение фосфорной нагрузки после 1995 г. не привело, вопреки ожиданиям, к снижению продукции фитопланктона. С помощью моделирования [Руховец и др., 2011] воспроизведен механизм ускорения внутриводоемного оборота фосфора и полученные результаты, объясняющие фактический ход трансформации экосистемы Ладожского оз. Для этого авторы изменили блок, описывающий процесс деструкции детрита и растворенного в воде органического вещества. По результатам численных экспериментов подтверждены экспериментальные результаты о вовлечении во внутриозерный круговорот значительной части растворенного в воде органического вещества *DOP* [Петрова и др., 2005]. Следует отметить, что предложенный Л. А. Руховцом с соавторами путь совершенствования модели не является «подгончным», поскольку в дискретной модели точно выполнялся закон сохранения (изменения) для общего фосфора. Проведенные вычислительные эксперименты на этом комплексе [Руховец и др., 2006] показали, что влияние возможных изменений климата на водосборе озера до середины XXI в. незначительно сказываются как на ТГД режиме, так и экосистеме. По-прежнему основным фактором трансформации экосистем Ладоги является изменение биогенной нагрузки.

Подводя итоги по разработке моделей экосистемы Ладожского оз., которые были обеспечены экспериментальными данными ИНОЗ РАН, можно констатировать наличие трех основных видов моделей, на основе которых созданы несколько их модификаций для решения разного круга задач [Меншуткин и др., 2013; 2014; Руховец и др. 2013]. Модели позволяли воспроизвести циркуляцию и температурный режим, а также многолетнее круглогодичное функционирование экосистемы озера:

- модель гидротермодинамики Ладожского оз. (1987; 1998–2003);
- модель экосистемы, основанная на круговороте азота и фосфора (1992);
- базовая модель, основанная на круговороте фосфора (1998);
- модель, имеющая три трофических уровня (1998);
- модель, включающая зообентос (2003);
- модель сукцессии фитопланктона (2003);
- комплексная модель экосистемы Ладожского оз. (2008);
- модернизированная модель сукцессии (2010);
- модель с организмами-деструкторами (2012).

Базовая модель, созданная В.В. Меншуткиным [2010], на основе которой построены все модели, созданные после 1998 г. [Астраханцев и др., 2003], включала только один биогенный элемент – фосфор. В этой модели фитопланктон представлен тремя экологическими группами: к первой отнесены виды, преобладающие весной, ко второй – преобладающие летом, к третьей – летне-осенние. В базовой модели зоопланктон представлен единой биомассой. В состав базовой модели была введена подмодель зообентоса.

Модель сукцессии фитопланктона отличается от базовой модели тем, что в ней фитопланктон представлен девятью комплексами, названными по входящим в них доминантам. Важно отметить, что основным механизмом трансформации экосистемы озера, как в условиях естественной эволюции, так и при антропогенном эвтрофировании, служит сукцессия (направленная смена) видового состава гидробионтов всех трофических уровней, в первую очередь – фитопланктона. Значимым индикатором состояния экосистемы Ладожского оз. является зообентос – наиболее консервативный элемент экосистемы, и потому степень деградации зообентоса может служить характеристикой состояния экосистемы [Курашов, 2002].

Комплексная модель представляет собой совокупность созданных моделей для экосистемы Ладожского оз. В комплексную модель включен зоопланктон, который разделен на мирный и хищный, и включена подмодель зообентоса, что позволило сделать модель инструментом исследования изменений в экосистеме озера. Верификация модели была проведена по стандартной схеме, принятой в работах по этой тематике [Menshutkin et al., 1998; Rukhovets et al., 2008; Астраханцев и др., 2003], для нагрузки $6,1 \text{ тыс. т } P_{\text{общ}}/\text{год}$.

Возможные пути дальнейшего развития математического моделирования озерных экосистем были предложены авторами и пользователями разработанных моделей [Меншуткин и др., 2014; Rukhovets, Filatov, 2010]. Подчеркивалось, что для развития как самих моделей, так и постановки экспериментов, необходимы новые данные и знания, в особенности о зимнем режиме водоема. Необходимо использовать более подробные сетки с расчетами на вычислительных кластерах. Для совершенствования оценки состояния и прогнозирования изменений экосистемы озера предлагалось использовать синтез «традиционного» моделирования и «инновационного» подходов (модели когнитивные, нечетких множеств, конечных автоматов и др.) [Мооij, 2010; Меншуткин, 2010]. Нужно отметить, что в этих моделях недостаточно развит атмосферный блок, не используются данные реанали-

за, слабо описан ледяной покров, а параметризация подсеточных процессов задается по оценкам, полученным экспериментально [Филатов, 1991]. В вычислительных экспериментах на этих моделях не использовалось распараллеливание и не применялись компьютерные кластеры.

Кроме указанных выше проблем, для понимания и корректного описания происходящих в озере изменений, калибровки и верификации разрабатываемых математических моделей требуется проведение новых натурных наблюдений и модернизация существующей системы мониторинга экосистемы [Поздняков, Кондратьев, 2016; Румянцев и др., 2012; Румянцев, Крюков, 2017]. Возможности мониторинга, к сожалению, за последние 30 лет значительно снизились по сравнению с теми, которые были до 1991 г.

12.2 Разработка новых моделей термогидродинамики и экосистемы Ладожского озера

С учетом сказанного выше стало очевидным, что для решения задач, связанных с оценкой состояния и прогнозом изменений экосистемы Ладожского оз., необходима разработка новых 3D-моделей экосистем озера [Ладога, 2013; Курашов и др., 2018]. Требуется учесть процессы трансформации экосистемы озера как последовательность этапов, в течение которых меняются факторы воздействия [Ладожское..., 2015]. В разное время и в разных участках озера процесс антропогенного эвтрофирования проходил по разному типу: гетеротрофному или автотрофному. При уменьшении антропогенной нагрузки после 1992 г. оказалось, что возросла роль внутриводоемных процессов, и отмечалось замедление процесса восстановления экосистемы. После 1990 г. значительно возросло воздействие климатических изменений, которые проявляются в возрастании температуры поверхностного слоя воды Ладожского и Онежского озер [Ладога, 2013; Филатов и др., 2020], а также в изменении времени вегетационного периода. Важно также учесть комплекс процессов, происходящих подо льдом [Golosov, 2012]. При потеплении климата и увеличении стока с водосбора в зимний период происходят изменения в формировании гидрохимического режима, которые отражаются в увеличении цветности воды, содержании железа и фосфора в гумусовых комплексах и обилии и структуре водных сообществ. По данным новых натурных экспериментов на Онежском оз. [Калинкина и др., 2018] и расчетов на моделях [Голосов и др., 2020; Филатов и др., 2019] оказалось, что роль климатических факторов после 2010 г. и уменьшение антропогенного влияния стали более заметными в изменении экосистем Ладожского и Онежского озер. При потеплении климата в зимний период возрастает сток рек, происходит увеличение поступления alloхтонных веществ в озеро, отмечается дополнительное поступление железа и фосфора в комплексе с гумусовым веществом, происходит угнетение глубоководных бентосных сообществ [Калинкина и др., 2018; Курашов и др., 2018].

Для диагноза и прогноза экосистем крупнейший озер России было разработано и/или адаптировано несколько новых моделей экосистем и выполнены численные эксперименты с целью долгосрочного прогнозирования как гидрофизических процессов и полей, так и экосистемы Ладожского оз. Эти

разработки проведены совместно сотрудниками ИВПС, ИВП, ИВМ, ИНОЗ РАН, а также ИО РАН, Института наук о Земле СПб ГУ и опубликованы в коллективной монографии [Диагноз и прогноз..., 2020].

Одна из моделей [Зверев и др., 2016] основана на ранее разработанной модели ТГД для Каспия [Ибраев, 2008]. Важно было воспроизвести климатическую циркуляцию вод озер путем построения периодического решения на значительное физическое время, кратное времени условного водообмена озера, т. е. не менее чем на 12–14 лет для Ладоги и Онего, а также описать более корректно, чем в моделях СПб ЭМИ РАН, формирование и разрушение ледяного покрова, описать намерзание, таяние, торошение льда. Атмосферные воздействия задавались с использованием реанализа. По сравнению с ранее разработанными моделями использованы более мелкие расчетные сетки [Зверев и др., 2016] с пространственным шагом от нескольких сот метров до 2 км. Такое разрешение позволяет описывать сложную морфометрию дна и берегов, прибрежную зону, имеющие размеры порядка бароклинного радиуса деформации Россби, т. е. 2–4 км, а также более точно воспроизвести фронтальные разделы и циркуляцию вод в заливах. Для этого случая для Ладожского и Онежского озер было показано преимущество модели гидродинамики внутреннего моря (МГВМ), в которой производные в дифференциальных уравнениях аппроксимируются методом конечных объемов (КО) [Ибраев, 2008], а не их дискретными (разностными) аналогами, по методу конечных разностей (КР) как в моделях POM, NEMO, что является неоспоримым и решающим преимуществом для выбора модели. Для расчетов использовались кластер КарНЦ РАН. На основе адаптированной для Ладожского и Онежского озер модели ТГД была создана модель экосистемы (первичной продукции) для условий антропогенных и климатических воздействий [Голосов и др., 2020].

Вторая модель ТГД и экосистемы Ладожского оз. позволяла описывать биогеохимические потоки [Исаев, Савчук, 2020]. Ранее, при моделировании экосистем Ладожского и Онежского озер в цикле работ СПб ЭМИ РАН было уделено внимание представлению и анализу пространственно-временных изменений концентраций и биомасс компонентов экосистемы, тогда как механизм этих изменений, воспроизводимый моделью в виде биогеохимического круговорота вещества, осуществляемого процессами транспорта и трансформации не рассматривался. Поэтому принципиально важной задачей было описать механизмы изменений в экосистемах, воспроизводимые моделью в виде биогеохимического круговорота вещества, осуществляемого процессами транспорта и трансформации с учетом динамики биогенных элементов в донных отложениях, служащих «памятью» эволюции озерной экосистемы и важнейшим звеном, замыкающим биогеохимический круговорот путем реминерализации биогенных элементов. Была поставлена задача описания в экосистеме биогеохимических потоков вещества, которыми и определяется динамика интегральных запасов биогенных элементов в отдельных частях и компонентах экосистемы, включая донные отложения. На этой основе в 2017–2018 гг. А. В. Исаевым и О. П. Савчуком впервые для Ладожского оз. была разработана трехмерная модель биогеохимических круговоротов вещества озера [Филатов и др.,

2019; Исаев, Савчук, 2020]. Здесь использована и адаптирована для пресного водоема отечественная модель эвтрофирования Балтийского моря (SPBEM) [Savchuk, 2002; Рябченко и др., 2016], которая успешно применялась ранее для оценки и прогноза изменений экосистемы Балтийского моря [Savchuk, 2002; Gustafsson et al., 2017].

Долгосрочные прогнозы изменений гидрологических характеристик и экосистемы Ладожского оз. основывались на сценарных оценках изменений климата до 2100 г., на водосборах озер, которые даются на основе разнообразных моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), и в соответствии с разными сценариями IPCC [2013]. В настоящей работе использовалась как МОЦАО, созданная в ИВМ РАН [Володин, Дианский, 2013; Дианский, 2013], так и региональная климатическая модель Центра Россби Шведского метеорологического и гидрологического института RCAO (Rossby Centre Atmosphere Ocean model) [Döscher, 2002], также для модели RCAO были использованы результаты восстановления атмосферных характеристик на основе двух глобальных моделей климата: ECHAM5/MPI-OM Института Метеорологии им. Макса Планка, Гамбург, Германия [Jungclaus, 2006; Roeckner, 2006].

12.3 Моделирование термогидродинамических процессов и экосистем Ладожского и Онежского озер на основе 3D-модели гидродинамики внутреннего моря – МГВМ

В рамках тем НИР Госзадания ИНОЗ РАН и проекта РНФ14-17-00740 выполнены исследования термогидродинамики крупнейших озер Европы – Ладожского и Онежского – с использованием методов трехмерного математического моделирования [Голосов и др., 2020]. В работе дано обоснование выбора модели гидродинамики внутреннего моря – МГВМ [Ибраев, 2008] для использования в озерных условиях. Циркуляция вод в озере произвольной геометрии описывается трехмерными уравнениями термогидродинамики. Поверхность раздела воздух – вода свободная, воспроизводятся пространственная изменчивость топографии поверхности моря и изменчивость среднего уровня моря. Взаимодействие атмосферы и вод озера описывается через потоки импульса, тепла и влаги. Включается модель льда, описывающая термодинамические процессы (изменение температуры, замерзание, таяние) во льду и динамические процессы (движение, торошение и т. д.). При этом потоки свойств через границу атмосфера – вода заменяются на потоки через границы атмосфера – лед и лед – вода. В модели явным образом описываются потоки воды через боковые границы и поверхность раздела воздух – вода, а также ее свойства (соленость, теплосодержание). В системе уравнений используются приближения Буссинеска и гидростатики. Уравнения МГВМ, граничные, начальные условия, особенности параметризации подсеточных процессов подробно описаны в [Ибраев, 2008; Голосов и др., 2020].

При адаптации МГВМ к озерным условиям в нее были включены дополнительные программные модули для расчета теплообмена через границу

раздела вода – дно и расчета процессов первичного продуцирования в озерах с целью оценки реакции экосистем озер на возможные климатические изменения, уравнение состояния морской воды заменено на уравнение состояния для слабоминерализованной воды [Chen, Millero, 1986].

Параметры расчетных сеток для озерных условий были заданы значительно точнее, чем в моделях СПб ЭМИ РАН, и составили: 600×600 м по горизонтали и 30 горизонтов по вертикали для Ладожского оз. и 1800×900 м по горизонтали и 14 горизонтов по вертикали для Онежского. Расчеты выполнялись с шагом по времени 6 мин. для обоих озер на кластере КарНЦ РАН. В качестве исходной метеорологической информации для расчета современного среднеклиматического состояния ТГД процессов в озере использовались данные реанализа NCEP/NCAR [Kalnay et al., 1996]. В качестве сценария возможных климатических изменений был выбран MPI B2, разработанный в Институте Макса Планка с использованием модели глобальной атмосферной циркуляции ECHAM4/OPYC3 [Raisanen, 2004], как это было сделано и в работе [Rukhovets, Filatov, 2020]. Данный сценарий характеризуется следующими основными параметрами: 1) умеренный выброс парниковых газов в атмосферу; 2) предполагается, что основное потепление климата будет происходить в зимний период, что соответствует данным многолетних натурных наблюдений, выполненным за последние 40–50 лет; 3) общие тенденции выбросов, которые обеспечиваются сценарием B2, также близки к тем, которые наблюдались в течение последних 40 лет; 4) температура воздуха на планете в конце столетия может повыситься на величину до 5°C . В этом смысле сценарий MPI B2 можно рассматривать как сценарий сохранения текущей тенденции к потеплению [Nakicenovich, Swart, 2000; Watson, 2001]. Начальные условия для расчетов по МГВМ ставились для условий начала октября, поскольку, по многолетним данным, в этом месяце термическая структура озер гомогенна по пространству [Ладога, 2013]. В расчетах учитывалось поступление водных масс от трех основных притоков Ладожского оз.: рек Бурной (Вуоксы) (минерализация воды 46 мг/л , сток $650\text{ м}^3/\text{с}$), Волхов (220 мг/л и $640\text{ м}^3/\text{с}$) и Свири (40 мг/л и $650\text{ м}^3/\text{с}$), а также сток р. Невы в створе истока ($\approx 2500\text{ м}^3/\text{с}$).

Верификация МГВМ по данным наблюдений на Ладожском оз. выполнялась по положению фронта термобара в озере (рис. 12.3.1) [Зверев и др., 2016; Голосов и др., 2020], распространению вод основных притоков по акватории озера и их влиянию на формирование пространственного распределения минерализации озерных вод (рис. 12.3.2, 12.3.3) [Зверев и др., 2016; Голосов и др., 2020]. Как показали численные эксперименты, модель хорошо описывает главные особенности термогидродинамических процессов в озере, как то – циркуляцию вод в озере, положение и скорость продвижения фронта термобара.

На основе результатов верификации модели по данным ИНОЗ РАН [Ладога, 2013] сделано заключение о возможности использования МГВМ для решения лимнологических задач [Зверев и др., 2016]. С использованием МГВМ исследованы термический и ледовый режимы Ладожского и Онежского озер в условиях т. н. среднеклиматических атмосферных воздействий (нормы для 1960–1990 гг.) для широты Ладоги, а также и при «возможных

климатических изменениях на водосборе» в соответствии с климатическим сценарием MPI B2. Выполнены численные эксперименты для оценки распространения вод основных притоков и их влияния на термогидродинамику озера. В результате численных экспериментов получены количественные оценки отклика экосистем озер на возможные климатические изменения в части образования органического вещества и изменения трофического статуса озер [Голосов и др., 2020].

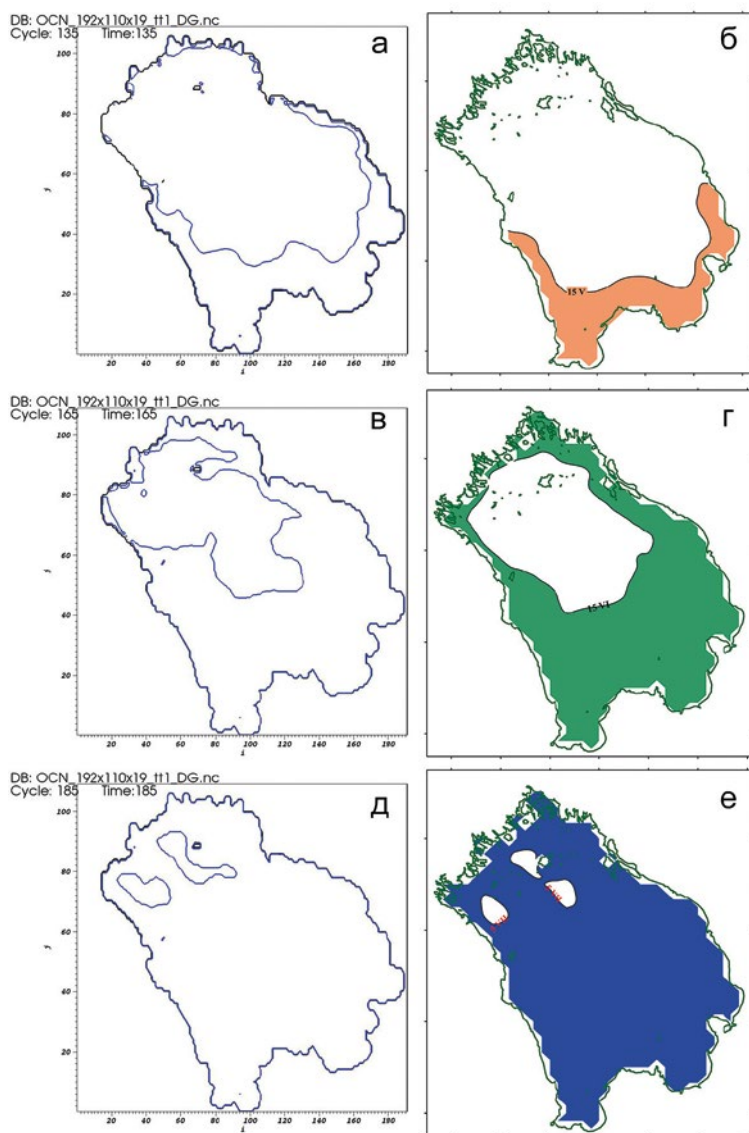


Рис. 12.3.1 – Положение термобара по расчетным (а, в, д) и натурным (б, г, е) данным на 15 мая (а, б), 15 июня (в, г) и 5 июля (д, е) [Зверев и др., 2016; Голосов и др., 2020; Науменко и др., 2013]

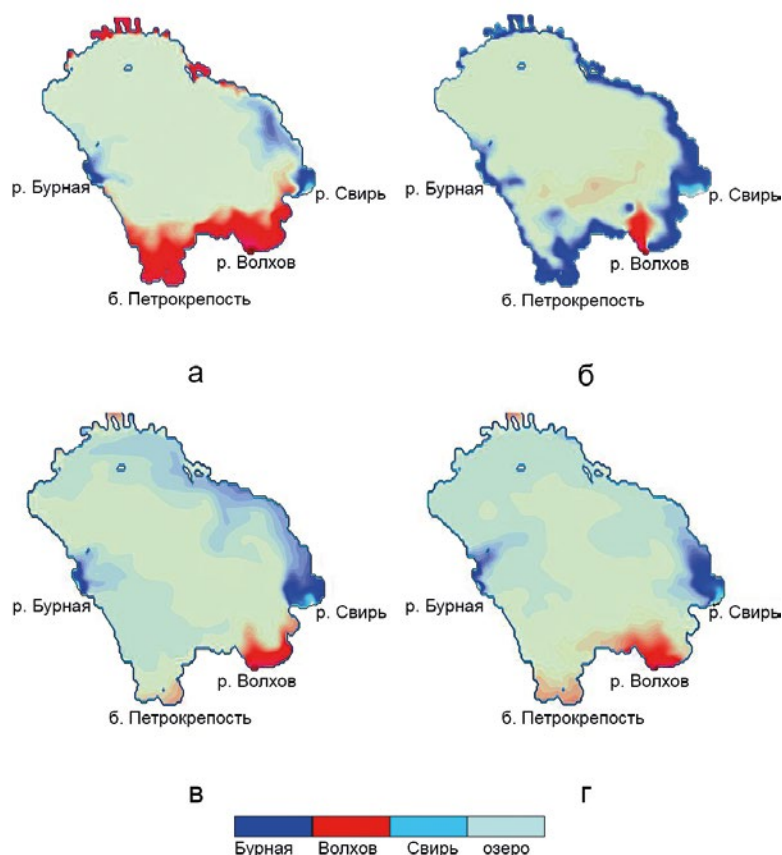


Рис. 12.3.2 – Распределение вод основных притоков по акватории Ладожского оз. в различные сезоны «среднеклиматического» года по результатам моделирования: а), б), в), г) – в зимний период, в конце ледостава, в летний и осенне-зимний периоды соответственно

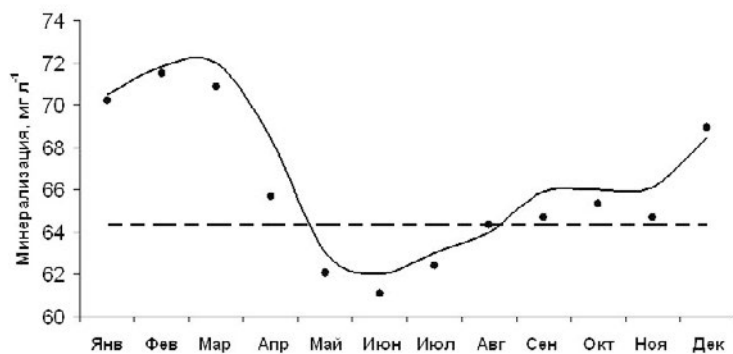


Рис. 12.3.3 – Сезонная среднеклиматическая изменчивость минерализации в бухте Петрокрепость: символы – данные многолетних натурных наблюдений [Ладога, 2013], линия – результаты моделирования

По результатам моделирования и натурным данным в формировании термогидродинамических процессов в Ладоге в октябре доминирует плотностная конвекция, при которой вследствие интенсивного вертикального перемешивания выравнивается температура в озере, при дальнейшем охлаждении вод в конце октября – начале ноября формируется осенняя термическая фронтальная зона – термобар. При принятых условиях численные эксперименты показали, что из-за меньшего теплосодержания озера по среднеклиматическому году термобар по модели формируется раньше и продвигается в сторону больших глубин быстрее, чем по известным натурным данным. В середине ноября одновременно с продвижением термобара в южных районах начинается формироваться устойчивый ледяной покров. Однако в случае «сценарного» атмосферного воздействия площадь покрытия льдом акватории озера и его толщина меньше по сравнению со среднеклиматическим, а в конце ноября положение термобара в обоих вариантах расчетов практически одинаковое. Основные различия наблюдаются в толщине льда и площади покрытия им озера. При этом необходимо отметить, что в случае «сценарного» атмосферного воздействия свободная ото льда поверхность озера охлаждается быстрее, по сравнению со среднеклиматическим вариантом. Дело в том, что по сценарию В2 температура воздуха к концу XXI века в приводном слое выше в этот период в среднем на 3–4 °С, что приводит к более интенсивному испарению с поверхности озера и, соответственно, к ее ускоренному охлаждению. Однако это не влияет на скорость нарастания льда. При более высокой температуре воздуха скорость нарастания льда в «сценарном» варианте ниже, а толщина его меньше, чем в случае среднеклиматического воздействия. Интенсивное испарение с поверхности воды по результатам численных экспериментов приводит к неожиданным результатам для января месяца. Так, при среднеклиматическом атмосферном воздействии к середине января значительная часть глубоководной акватории остается свободной ото льда, тогда как при потеплении климата озеро оказывается практически полностью покрытым очень тонким слоем льда. При расчетах по климатическому сценарию толщина льда будет меньше на величину порядка 25%, а в северо-западной части озера лед практически отсутствует в обоих вариантах расчетов, что соответствует многолетним наблюдениям. В середине марта различия в состоянии ледового покрова по принятым вариантам расчета становятся намного более значительными. В случае среднеклиматического атмосферного воздействия озеро остается полностью покрытым льдом, его толщина в северо-западном глубоководном районе составляет всего 10–15 см. В случае расчета при потеплении климата значительная часть северо-западной акватории озера в марте освобождается ото льда. Высокое пространственное разрешение модели позволило более корректно, чем ранее, рассчитать термические, ледовые условия в бухте Петрокрепость, Волховской и Свирской губах. К середине июня гидротермодинамические процессы в Ладожском оз., определяемые среднеклиматическим атмосферным воздействием, запаздывают в среднем на месяц по сравнению с тем, что отмечается при потеплении. Так, термобар только приближается к центральным районам озера с южной стороны, на востоке, севере и северо-западе фронтальная зона все еще находится в непосредственной близости от береговой линии. В случае

климатического сценария термобар в это время уже прекращает свое существование, и начинается интенсивный прогрев водной массы, к середине августа практически вся акватория озера прогреется до 20 °С и более. В августе и сентябре начинается быстрое охлаждение водной массы озера. При этом в случае расчетов по климатическому сценарию оно происходит намного быстрее по сравнению со среднеклиматическим годом.

Численные эксперименты для изучения термогидродинамических процессов в Ладожском оз. показали, что основное отличие при потеплении от среднеклиматического сценария начинается в первых числах ноября в южных районах озера и сказывается на скорости нарастания и таяния льда. При потеплении озеро способно полностью покрыться льдом, однако его малая толщина предопределяет ранние сроки таяния. Следует ожидать, что полное очищение озера ото льда, возможно, будет происходить на 2–3 недели раньше по сравнению со среднеклиматическим атмосферным воздействием. Раннее исчезновение ледяного покрова приведет к временному сдвигу в процессах, определяющих термический режим озера в весенне-летний период. Так, образование термобара начнется раньше на 2–3 недели, скорость его распространения по акватории озера будет выше. В результате весенне-летний термобар закончится в середине июня вместо среднеклиматической середины июля [Науменко и др., 2012]. Как следствие, летний прогрев основной водной массы начнется почти на месяц раньше, что не может не сказаться на ее температурном режиме. При потеплении практически вся акватория озера летом прогреется до 20 °С, чего не бывает при среднеклиматическом воздействии.

При таком развитии событий следует ожидать, что возможные климатические изменения способны привести к существенному изменению в ТГД процессах в озере и, как следствие, в функционировании водной экосистемы. Поэтому для оценки реакции экосистемы Ладожского оз. на возможные изменения климата МГВМ была дополнена специальным модулем для расчета первичной продукции фитопланктона в зависимости от приходящей солнечной радиации, температуры и прозрачности воды. Данный модуль в виде одномерной модели FLakeEco успешно применялся для разнотипных озер, расположенных в различных географических зонах [Golosov et al., 2012]. Ниже приведены некоторые результаты численных экспериментов. На левых (а) панелях рис. 12.3.4–12.3.6 представлены данные расчетов, полученные с использованием осредненных за период с 1949 по 2009 г. метеоданных реанализа NCEP/NCAR, правых (б) – по климатическому сценарию MPI B2. На рис. 12.3.4 проиллюстрировано начальное распределение первичной продукции (ПП) фитопланктона в озере, относящееся к 1 октября среднеклиматического года и к концу XXI века.

Наиболее продуктивными, как и следовало ожидать, являются южные мелководные районы. Здесь величины ПП колеблются в пределах от 50 до 70 гС/м²сут (рис. 12.3.4). Реакция экосистемы на возможные климатические изменения начинает проявляться уже в начале ноября, когда в южных районах образуется первый лед (рис. 12.3.5).

Значения ПП в «сценарном» варианте для ноября месяца колеблются от 5 до 10 мгС/м²сут. Этот же эффект наблюдается и в середине марта. Несмотря на то что в обоих случаях озеро практически полностью еще покры-

то льдом, значения ПП из-за различий в толщине льда в среднеклиматическом варианте расчетов близки к нулю, а в «сценарном» варианте достигают 20–25 $\text{мгС/м}^2\text{сут}$ (рис. 12.3.6). В этом случае можно говорить о том, что возможные климатические изменения способны вызывать раннее подледное развитие водорослей.

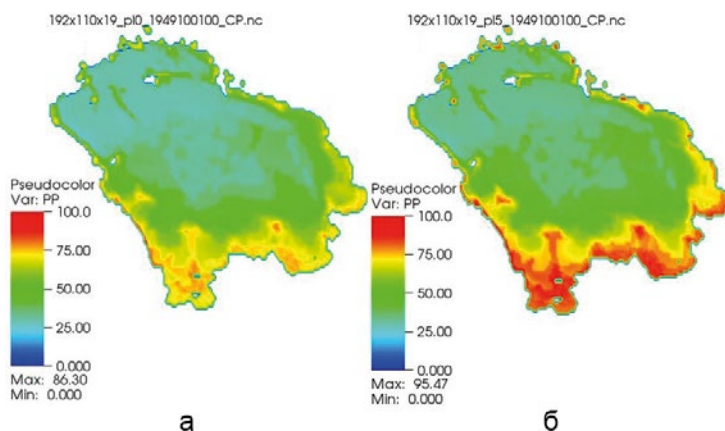


Рис. 12.3.4 – Начальное распределение ПП в Ладожском оз. в октябре: а) среднеклиматический год; б) климатический сценарий (потепление климата до 5°)

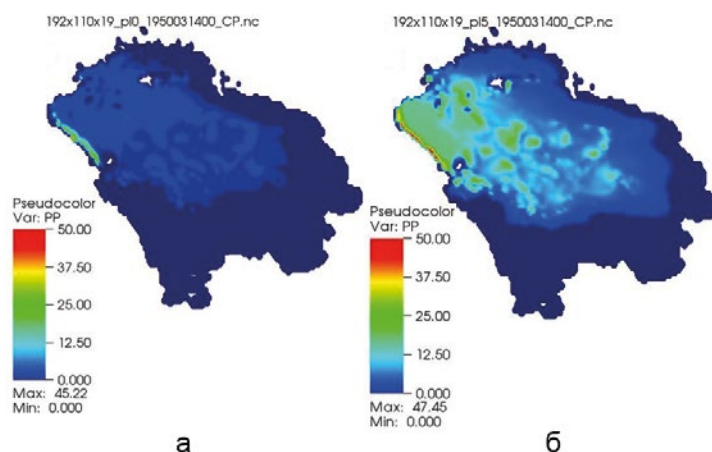


Рис. 12.3.5 – Эффект раннего подледного развития фитопланктона, вызванного возможными изменениями климата: а) среднеклиматический год; б) климатический сценарий

В июле, когда весенне-летний термобар заканчивается, продукционные процессы активизируются по всему озеру. В «среднеклиматическом» варианте расчетов значения ПП варьируют от 500 $\text{мгС/м}^2\text{сут}$ в бухте Петрокрепость до 150 $\text{мгС/м}^2\text{сут}$ в северо-западных районах, в «сценарном» варианте – от 700 до 200 $\text{мгС/м}^2\text{сут}$ соответственно (рис. 12.3.6).

По результатам моделирования реакции экосистем Ладожского и Онежского озер существенно различаются. В Онежском оз. во все сезоны абсолютные

значения ПП ниже по сравнению с Ладожским оз. Это объясняется тем, что температура воды в Онежском оз. в периоды открытой воды ниже, чем в Ладожском, что снижает интенсивность продукционных процессов. Кроме того, что фитопланктон Онежского оз. из-за особенностей формирования цветности воды находится в состоянии «радиационного голода». Это означает, что приходящая солнечная радиация поглощается в значительной степени частицами абиогенного происхождения в слое, равном одной прозрачности. Таким образом, солнечная радиация выступает в роли лимитирующего фактора.

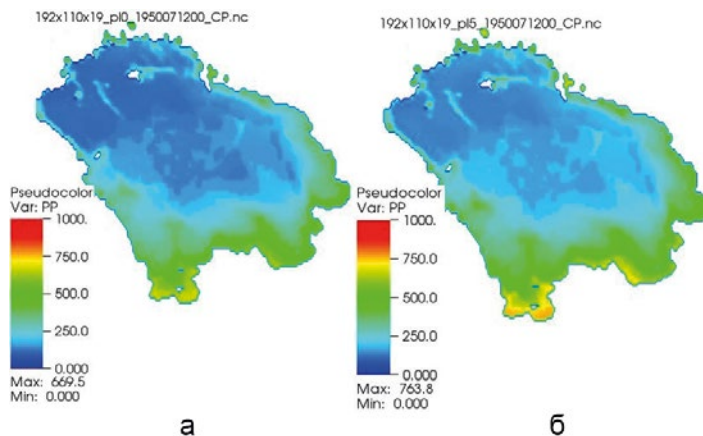


Рис. 12.3.6 – Распределение ПП по акватории Ладожского оз. в середине июля: а) среднелиматический год; б) климатический сценарий

Различные ледовые условия также определяет несходство реакции экосистем озер на возможные климатические изменения. В Онежском оз. толстый сплошной ледяной покров полностью исключает проникновение солнечной радиации в водную массу, исключая тем самым саму возможность фотосинтеза. Но, как показали последние экспериментальные исследования подо льдом Онежского оз., в марте в отсутствие снежного покрова отмечается активная фотосинтетическая деятельность [Wuest et al., 2019].

Результаты внедрения адаптированной для Ладожского оз. 3D-МГВМ свидетельствуют, что модель способна вполне адекватно воспроизводить термогидродинамические процессы в крупных озерах, а также может представлять собой перспективный инструмент для изучения озер. Использование математических моделей позволяет в какой-то мере восполнить отсутствие натурной информации в этот период и получить представление о продукционных процессах, протекающих в озере в течение значительной части года.

При определенных преимуществах воспроизведения ТГД процессов адаптированной МГВМ по сравнению с 3D-моделями, разработанными в СПб ЭМИ РАН [Астраханцев и др. 2003; Руховец и др., 2013], развитие экосистемных возможностей моделирования заключается в описании первичной продукции для сезонного и многолетнего масштабов. В ней не рассматривается влияние антропогенных факторов (в частности, биогенной нагрузки) и не описывается трансформация живого и мертвого органиче-

ского вещества (фитопланктона, зоопланктона, бактериопланктона, бентоса, детрита) и растворенных в воде биогенных элементов (углерода, азота, фосфора и кремния), как это сделано в комплексе моделей СПб ЭМИ РАН.

12.4 Диагноз состояния экосистемы Ладожского озера и прогноз изменений при возможном изменении климата на основе математического моделирования биогеохимических потоков вещества

В разработанных ранее моделях экосистемы Ладожского оз. не рассмотрены механизмы концентраций и биомасс компонентов экосистем. К недостаткам формулировки этих моделей можно отнести и то, что в них не учитывается динамика биогенных элементов в донных отложениях. Поэтому была поставлена задача создать модель для анализа биогеохимических потоков вещества, которыми и определяется динамика интегральных запасов биогенных элементов в отдельных частях и компонентах экосистемы, включая донные отложения. Ввиду слишком малого времени на создание трехмерной модели экосистемы авторы [Филатов и др., 2019; Исаев, Савчук, 2020] использовали стандартную модель (код), разработанный MIT и ответственную модель эвтрофикации Балтийского моря (SPBEM) [Savchuk, 2002; Рябченко и др., 2016; Владимирова и др., 2018].

На рис. 12.4.1 представлена схема взаимодействия переменных модели и потоков вещества по [Владимирова и др., 2018], которая использована для Ладожского оз. Модель описывает процессы переноса вещества между компонентами в результате химико-биологических взаимодействий, формирующих соответствующие потоки азота и фосфора в гомогенном объеме воды и прилегающих к нему донных отложений.

На схеме показаны процессы переноса вещества между компонентами в результате химико-биологических взаимодействий, формирующих соответствующие потоки азота и фосфора в гомогенном объеме воды и прилегающих к нему донных отложениях. В модели гетеротрофы питаются автотрофами и взвешенным органическим веществом. Часть извлеченной из воды пищи усваивается, а неусвоенная часть пополняет запасы детрита. Биомасса гетеротрофов уменьшается за счет естественной смертности и выделения в воду продуктов обмена веществ. Модель биогеохимических циклов была сопряжена с моделью гидротермодинамики MITgcm [MITgcm], разработанной в Массачусетском технологическом университете. Модульная система комплекса позволяет собрать необходимую конфигурацию для исследуемого объекта. Эта модель успешно использовалась для воспроизведения гидротермодинамики больших стратифицированных озер [Bennington et al., 2010]. Для условий Ладожского оз. задавалась нулевая соленость льда, коэффициенты горизонтального турбулентного обмена задавались константами. Горизонтальное разрешение модели было относительно низким – по горизонтали порядка 3,4 км, по вертикали задавалось 42 уровня, первые 30 метров через 3 метра, далее шаг по глубине составлял 5 метров. Поля атмосферного давления, температуры воздуха, компоненты скорости ветра, потоки коротковолновой и длинноволновой приходящей ра-

диапии, осадки и влажность воздуха для современного периода (1996–2015 гг.) задавались из архива ERA-Interim [ECMWF]. Для задания атмосферного воздействия в будущем климате (2018–2040 гг.) использовались данные, полученные на основе расчетов по региональной климатической модели RCAO Центра Россби [Doscher, 2002], а на боковых границах для модели RCAO были использованы результаты восстановления атмосферных характеристик на основе двух глобальных моделей климата: ECHAM5/MPI-OM [Jungclaus, 2006]. Воспроизведение состояния озера в будущем климате основывалось на сценарии эмиссии парниковых газов A1B [Solomon, 2007]. В качестве граничных условий в современный период задавались данные о речном стоке и нагрузках азотом и фосфором [Ладога, 2013]. При расчетах в будущем климате речной сток и биогенные нагрузки задавались как средние за последние 5 лет современного периода. В качестве начальных условий задавались трехмерные поля температуры, минеральных и органических форм азота, фосфора и кремния, которые были получены в результате разгонного расчета на модели в течение 12 лет, что соответствует условному периоду водообмена Ладожского оз. [Филатов, 1991], с повторяющимися полями атмосферного воздействия и при биогенных нагрузках, которые соответствовали условиям 1996 г. При потеплении климата и значительной межгодовой изменчивости суммарного речного притока и стока из озер за период 1955–2016 гг. рост годовых сумм осадков компенсируется ростом суммарного испарения. Процесс трансформации гидрологического и химико-биологического режимов Ладожского оз. представляет собой последовательность этапов, в течение которых менялись вклад внешних факторов, а также роль внутриводоемных процессов [Филатов и др., 2020].



Рис. 12.4.1 – Схема взаимодействия переменных модели и потоков вещества в Ладожском оз. [Владимирова и др., 2018; Филатов и др., 2019]

Расчеты по модели современного состояния экосистемы озера выполнялись для периода 1996–2015 гг. Кроме вышесказанного, выбор периода связан с доступностью данных по нагрузкам биогенными элементами [Ладога, 2013]. Сценарные изменения климата рассчитывались для периода 2015–2040 гг. Термогидродинамические условия в озере описывались несколько слабее, чем в модели СПб ЭМИ РАН и в МГВМ из-за относительно слабого горизонтального разрешения модели, но при этом средний сезонный ход температуры воды озера был достаточно корректно воспроизведен. А именно: воспроизведено время наступления весенней и осенней изотермии, период максимального прогрева, толщина перемешанного слоя (эпилимниона). Но ввиду малого сеточного разрешения не удалось смоделировать склоновую конвекцию, которой объясняется проникновение холодных вод на глубины 100–120 м.

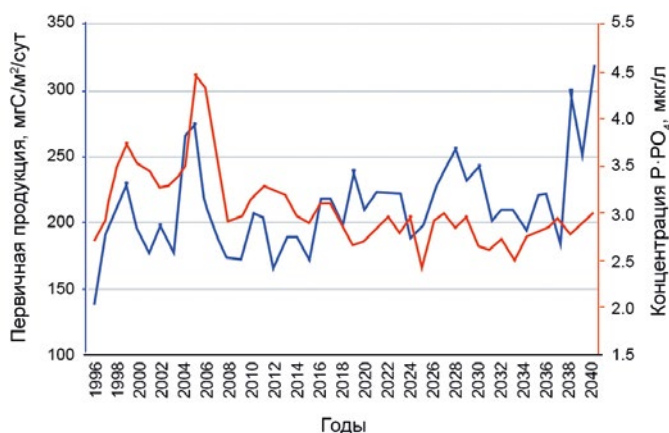


Рис. 12.4.2 – Межгодовая изменчивость средней за вегетативный период первичной продукции (а) и концентрации фосфатов (б) по результатам моделирования [Исаев, Савчук, 2020]

Настройка экосистемной части модели выполнялась по лимитирующему для Ладоги элементу – фосфору, но в принципе модель дает возможность выполнять расчеты и для азота. В модели удовлетворительно воспроизводится межгодовая динамика содержания фосфора в водной толще озера. Модельные значения первичной продукции, осредненные за летний период с 1996 по 2003 г., составляли $350 \text{ мгС/м}^2\text{сут}$ при стандартном отклонении $120 \text{ мгС/м}^2\text{сут}$. Сравнение с опубликованными данными, отражающими состояние Ладожского оз. в современный период [Ипатова, 2017], позволяет сделать вывод, что разработанная модель может быть использована для исследования экосистемных процессов и биогеохимических круговоротов, протекающих в экосистеме Ладожского оз. в условиях изменения климата и антропогенного воздействия. Но на первом этапе были выполнены расчеты изменения экосистемы озера только при потеплении климата с постоянным антропогенным воздействием. Численные эксперименты для среднегодовых значений температуры, осредненных за периоды 1996–2015 и 2021–2040 гг., показывают, что в будущем будет наблюдаться увеличение температуры воды в целом по озеру на $0,4^\circ\text{C}$, а в поверхностном слое на $0,7^\circ\text{C}$. Увели-

чение средней температуры воды в вегетативный период (апрель – октябрь) составит в целом для озера также $0,4^{\circ}\text{C}$, а для поверхностного слоя (эпилимниона) $0,8^{\circ}\text{C}$. На рис. 12.4.2 показана межгодовая изменчивость первичной продукции для концентрации фосфатов за период с 1996 по 2040 г. Из рисунка следует, что с 1996 по 2015 г. не наблюдается тренд, несмотря на значительную межгодовую изменчивость. Этот результат хорошо согласуется с оценкой современного состояния фитопланктона Ладожского оз. [Ладога, 2013]. Эксперименты по воспроизведению экосистемы Ладоги в будущем климате проводились при постоянной внешней нагрузке, а именно при неизменности концентрации фосфатов в озере [Филатов и др. 2019].

Рассматривая биогеохимические потоки, влияющие на первичную продукцию, можно заметить, что в будущем может наблюдаться возрастание потоков, отвечающих за увеличение поступления минеральной формы фосфора в систему. Минерализация органического вещества и экскреция гетеротрофов увеличиваются на 9 и 45% соответственно. Таким образом, можно сказать, что увеличение первичной продукции является следствием усиления регенерации минерального фосфора как реакция системы на повышение температуры воды в фотическом слое в вегетационный период. Наименьшие изменения в будущем претерпевают потоки седиментации и выноса фосфора со стоком р. Невы. Увеличение потока выхода фосфора из донных отложений также связано с увеличением температуры воды.

12.5 Применение математического аппарата клеточных автоматов при моделировании экосистемы Ладожского озера

Построению и исследованию имитационных моделей экологической системы крупных озер и, в частности, Ладожского оз. посвящена обширная литература [Астраханцев и др., 2003; Rukhovets, Filatov, 2010; Меншуткин и др., 2013]. Все варианты этих моделей представляют собой детерминированные системы, созданные на основе законов сохранения вещества и энергии. Подобная парадигма в гидродинамической и термической части модели основывается на численном решении уравнений Навье – Стокса, а в биологической – на уравнениях продукционной гидробиологии [Алимов, 2000]. Подобный подход оказался результативным при изучении антропогенного эвтрофирования экосистемы [Ладога, 2013]. Однако при переходе к проблеме комплексного использования природных ресурсов озер и водохранилищ, включающей не только сохранение или восстановление качества воды, но и использование для водного транспорта, туризма, рыбного хозяйства, электроэнергетики, такой подход оказался недостаточным. Дело не только в том, что потоки вещества, которыми оперирует рыбохозяйственная наука и практика, находятся в пределах ошибки определения первичной продукции водоема, но и в «ущербности» самого детерминированного подхода к описанию процессов, происходящих в экологической системе водоема. Создание моделей, основанных на решении систем нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, – достаточно сложная задача [Меншуткин и др., 2013], поэтому в качестве альтернативы предлагаются новые подходы. Среди них – методы нечетких множеств, искусственного интеллекта, логико-линг-

вистические и когнитивные модели [Меншуткин, 2010]. Они используются, прежде всего, в тех случаях, когда уровень знаний о моделируемых процессах или явлениях не позволяет применять формальный аппарат или когда отношения между объектами в модели не имеют количественной оценки и регулируются только причинно-следственными связями [Меншуткин, 2010].

Изложенные выше соображения привели к попытке применения для описания процессов, происходящих в водных экологических системах, математического аппарата, существенно отличающегося от традиционного использования дифференциальных уравнений, а именно стохастических клеточных автоматов [Тиффоли, Морголис, 1991]. Идея клеточных автоматов сформулирована в конце 40-х гг. XX века Джоном фон Нейманом и Конрадом Цусе [Афанасьев, 2014]. Интерпретации гидробиологических и ихтиологических явлений с использованием математического аппарата дискретной математики представляются вполне естественными ввиду фундаментальной дискретности самого понятия жизни [Ляпунов, 1968]. Для термогидродинамики и экосистем озер эффективным может быть использование моделей клеточно-автоматных (КА – cellular automata), позволяющих моделировать сложные нелинейные процессы, включая и процессы самоорганизации, используя сравнительно простые правила [Wolfram, 2002]. По существу, это означает переход от традиционного метода описания экологической системы с помощью системы дифференциальных уравнений к использованию представлений дискретной математики. Метод нашел практическое применение при моделировании наземных сообществ, нейронных сетей, передаче энергии в пограничном слое движущегося газа или жидкости, а также был использован для моделирования биоты в озерах Байкал и Онежском [Афанасьев, 2014; Меншуткин, Филатов, 2016].

Для работы клеточного автомата требуется задание начального состояния всех ячеек и правил перехода ячеек из одного состояния в другое. На каждой итерации с помощью правил перехода и состояния соседних ячеек определяется новое состояние каждой ячейки. В случае экологической системы пространство разбивается на множество дискретных объемов воды, характеризующихся температурой, плотностью, освещенностью, концентрациями растворенного в воде кислорода, биогенных элементов в виде неорганических соединений фосфора и азота, а также биомасс фито- бактерио- и зоопланктонных организмов. Основное свойство клеточных автоматов заключается в том, что каждый такой автомат может изменять свое состояние не только в зависимости от своего предыдущего состояния и внешних воздействий, но и в зависимости от состояний соседних автоматов. Подробно суть этого метода изложена в работах [Меншуткин, 2010; Меншуткин, Филатов, 2016; 2017]. При этом из-за сложности непосредственного измерения ряда параметров, например, течений, пульсаций вертикальной составляющей скорости нельзя провести прямую идентификацию моделей, что заставляет пользоваться косвенными методами. В указанных выше работах подробно описаны модели перемешивания, трансформации вод, течений с использованием КО для Ладожского оз., но не были рассмотрены модели сообщества рыб.

Существующие модели сообщества рыб Ладожского оз. разрабатывались изолированно от моделей экологической системы, как самостоятельные

системы [Астраханцев и др., 2003; Menshiutkin, 2010]. При этом влияние окружающей среды учитывалось в качестве внешних воздействий в виде кормовой базы и температурных условий. Задача оптимального управления природными ресурсами экосистемы Ладожского оз. для своего решения требует создание единой модели объекта управления. Попытка присоединения модели сообщества рыб к уже разработанной модели [Астраханцев и др., 2003] оказалась неудачной. Это связано с тем, что потоки вещества и энергии, на основе которых построена модель, разнятся по вкладу для различных элементов системы (например, фитопланктон и хищные рыбы) более чем на три порядка. Ошибка в определении первичной продукции превышает по своим размерам продукции популяций основных промысловых рыб Ладожского оз. Такое положение при введении в модель «шумящих параметров» делает ее неопределенной в области прогноза выловов рыбы, а эта величина является значимым компонентом при оценке экономического эффекта эксплуатации всей экологической системы. Это обстоятельство заставило при составлении общей модели экосистемы отойти от уже ставшего традиционным метода моделирования с использованием систем дифференциальных уравнений с соблюдением законов сохранения вещества и энергии. Для построения модели экологической системы Ладожского оз. с имитацией сообщества рыб используется математический аппарат клеточных автоматов [Меншуткин, 2010].

Гидробиологическая часть модели, блок-схема которой изображена на рис. 12.5.1, состоит из описания состояний температуры воды (ТЕМ), содержания в воде неорганического фосфора (PHOS) и растворенных токсических веществ (ТОХ). Биомассы фитопланктона (PHYTO), зоопланктона (ZOO) и бентоса (BENT) формируют живую компоненту экосистемы, а масса детрита (DET) – ее неживую часть.

Каждая переменная является дискретной величиной и может принимать одно из 5 значений. Эти значения можно характеризовать, как очень мало (1), мало (2), средне (3), много (4) и очень много (5). Названные величины характеризуют состояние экосистемы озера в 30 областях или ячейках (рис. 12.5.2), распределенных по акватории озера. Каждая такая ячейка соответствует клеточному автомату. Сообщество рыб описывается переменными, которые характеризуются видовой принадлежностью рыб, ее возрастом и локализацией по акватории озера. Как и для гидробиологических переменных, состояние каждой переменной оценивается по пятибалльной шкале. Популяция корюшки состоит из трех возрастных групп (KOR1, KOR2, KOR3) и связана трофическими отношениями с зоопланктоном (ZOO) в качестве кормовой базы и судаком (SUD) в качестве хищника.

Популяция рипуса включает в себя три возрастные группы (RIP1, RIP2, RIP3), причем рипус, как и корюшка, является планктофагом. Сиги (SIG1 – SIG5), плотва (PLO1 – PLO5) и лещ (LES1 – LES10) питаются за счет бентосных организмов. Судак (SUD1 – SUD7), окунь (OKU1 – ORU5) и щука (SCH1 – SCH7) являются хищниками. При этом учитывается, что молодь окуня питается зоопланктоном, а рыбы среднего возраста являются бентофагами. Далее (рис. 13.5.3) представлена блок-схема программы для реализации модели сообщества рыб Ладожского оз. [Меншуткин, 2010].

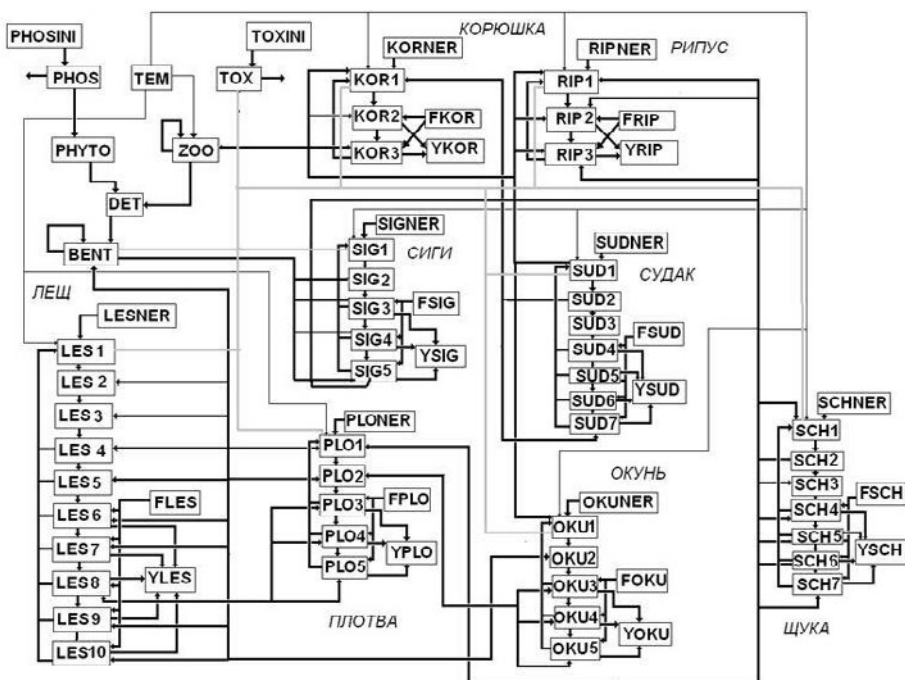


Рис. 12.5.1 – Блок-схема связей в модели сообщества рыб Ладожского оз.: FHOSIN – фосфорная нагрузка, PHOS – содержания неорганического фосфора в воде, TEM – температуры воды, TOX – поступление токсических веществ, PHYTO – продукция фитопланктона, ZOO – биомасса зоопланктона, BENT – бентос, DET – масса детрита, KORNER – условия нереста корюшки, FKOR – интенсивность промысла, YKOR – вылов корюшки, KOR1... KOR3 – численность возрастных групп корюшки. Элементы подмоделей остальных рыб отличается только префиксами: RIP – рипус, SIG – сиг, SUD – судак, LES – лещ, PLO – плотва, OKU – окунь, SCH – щука

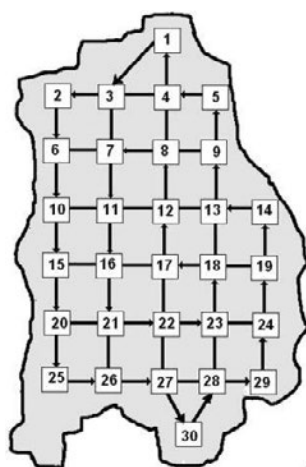


Рис. 12.5.2 – Схема расположения клеточных автоматов по акватории Ладожского оз. Стрелками обозначены перемещения воды между автоматами по одному из возможных вариантов

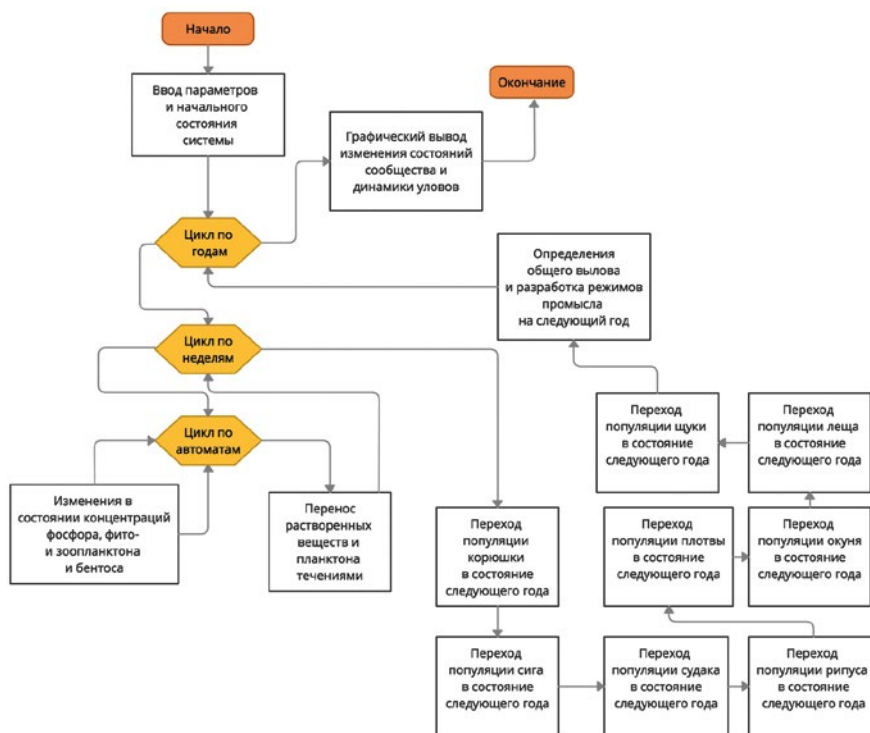


Рис. 12.5.3 – Блок-схема программы для реализации модели сообщества рыб Ладожского оз.

Биомасса фитопланктона зависит от концентрации неорганического фосфора и температуры воды. Биомасса зоопланктона в какой-то момент времени зависит от биомассы в предыдущий момент времени и от температуры воды. На величину биомассы зоопланктона оказывает влияние обилие фитопланктона. Количество мертвого органического вещества (детрита) определяется биомассами фито- и зоопланктона. Биомасса бентоса определяется прошлым состоянием этой величины и наличием корма в виде детрита. На биомассу бентоса существенно влияет концентрация растворенных в воде токсических веществ. Недельный цикл завершается имитацией переноса течениями планктона и растворенных веществ по акватории озера. Перемещения воды из одной ячейки в соседнюю выбирается на основании исследования непрерывной гидродинамической модели [Астраханцев и др., 2003] и натурных наблюдений [Ладожское..., 2002]. Схемы течений разработаны в трех вариантах с учетом закона сохранения. Поскольку концентрации и биомассы планктонных организмов представлены в модели в виде дискретных величин, то в том случае, при котором значение переносимой субстанции в соседних ячейках одинаково, никаких изменений не происходит. Если значения в соседних ячейках отличаются на две градации (случай достаточно редкий), то концентрации в ячейках уравниваются. Если градации отличаются только на единицу, то равновероятными считаются два исхода. В первом ячейки меняются своими значениями, а во втором все остается без изменений. Способ искусственный, но он гарантирует принцип сохранения вещества в системе.

Пополнение популяции корюшки определяется состоянием старшей возрастной группы этой популяции в прошлый год и условиями нереста. Биомасса годовиков корюшки зависит от биомассы сеголеток в прошлом году и обилием кормовой базы с учетом конкурентных отношений с другими планктофагами сообщества (рипус, молодь судака и окуня). На популяцию корюшки негативное влияние оказывает давление хищников, в первую очередь судака. Интенсивный промысел корюшки существенно снижает численность нерестового стада этой популяции. Вылов корюшки определяется состоянием старших возрастных групп этой популяции и усилиями промысла. Судак является основным хищником в центральной части Ладожского оз. [Кудерский, 2009]. Его воспроизводство определяется не только размерами нерестового стада, но и факторами, влияющими на выживание икры и молоди рыб этой популяции. Молодь судака не является хищниками, а питается зоопланктоном. Это учитывается так же, как при питании других планктофагов сообщества. Начиная с возраста 3+, судак переходит на хищное питание, ориентируясь, в основном, на сегов и корюшку. Интенсивный промысел судака существенно снижает численность нерестового стада этой популяции. Формирование возрастной группы 0+ в популяции сига происходит исходя из численности нерестового стада этой популяции и условий на нерестилищах. Напряженность трофических отношений между бентосом и рыбами-бентофагами определяется соотношением пищевых потребностей бентофагов (сиг, лещ, плотва и частично окунь) к наличной биомассе бентоса. Увеличение ихтиомассы сегов при переходе их в следующую возрастную группу зависит от исходной ихтиомассы. Взаимодействие популяции сегов с промыслом имитируется в модели так же, как и других популяций сообщества. Популяция рипуса условно рассматривается в настоящей модели совместно с популяцией ряпушки, что связано с тем, что в промысловых отчетах эти виды часто не различаются. Учитывается, что рипус является планктофагом. Воздействие щуки на популяцию рипуса в качестве хищника определяется при помощи матрицы. Пополнение популяции плотвы определяется, как и случае других популяций сообщества, величиной нерестового стада. Как и для других бентофагов, питание плотвы зависит от уже определенной ранее напряженности трофических отношений.

Взаимодействие с промыслом у популяции плотвы описывается по аналогии с другими членами сообщества рыб. Популяция окуня характерна тем, что рыбы, входящие в нее, в зависимости от возраста могут последовательно быть планктофагами, бентофагами и хищникам. Вылов окуня ориентируется на характеристики старшей возрастной группы этой популяции. Популяция щуки представляет собой в сообществе рыб Ладожского оз. такого же хищника, как судак, только в отличие от судака, который базируется в центральной части озера, щука, как и окунь, избирает своим местообитанием прибрежные районы. Поэтому конкурентные отношения на почве хищничества у щуки возникают только с окунем.

При описании воздействия популяции щуки на популяцию рипуса предполагается, что при этом сокращается не только ихтиомасса рипуса, но и увеличивается темп роста щук. Состояние нерестового стада леща оценивается по ихтиомассе лещей возраста 4+, а при определении пополнения

учитываются условия выживания икры и молоди. Поскольку лещи являются бентофагами, то используются для оценки влияния состояния кормовой базы на рост ихтиомассы рыб всех возрастных групп этой популяции. Напряженность пищевых отношений при питании рыб бентосом уже определялась при моделировании динамики популяции плотвы. Моделирование промыслового воздействия на популяцию леща осуществляется по той же схеме, что и в отношении других популяций сообщества.

Распределение концентрации растворенного в воде неорганического фосфора (рис. 12.5.4) формируется под влиянием поступающих в озеро биогенных элементов, которые содержатся в стоке рек, впадающих в озеро, а также в промышленных и бытовых сбросах. Точки поступления (индексы автоматов) и интенсивность поступления биогенных элементов может задаваться через интерфейс модели. На рис. 12.5.4 показан случай, при котором учитывается сток рр. Волхов, Свирь, Бурная при разной концентрации фосфора в поверхностном слое.

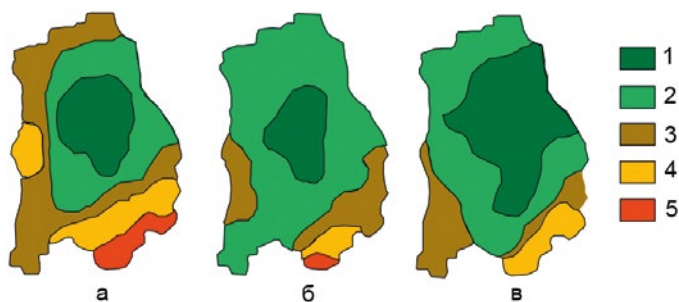


Рис. 12.5.4 – Распределение в пространстве концентраций фосфора в поверхностном слое воды (1 <2 мкг/л, 2-2.5 мкг/л, 3-2.10 мкг/л, 4-10-20 мкг/л 5 >40 мкг/л) и изменение концентрации во времени: а) 1 год, б) с 20 лет, в) 40 лет

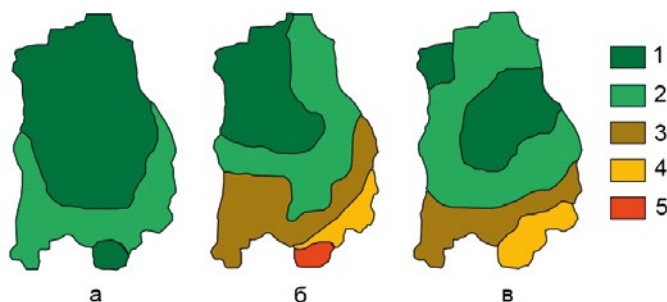


Рис. 12.5.5 – Распределение биомассы фитопланктона и изменение концентрации во времени: а) 1 год, б) с 20 лет, в) 40 лет

Распределение фитопланктона по акватории озера (рис. 12.5.5) является результатом оценок по данным, полученным по фосфору и температуре воды. Влияние освещенности на интенсивность фотосинтеза косвенно учитывается изменением температуры. На рис. 12.5.5 представлен типичный пример развития фитопланктона во времени.

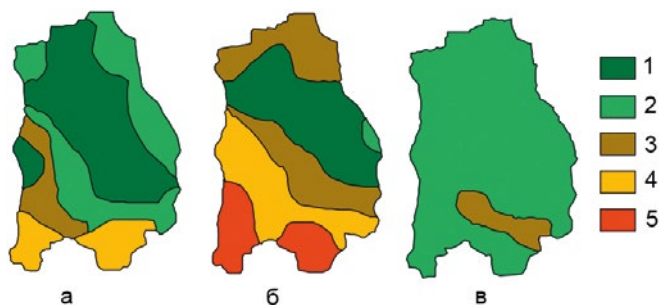


Рис. 12.5.6 – Распределение биомассы зоопланктона и изменение концентрации во времени: а) 1 год, б) с 20 лет, в) 40 лет

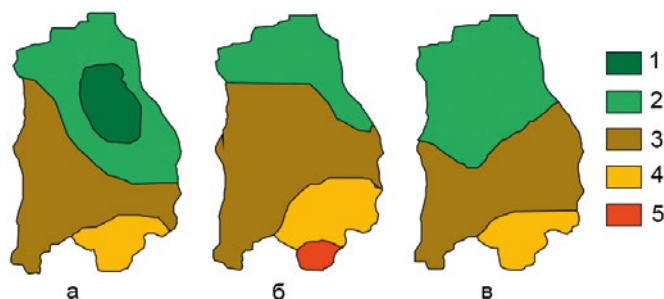


Рис. 12.5.7 – Распределение биомассы бентоса и изменение концентрации во времени: а) 1 год, б) с 20 лет, в) 40 лет

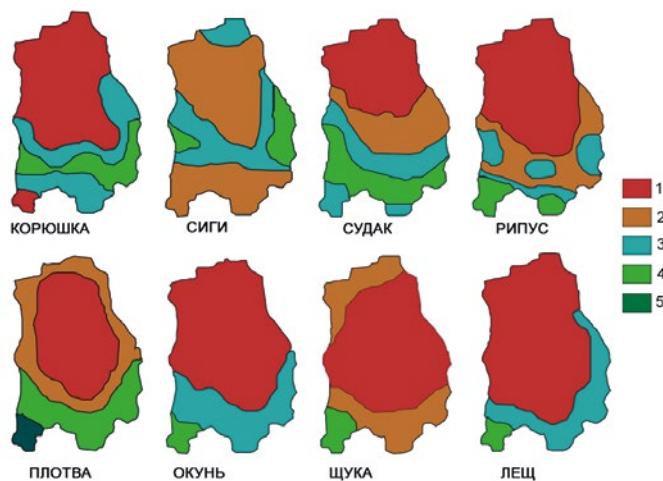


Рис. 12.5.8 – Распределение ихтиомассы рыб по акватории Ладожского оз.

Формирование пространственного распределения биомассы зоопланктона определяется по величинам биомассы фитопланктона и температуре воды при помощи специальной матрицы. Эффект воздействия на биомассу зоопланктона рыб-планктофагов в модели не учитывается. Не принимается во внимание также наличие хищного зоопланктона. Это не дефекты модели, а результат

Но его оказалось невозможным в дальнейшем использовать из-за ухода из жизни ряда разработчиков, директора СПб ЭМИ РАН, д. ф-м. н. Л. А. Руховца, и проф., д. ф-м. н. Г. П. Астраханцева.

К настоящему моменту разработана трехмерная модель Ладоги, ориентированная на решение задач, связанных с моделированием термогидродинамики и экосистемы [Голосов и др., 2020; Зверев и др., 2016] и основанная на модели МГВМ для Каспия [Ибраев, 2008]. При адаптации модели к озерным условиям в нее были включены дополнительные модули для расчета теплообмена через границу раздела вода – дно и расчета процессов первичного продуцирования в озерах с целью оценки реакции экосистем на возможные климатические изменения, уравнение состояния морской воды заменено на уравнение состояния для слабоминерализованной воды. Выполненные расчеты позволили оценить возможные изменения ТГД Ладожского оз. и его экосистемы в результате возможных климатических изменений.

Разработана 3D-модель экосистемы Ладожского оз. [Исаев, Савчук, 2020], которая позволяет воспроизводить особенности концентраций и биомасс компонентов экосистемы в виде биогеохимического круговорота вещества, осуществляемого процессами транспорта и трансформации. В модели учитывается динамика биогенных элементов в донных отложениях, служащих «памятью» эволюции озерной экосистемы и важнейшим звеном, замыкающим биогеохимический круговорот путем реминерализации биогенных веществ. Модель описывает процессы переноса вещества между компонентами в результате химико-биологических взаимодействий, формирующих соответствующие потоки азота и фосфора в гомогенном объеме воды и прилегающих к нему донных отложениях. Одним из преимуществ созданной модели является возможность анализировать не только состояние системы, но и биогеохимические потоки между различными формами азота и фосфора.

Показано, что новые 3D-модели экосистемы озера требуют дальнейшего совершенствования, калибровки и верификации по данным новых натуральных экспериментов. Разработанные модели или их блоки могут представлять интерес для решения проблем рационального использования и охраны крупнейших водоемов Евразии, имеющих стратегическое значение для развития экономики страны. Требуется дальнейшее развитие экспериментальных натуральных наблюдений и мониторинга для понимания происходящих изменений в экосистемах, а также совершенствование представленных в настоящем разделе математических моделей.

Задача оптимального управления природными ресурсами экосистемы Ладожского оз. [Меншуткин и др., 2013] для своего решения требует создания единой модели объекта управления. В настоящем разделе показана возможность создания модели широкого спектра использования для экосистемы Ладожского оз., описывающей в том числе и динамику рыбных популяций, что оказалось возможным при применении математического аппарата клеточных автоматов. В экологических моделях применение этого аппарата позволяет подойти к решению задачи оптимального выбора оптимальных условий рыболовства и рыбоводства при существенной размытости исходных данных.

Глава 13. Основные современные проблемы Ладоги и методы их решения

Несмотря на стабилизацию экологической обстановки на Ладоге в целом, существует ряд зон экологического риска, расположенных в основном в прибрежной мелководной зоне, требующих постоянного контроля. В литературе концепция «экологического риска» представлена как оценка вероятности возникновения обратимых или необратимых изменений в структуре и функции экосистем в ответ на антропогенные воздействия. На начальных этапах она включает процесс идентификации опасности, который можно считать качественным предсказанием воздействия стрессоров. Количественная оценка опасности включает рассмотрение схемы максимально возможного потока загрязнителей и установление границ их воздействия [Башкин, 2007]. Реализация возможных неблагоприятных сценариев развития кризисных экологических ситуаций в этих зонах может негативно сказаться на состоянии всего озера. Кроме того, на водосборе существует большое количество объектов накопленного экологического риска, требующих не только контроля, но и принятия мер по их ликвидации.

13.1 Зоны накопленного риска, сформированные на водосборе Ладожского озера в результате нерациональной сельскохозяйственной деятельности

Как было отмечено выше, особенностью сельскохозяйственного производства рассматриваемой территории является его интенсивная форма ведения и наличие крупных животноводческих комплексов и птицефабрик, что существенно повышает риск загрязнений водных объектов биогенными элементами. Зонами повышенного риска являются водосбор Ладожского оз. на территории Ленинградской обл. (южная часть по отношению к озеру), а также крайняя северная и южная части водосбора оз. Ильмень. Высокие риски загрязнения возникают в зонах расположения крупных животноводческих комплексов. На рис. 13.1.1 показаны территории сосредоточения крупных животноводческих объектов не только на водосборе Ладоги, но и на соседних территориях.

На рассматриваемом водосборе имеются территории, которые можно считать зонами накопленного риска в результате многолетнего нерационального ведения животноводства и птицеводства. Одной из основных таких зон является территория между двумя крупнейшими в России птицефабриками Ленинградской обл. – Синявинской и Северной, расположенными в Кировском районе. Сельскохозяйственные угодья данных птицефабрик находятся в непосредственной близости (4,5–5 км) к берегу Ладожского оз. (рис. 13.1.2).

Ежесуточное образование куриного помета на данных птицефабриках превышает 1000 т/сут (N – более 10 т/сут, P – более 21 т/сут). На протяжении нескольких десятков лет площадь с превышением предельно допустимого внесения биогенных элементов достигает 20 км². Данное обстоя-

ятельство создает большие риски постоянного поступления биогенных элементов в ближайшие водные объекты и Ладожское оз. Рекультивация представленной территории, а также внедрение наилучших доступных технологий (НДТ) на птицефабриках Синявинская и Северная, а также других птицефабриках Северо-Западного региона РФ является приоритетной задачей для снижения биогенной нагрузки на Ладожское оз.

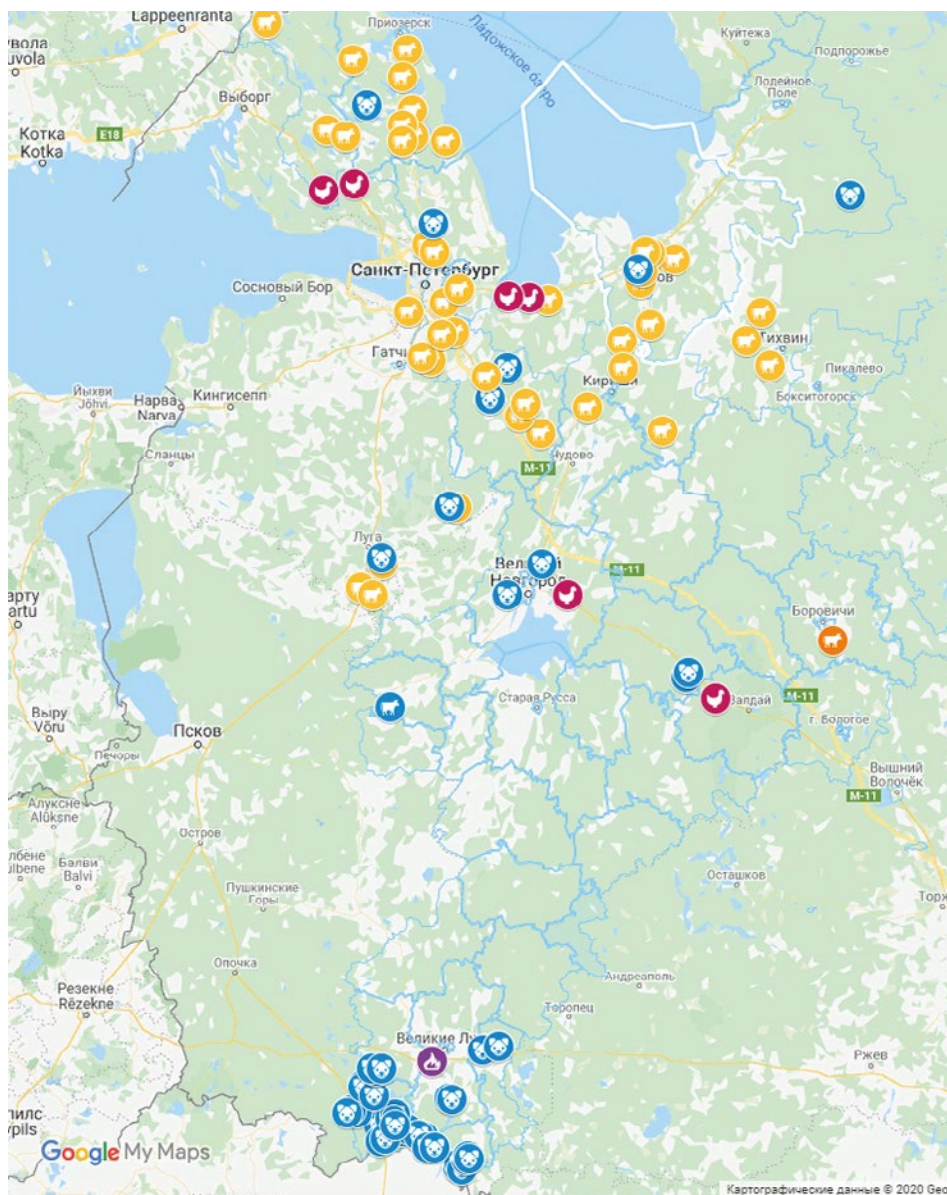


Рис. 13.1.1 – Расположение крупных животноводческих (крупный рогатый скот, свиньи) и птицеводческих объектов в пределах водосбора Ладожского оз. и в непосредственной близости от него



Рис. 13.1.2 – Схема расположения сельскохозяйственных угодий, на которые вносятся экстраемальные дозы органических удобрений с птицефабрики Синявинская и Северная

Отдельный акцент стоит сделать на двух свинокомплексах Тосненского района Ленинградской обл. вблизи населенных пунктов Нурма и Тарасово. Это связано с тем, что в радиусе 10–15 км отсутствует достаточное количество земельных площадей для внесения образующегося жидкого навоза. Свинокомплексы вынуждены сотрудничать с другими предприятиями и осуществлять транспортировку более чем на 50 км, включая и водосбор Ладожского оз., что труднореализуемо и требует соответствующего технического оснащения.

В северной и южной частях водосбора оз. Ильмень риск биогенного загрязнения также связан с расположением крупных свиноводческих комплексов и птицефабрики. В северной – свинокомплексы вблизи населенных пунктов Старая Мельница и Чечулино, и птицефабрика рядом с населенным пунктом Божонка. В южной части водосбора расположены сельскохозяйственные угодья нескольких свиноводческих ферм ООО «Великолукский свиноводческий комплекс» (рис. 13.1.3). Здесь риск прежде всего связан с большими объемами образования жидкого свиного навоза 80–150 тыс. тонн в год на каждом свинокомплексе и недостатком обрабатываемых земельных площадей для внесения органических удобрений. Уровень внедрения НДТ на перечисленных фермах крайне низок.

Представленная информация свидетельствует о том, что в стратегии предотвращения деградации и последующей оптимизации природной среды Ладожского оз. и его водосборного бассейна важную роль должны играть методы снижения рассредоточенной (диффузной) нагрузки на водные объекты, прежде всего от сельскохозяйственного производства. В настоящее

на современных достижениях науки и техники, обладающих наилучшим сочетанием показателей достижения целей охраны окружающей среды и экономической эффективности, при условии технической возможности их применения. Сформулированы критерии внедрения НДТ в следующем виде:

- наименьший уровень негативного воздействия на окружающую среду в расчете на единицу времени или объем производимой продукции (товара);
- экономическая эффективность ее внедрения и эксплуатации;
- применение ресурсо- и энергосберегающих методов;
- период ее внедрения;
- промышленное внедрение этой технологии на двух и более объектах, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду.

По инициативе Министерства сельского хозяйства РФ 16 августа 2016 г. были сформированы Технические рабочие группы (ТРГ) для разработки соответствующих информационно-технических справочников по НДТ (ИТС НДТ). К концу 2017 г. завершена работа над информационно-техническими справочниками ИТС НДТ-41 «Интенсивное разведение свиней» и ИТС-НДТ-42 «Интенсивное разведение сельскохозяйственной птицы», в которых непосредственно описываются организационные и технические методы сокращения негативного воздействия на окружающую среду при выращивании свиней и птицы. В разработанных справочниках отмечено, что основные риски негативного воздействия на окружающую среду возникают при обращении с навозом и пометов на этапах переработки и его применения на сельскохозяйственных полях в качестве органических удобрений.

Внедрение НДТ предусматривает получением комплексного экологического разрешения (КЭР), которое, в соответствии с действующим законодательством, с 2023 по 2024 г. должны получить все предприятия I категории. Предприятия II категории имеют право добровольно получать комплексные экологические разрешения КЭР. Они выдаются на основании: положительного заключения экспертной комиссии и установления соответствия запрашиваемых условий КЭР критериям НДТ и требованиям, определенным природоохранным законодательством; положительной оценки программы повышения экологической эффективности (при необходимости); положительной оценки программы производственного экологического контроля; согласований (отсутствия возражений) уполномоченных федеральных органов исполнительной власти; рекомендаций согласительного совещания (при условии проведении такового), расчетов технологических нормативов воздействия на окружающую среду (выбросов и сбросов); обоснования нормативов образования отходов и лимитов на их размещение; информации о наличии положительного заключения государственной экологической экспертизы (в случае необходимости ее проведения). Для вновь вводимых объектов I категории КЭР выдается на основании положительного заключения государственной экологической экспертизы проектной документации.

НДТ, связанные со снижением рассредоточенной (диффузной) нагрузки на водные объекты, включают технологии переработки и хранения навоза и помета животноводческих комплексов и птицефабрик, технологии внесения органических и минеральных удобрений с учетом агротехнических требований. Поэтапное освоение НДТ утилизации органических отходов

в сельскохозяйственном производстве можно спрогнозировать в виде последовательности ряда шагов:

Оценка существующего уровня технологий и менеджмента. Данный этап позволяет оценить реальное техническое состояние сельскохозяйственных объектов и качество учета обращения с органическими удобрениями. На основе анализа и результатов оценки должен быть подготовлен план технологической модернизации с обоснованным перечнем рекомендуемых НДТ и способов контроля за функционированием технологий.

Применение современных технологий подготовки и использования органических удобрений. Этап предусматривает реализацию плана технологической модернизации на основе перечня рекомендуемых НДТ. Учитывая высокую стоимость и длительность реализации плана модернизации, должен быть определен его порядок, предусматривающий приоритетность по направлениям, состоянию и специализации сельскохозяйственных предприятий. В первую очередь должны быть модернизированы предприятия, создающие наибольший риск рассредоточенного (диффузного) загрязнения водных объектов.

Освоение системы производственного экологического контроля на уровне предприятий. Данный комплекс мероприятий предусматривает внедрение инструментов внутреннего экологического контроля сельскохозяйственных предприятий, что может быть реализовано в разработке и соблюдении локальных технологических регламентов (стандартов предприятий) и современных методов «цифрового» мониторинга.

Освоение системы регионального мониторинга и координации деятельности по работе с органическими и минеральными удобрениями. Этот этап является наиболее важным для последующей оценки рассредоточенной (диффузной) нагрузки от сельскохозяйственного производства. При этом создаваемая система нацелена на работу с уточненными данными о технологических процессах на сельскохозяйственном производстве в оперативном режиме, что позволяет повысить точность оценки, диффузной на водосборы.

Северо-Западный регион является стратегической территорией в плане развития и устойчивого функционирования сельскохозяйственного производства. Учитывая географическое расположение, природо-климатические и социальные условия, имеются все предпосылки к развитию сельскохозяйственного производства, однако это должно происходить с учетом научно обоснованных норм воздействия на окружающую среду и применения современных технических и организационных методов ведения производства на основе принципов НДТ. Освоение НДТ в комплексе с цифровыми методами мониторинга и контроля соблюдения технологических регламентов работы с органическими и минеральными удобрениями позволят создать условия для уменьшения поступления в водные объекты биогенных элементов от сельскохозяйственного производства.

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что в настоящее время высокие риски загрязнения водных объектов водосбора Ладожского оз. возникли в районах расположения крупных животноводческих комплексов в результате многолетнего нерационального ведения животноводства и птицеводства. Зонами повышенного риска являются сельскохо-

зайиственные угодья южного побережья Ладоги, на которые вносятся экстремальные дозы органических удобрений с птицефабрик Синявинская и Северная, а также крайняя северная и южная части водосбора оз. Ильмень. Рекультивация загрязненных сельскохозяйственных территорий, а также внедрение НДТ ведения сельскохозяйственного производства на птицефабриках и животноводческих комплексах Северо-Западного региона в совокупности с современными методами мониторинга и контроля соблюдения технологий являются приоритетными задачами для снижения биогенной нагрузки на водосбор Ладожского оз. и водные объекты его водосбора.

13.2 Отходы потребления и производства как фактор антропогенного воздействия на водосбор Ладожского озера

Проблема обращения отходов в водосборном бассейне Ладожского оз. относится к числу приоритетных элементов экологической безопасности административно-территориальных образований. В период 2000–2020 гг. резко изменилась структура потребления населения, что привело к устойчивому росту объема твердых коммунальных отходов (ТКО). При этом для части сельских поселений объемы ТКО от сезонного населения многократно превосходят количество муниципальных отходов. Все это увеличило нагрузки на всю инженерную часть системы утилизации отходов. Доля неутилизированных ТКО в бассейне Ладожского оз. остается критически высокой – свыше 85%, что приводит к формированию пространственно-распределенной сети полигонов и свалок хранения отходов поликомпонентного состава (рис. 13.2.1).

В последние годы резко изменился морфологический состав отходов. Значимо вырос удельный вес доли полиэтиленерефталатной тары и упаковки, пластика, старой компьютерной техники, электротехнических изделий с высоким содержанием тяжелых металлов, красителей, синтетических материалов и т. д. Эти отходы занимают большой объем, медленно разлагаются, а при сжигании выделяют большое количество токсичных компонентов.

ТКО стали ведущим фактором диффузного санитарно-экологического загрязнения ландшафтов южного Приладожья, граничащих с Санкт-Петербургской агломерацией. В то же время вариабельность геоэкологических параметров крупных водосборов создают специфические природно-хозяйственные системы с множественными формы их влияния на водные объекты. Современная структура потребления и экономика народного хозяйства создали условия для взрывного роста количества несанкционированных свалок, распределение которых стало диффузно-площадным в зонах повышенной плотности градостроительного освоения территории. Следует отметить, что в целом для водосбора Ладоги характерна более низкая по сравнению, например, с бассейном Финского зал. плотность объектов хранения и размещения отходов. Для частного бассейна Ладожского оз. четко выделяются несколько зон потенциально высоко уровня геосистемного воздействия отходов: Южное Приладожье – Санкт-Петербургская агломерация; Северное Приладожье – Сортавала – Питкяранта; север оз. Ильмень – Велико-Новгородская агломерация; северо-запад Онежского озера – район г. Петрозаводска.

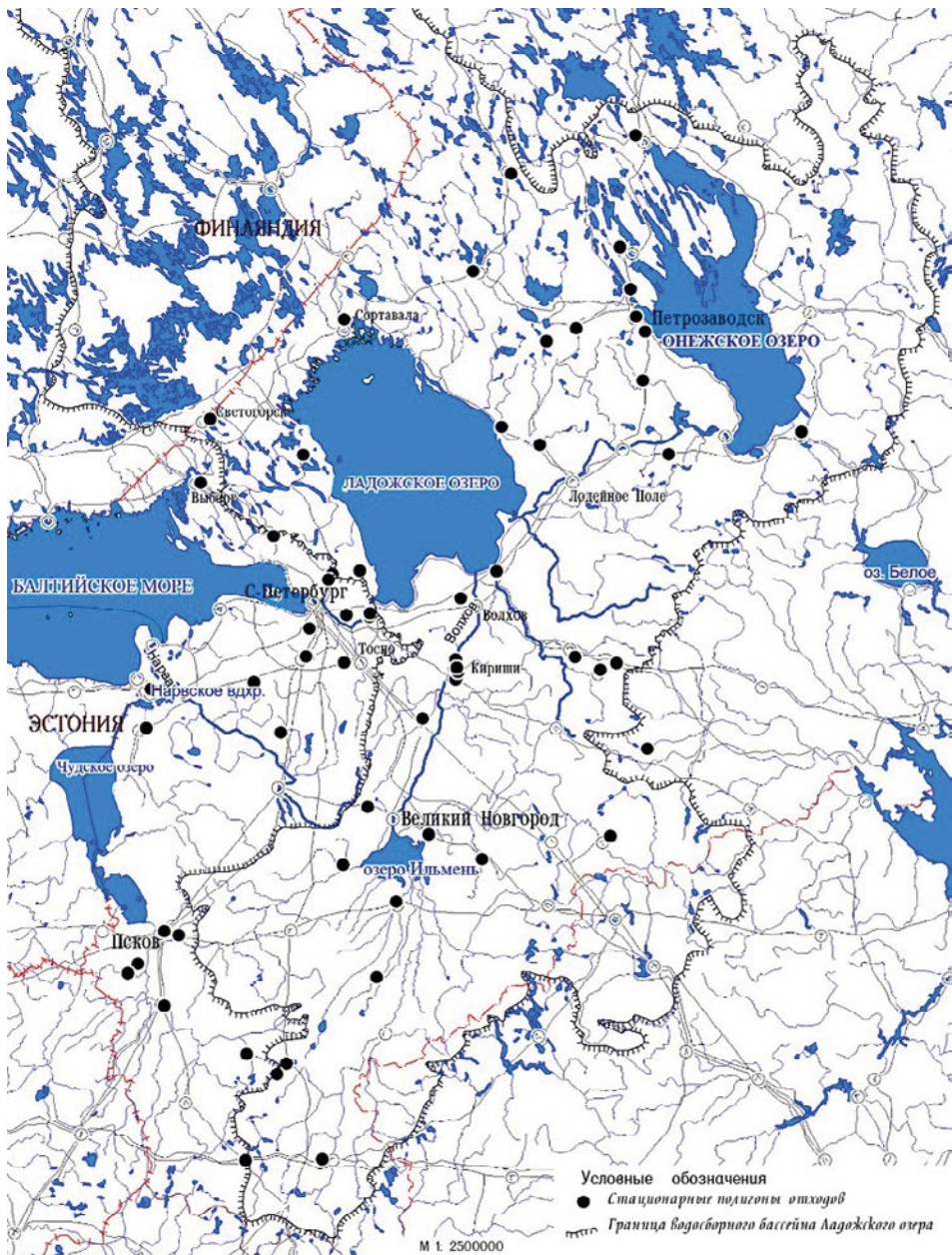


Рис. 13.2.1 – Распределение действующих крупных полигонов ТКО и смешанных отходов в бассейне Ладожского оз.

Для природно-техногенных систем оборота и воздействия отходов действуют фазы цикла развития с резко различающимися типами и масштабами влияния на компоненты вмещающей геосистемы. Длительное хранение отходов повсеместно с отклонениями от технологических тре-

бований на законсервированных полигонах и свалках ТКО разного типа приводит к формированию объектов накопленного прошлого экологического ущерба (ОПЭУ), которые широко представлены на территории водосбора Ладоги [Питулько, Кулибаба, 2017]. Проблема перехода контуров несанкционированного свалочного загрязнения в фазу накопленного ущерба актуальна в связи с тем, что такие объекты практически всегда имеют в ореоле воздействия элементы гидрографической сети. Преимущественно это мелиоративные сети осушения разного уровня общей водосборной геосистемы.

Негативный фон воздействия нагрузки отходов на геосистемы бассейна формировался длительное время (40–50 лет) в различных условиях природопользования и формах проявления:

- **1985–1992 гг.** Интенсивный рост объемов размещения отходов, в первую очередь высокотоксичных промышленных. Постоянный рост мощностей по размещению, но с преобладанием свалок и полигонов с низким уровнем инженерной защиты. Наличие многочисленных малых санкционированных, необорудованных свалок, равномерно распределенных по территориям (в основном принадлежащим сельскохозяйственным предприятиям). В настоящее время этот тип свалок в фазе объектов ОПЭУ стал источником вторичных загрязнений почв сельскохозяйственных угодий [Питулько и др., 2016]. Доля несанкционированных свалок ТКО относительно мала. Общий фон токсичных нагрузок значим, но удельный все в сумме иных форм (сбросы сточных вод, токсичные выбросы в атмосферу и т. д.) низок и локализован.

- **1992–2000 гг.** Спад всех форм промышленного и сельскохозяйственного воздействия, уменьшение диффузных нагрузок, с одновременным формированием ОПЭУ после массового и неконтролируемого вывода из эксплуатации промышленных предприятий, военно-технических и иных потенциально опасных природно-хозяйственных объектов, формирование крупных контуров с накоплением смешанных промышленно-бытовых токсичных отходов. Широкое распространение по территории несанкционированных свалок с высокой долей опасных и высокотоксичных отходов. Резкий скачок аварийных форм воздействия на окружающую среду воздействий на полигонах и свалках ТКО. Этот период, по-видимому, отличался самым высоким уровнем экогеохимической нагрузки от высокоопасных отходов.

- **2000–2007 гг.** Рост объема отходов ТКО, опережающее истощение мощностей размещения отходов, скачкообразный рост числа малообъемных мест размещения бытового мусора, в том числе «рекреационных» форм в водоохраных полосах водоемов. Массовое появление несанкционированных стационарных свалок с отходами смешанного типа. Появление диффузных ореолов с повышенной плотностью источников воздействия отходов в связи с интенсивным градостроительным освоением значительных территорий. Начало строительства муниципальных мощностей размещения отходов ТКО. Для периода характерно проявление точечных контуров с опасными уровнями загрязнений вследствие интенсивных процессов вторичных загрязнений в техногенных грунто-свалочных массах.

- **2007–2018 гг.** Усиление надзорного контроля и увеличения доли переработки ТКО. Существенный рост региональных природоохранных мероприятий в сфере обращения с отходами и формирование распределенной сети муниципальных полигонов ТКО. Закрытие большей части стационарных свалок без инженерных сооружений защиты или разрешительной документации. Так, в Ленинградской обл. законсервировано около 30 стационарных несанкционированных свалок. Закрыты крупные стационарные свалки ТКО, не отвечающие требованиям безопасной эксплуатации с общей годовой мощностью около 1000 тыс. м². Однако, как следствие, мощности объектов размещения исчерпывались с заметным опережением проектных показателей. Примерно 80% объектов размещения в Южном Приладожье работают с превышением проектных нормативов по объемам размещения. При постоянном росте вновь выявленных малообъемных самовольных свалок резко увеличивается объем рекультивации и ликвидации таких свалок.

- **2018 г. – н. в.** Реформа сферы обращения с отходами ТКО. Централизованное управление объектами размещения ТКО. Переход к многоуровневой системе контроля транспортирования и размещения ТКО, начало ускоренного строительства мощностей по переработке ТКО; станций перегруза, промышленных объектов утилизации. Ускоренные темпы ликвидации самовольных несанкционированных свалок, прирост мощностей размещения. Уровни негативного воздействия при успешной реализации реформ должны снизиться и можно прогнозировать их стабилизацию в краткосрочной перспективе.

По геоэкологическим параметрам ОПЭУ многообразны. Это свалки в понижениях рельефа, равнинные – отвальные и с дисперсными свалочными массами. По технологическим типам делятся на свалки высоконагружаемые, насыпные, брикетированного размещения, с полным оборудованием инженерными средствами защиты и без таковых и т.д. Основная проблема оценки роли отходов на водосборе в том, что инженерно-экологические параметры свалок не могут быть использованы для оценки диффузной нагрузки на водные объекты без учета геоэкологических характеристик конкретных участков водосбора, прежде всего четвертичных отложений и грунтового стока.

Состав загрязнений почвогрунтов существенно различается по типам объектов размещения отходов, представляя собой устойчивые виды геохимических спектров (табл. 13.2.1). Большая часть очаговых концентраций отходов имеет комплексный спектр воздействий, резко дифференцированный по генезису и масштабам воздействия. Свалочные массы для стационарных полигонов загрязнены, в основном, элементами 3-го класса опасности [Питулько, Кулибаба, 2019]. Содержание химических веществ 1–3-го классов опасности в теле крупных объектов всегда превышает ПДК: цинка – до 176 раз, кадмия и свинца до 85 раз, меди – до 26 раз, сурьмы – до 17 раз, хрома и никеля – в 4–5 раз, мышьяка – в 3–4 раза. Величина суммарного показателя загрязнения (Zс) варьирует от 100 до 1200 ед., что многократно выше чрезвычайно опасной категории загрязнения.

Таблица 3.2.1

Средние значения геохимических спектров загрязнений некоторых категорий объектов хранения отходов по данным натурных съёмок в бассейне

Категория объекта и его геохимический спектр (ГС)	Средний период накопления, лет	Средняя плотность накопленных материалов		Уровень накопления (сумма K_n)	
		Насыпная, m^3/m^2	Объёмная, t/m^3	ТМ/в т. ч. 1 кл. оп.	Органика
Свалки ТКО необорудованные	20.1	5.1	0.3	127/66	3.9
ГС	$SnAg_{10} - TM-1_s - TM-2_{2.5} - TM-3_{1.2} - BPy_{2.2} - PCB_{0.3} - Oil_{0.05} - Pest_{0.01}$				
Закрытые полигоны ТБО	19.5	10.0	н. д.	45/44	2.0
ГС	$SnCdAg_{10} - TM-1_s - TM-2_3 - TM-3_2 - BPy_{0.6} - PCB_{0.5} - Oil_{0.04}$				
Свалки строительных отходов	10	2.5	н. д.	42/26	1.30
ГС	$TM-2_s - TM-3_2 - BPy_{2.2} - Oil_{0.04}$				
Площадки хранения промышленных отходов.	13	7.2	0.25	1100/800	-
ГС	$SnCdAg_{250} - TM-1_{70} - TM-2_{30} - TM-3_5 - Oil_{0.05}$				

$K_{накопл}$ – отношение каждого компонента к фону; ТМ-1: сумма $K_{накопл}$ металлов 1-го класса опасности, ТМ-2 – то же, 2-го класса, ТМ-3 – то же, 3-го класса. ВРур – бензапирен, РСВ – полихл. бифенилы, Oil – нефтепродукты, Pest – пестициды

В почвогрунтах стационарных свалок часто накапливаются приоритетные органические токсиканты, прежде всего: бенз (а) пирен – до 28 ПДК, ПХБ – до 8 ПДК, нефтепродукты – до 10 ПДК (табл. 13.2.2). Однако наиболее высокие концентрации загрязняющих веществ приурочены к границе грунтов со свалочными массами и распространяются в основном на 0,5–2,5 м вглубь от подошвы свалочных масс.

Таблица 13.2.2

Типичный спектр концентрации токсичных органических ингредиентов в грунто-свалочных массах. Свалки в южном Приладожье

Ингредиент	ПДК	Концентрация
3,4-бенз (а) пирен, мкг/кг	20	359,5
ПХБ, мкг/кг	60	194,7
Сумма ДДТ мкг/кг	100	48,15
Нефтепродукты, мг/кг	1000	2246,1

Основная часть несанкционированных свалок в регионе представлена самовольными очагами стихийного размещения бытовых отходов. Самовольная несанкционированная свалка представляет собой поверхностное размещение бытового мусора на локальных участках. Как правило, такие свалки имеют горизонтальное простираие, малые высоты навалов (1,5–2 м), небольшие площади (в среднем 0,02 га), низкую влажность от-

ходов и их слабую биологическую деградацию. Низкая плотность свалочных масс и их естественная аэрация способствуют аэробному разложению органической части ТКО без образования фильтрата. Результаты оценки геохимических загрязнений показывают, что преобладающая часть самовольных свалок в бассейне (около 85%) с объемов <50 м³ и периодом использования <4–5 лет не являются источником опасных загрязнений почвогрунтов (табл. 13.2.3). Средняя величина показателя суммарного загрязнения почвенного покрова тяжелыми металлами находится в диапазоне не более 6–18 ед. Зс, что соответствует допустимому уровню загрязнения выше фона. Общие показатели загрязнения участков всех наблюдавшихся свалок близки к фоновым, это объясняется преобладанием инертных типов отходов в свалочных массах. По итогам натурных инвентаризаций только для 0,5% в составе свалочных масс обнаружены отходы 1–2-го класса опасности. Такие свалки могут ликвидироваться простым вывозом свалочных масс, без комплекса рекультивационных работ по санации грунтов.

Таблица 13.2.3

Среднее содержание химических элементов в почвогрунтах мест самовольного размещения ТКО в локальном бассейне р. Морье (западное побережье Ладожского оз.)

Показатель	Фон мг/кг	Содержание в почвогрунтах объектов, в единицах фона	
		Сельхозугодья	Лесной фонд
		Агрозоны дерново-подзолистые, супесчаные	Дерново-подзолистые, супесчаные
Hg	0,04	0,2	0,2
Pb	7,48	0,47	0,62
As	0,66	0,08	0,08
Cd	0,09	0,15	0,15
Zn	15	0,48	0,68
Ni	2,9	0,47	0,54
Cu	4,0	0,28	0,14
Mn	280	0,68	0,86
Cr	11	0,38	0,8
Co	2,8	0,33	0,26
V	7,5	0,71	0,83
pH (ед.)	6,0	1,3	0,86

На изучаемой территории выявлены процессы биогеохимической трансформации грунтово-свалочных масс, приводящие к возникновению высокотоксичных форм вторичных загрязнений [Кулибаба и др., 2016]. Геоэкологические условия для проявления таких процессов в бассейне Ладожского оз. создаются в выработанных обводненных карьерах, используемых для размещения ТКО или при отсыпке технических водоемов бытовыми отходами. Такая технология рекультивации широко используется на территории

бассейна. Ее применение без соблюдения специальных технологий формируют внутримассовые очаги анаэробной деструкции органического вещества сульфатредуцирующими бактериями. В почвоподобных средах такого типа обнаружены микробиоценозы бактерий-метилаторов ртути [Дрегуло и др., 2017]. За счет ресурса биогенного углерода и миграции через свалочные массы высвобождающихся из неорганических отходов ионов металлов, обладающих низким потенциалом ионизации (Bi; As; Sb; Cu; Hg), активно возникают связи с их химическими антиподами – В, С, Р, N, S, обеспечивающими обильное появление растворимых комплексных анионов на их основе. Можно констатировать появление потенциальных очагов крайне опасного процесса метилирования ртути. Большое число таких объектов выявлено для ландшафта юго-западного Приладожья. Проблема здесь в том, что в рассмотренных специфических условиях, даже из околофоновых концентраций валовой ртути может развиваться ртутное загрязнение высокотоксичными подвижными метилированными формами.

Особенность пространственных контуров влияния отходов и их вторичных метаболитов в том, что они, как правило, формируют косвенные зоны переноса загрязнений (миграционные: водный, воздушный, транслокационный) и создают условия для развития парагенетических систем на удалении от земельного участка расположения источника воздействия, но с сильно отличающейся степенью токсичности. Параметр воздействия зависит от локальных условий контура расположения источника загрязнений.

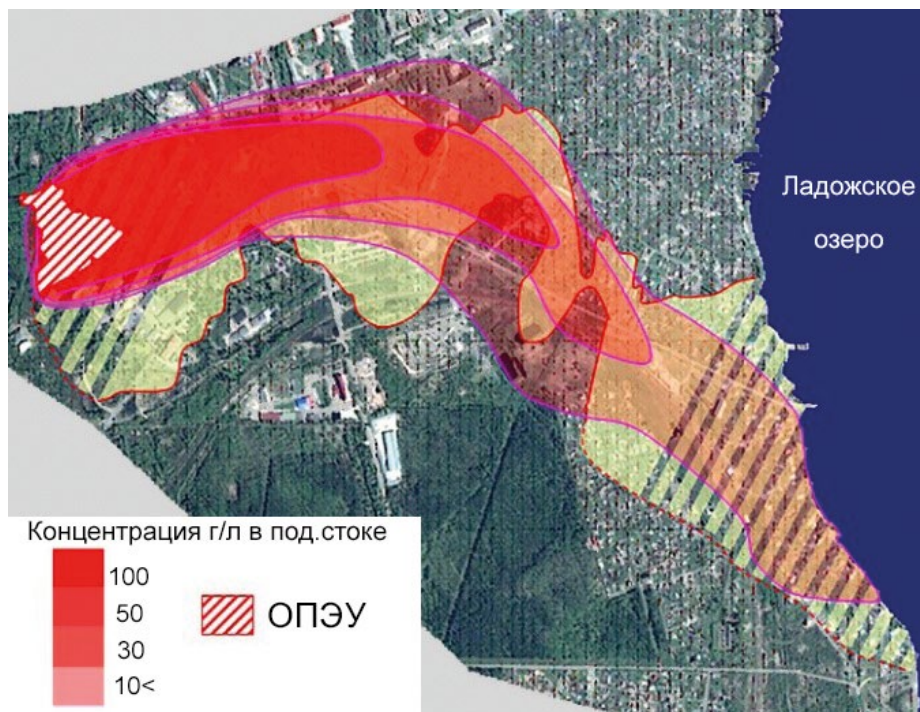


Рис. 13.2.2 – Схема снижения концентрации общей солёности высоко загрязненного грунтового стока на сорбирующих четвертичных отложениях в районе истока р. Невы

Для грунтово-подземного загрязненного стока возможны еще более сложные закономерности его распределения. Показателен для такого случая пример воздействия крупного объекта промышленных отходов в прибрежной зоне Ладожского оз. (рис. 13.2.2). Контур загрязнения представляет собой отвалы высокотоксичных промышленных отходов (120 тыс. т) и инфильтрационную подземную линзу, где содержание отдельных тяжелых металлов исчисляется граммами на литр. Объект расположен менее чем в 1 км от береговой линии Ладожского оз. и имеет направление линий стока к берегу озера. С учетом характера вмещающих покровных грунтов (гравелистые пески) данный контур должен быть оценен как чрезвычайная экологическая угроза для мелководных геосистем. Однако за длительный период времени (>50 лет) изменений гидрохимических показателей воды даже в мелководно-пляжной полосе озера не отмечено. В период натурных исследований и моделирования процесса распределения загрязнений выявлен эффект нейтрализации высокотоксичного стока специфическим сочетанием геогидрологических параметров прибрежного участка Ладожского оз. [Сараев и др., 2015]. Уровни загрязнения резко снижаются до подпороговых показателей на очень коротком расстоянии. Полученное в ходе моделирования пространственное распределение ореола загрязнения показывает его квазистационарное состояние, сложившееся за период существования объекта (около 110 лет).

В данном случае горизонт гравелистых песков, в которых происходит основное распространение загрязнения, обладает весьма малой удерживающей и очищающей способностью. Основной причиной замедленного распространения загрязнения является буферная роль подстилающего водоупорного горизонта верхнекотлинских глин, который является абсорбирующим резервуаром для загрязнения. Перераспределение загрязнения из горизонта гравелистых песков в глины происходит за счет диффузии, значение которой возрастает по мере увеличения площади ореола. Последний вывод имеет значение для оценки ореолов воздействия на природно-территориальные комплексы Приладожской низины с точки зрения их ассимиляционной емкости при воздействии миграционно-водных загрязнений.

Таблица 13.2.4

Показатели концентраций стока от крупнообъемных необорудованных свалок и полигонов южного побережья Ладожского оз.

Концентрации элементов в поверхностных водах, мгО/дм ³										
Участок бассейна	БПК	ХПК	Cd	As	Mn	Ni	Cu	Zn	Pb	Нефтепродукты
Реки от р. Авлога до бассейна р. Волхов	327	231	0,002	<0,005	1,1	0,03	0,09	2,6	0,5	1,8
Реки от границ бассейна р. Волхов до устья р. Свирь	298	467	0,003	0,04	1,6	0,04	1,1	3,5	0,63	2,4

Некоторое представление о потенциальной нагрузке дают значения концентраций основных загрязняющих веществ в поверхностном стоке с территории ОПЭУ, имеющих открытую гидравлическую связь с водными объектами (табл. 13.2.4). Значения валовой нагрузки в замыкающих створах

или непосредственно на Ладожское оз. определить сложно из-за резких различий в коэффициентах разбавления и осаждения по локальным бассейнам.

К неоцененным факторам влияния следует отнести воздушно-миграционные загрязнения. Несмотря на многочисленные очаги пожаров (например, полигон ТКО «Ростехкомплекс» вблизи побережья бухты Петрокрепость) и интенсивные газозвушнные выбросы на объектах размещения отходов, детальных газохимических исследований по составу выделяемых ингредиентов и их переносу по бассейну фактически нет. В то же время биогаз сорбируется вмещающими насыпными грунтами и отложениями естественного генезиса, растворяется в грунтовых водах и верховодке, диссипирует в приземную атмосферу. В толще свалочных масс возможен переход от аэробных условий к анаэробным. Продуктом протекающих при этом биохимических реакций являются жидкие и газообразные токсические вещества, среди которых обычными являются аммиак, сероводород, метилмеркаптан, метилртуть, ПХБ и другие токсиканты. При этом в отличие от водно-миграционных форм, воздушные переносы могут затрагивать значительные территории.

Практика показывает, что восстановление исходного качества контуров свалок значительно сложнее, чем рекультивация. Полного восстановления хозяйственной ценности территории таких объектов рациональными в технико-экономическом отношении средствами добиться невозможно. Здесь речь должна идти о долговременной изоляции. Наибольшую опасность представляют свалки, в прибрежных контурах с включением промышленных отходов, что требует их обезвреживания для перевода из одного класса опасности в другой. Локальные объекты проще рекультивировать на ранних фазах формирования, и именно это может значимо снизить общий диффузный сток в крупном водохозяйственном участке. В то же время региональные водохозяйственные программы ориентированы на длительные проекты реабилитации только крупных источников воздействия, которые далеко не всегда реализуются. Вид и состав восстановительных работ, зависящих от типологии объекта и степени отклонения параметров среды от нормативов, заключаются в следующем:

- контуры водохозяйственного участка, характеризующиеся незначительным уровнем загрязнения как по числу токсикантов и их содержанию, так и по размерам накопленного экологического ущерба, подвергаются санации путем выполнения соответствующих технических решений в режиме благоустройства;
- региональные объекты требуют длительных дорогостоящих проектов восстановления природных экосистем путем экологической реабилитации нарушенных природных систем;
- локальные объекты обычно подвергаются рекультивации и консервации, в соответствии с градостроительным профилем природно-хозяйственной системы;
- элементарные объекты, составляющие подавляющее большинство свалок (если они занимают площадь менее 1 га) и оказывающие незначительное воздействие на ОС, подвергаются прямой ликвидации.

Обобщая представленную выше информацию, можно сформулировать следующий основной вывод. Результаты прямого и косвенного воздействия

отходов и их метаболитов оказывают значимое воздействие на геосистемы водосборного бассейна Ладожского оз. Объекты накопления отходов следует рассматривать как точечно-диффузную нагрузку, применяя к ним строго индивидуальные методы расчета сформированной нагрузки. Критерием экологического риска служат санитарно-гигиенические показатели, так как «реципиентом» воздействия всегда будет являться население региона. Поэтому положение той или иной геосистемы, подвергающейся нагрузке, всегда должно рассматриваться с учетом зональных геоэкологических факторов предельно допустимого воздействия. В зависимости от типологии объекта и степени отклонения параметров среды от нормативов восстановительные мероприятия могут заключаться в следующем: благоустройстве территории, экологической реабилитации, рекультивации и консервации, а также прямой ликвидации.

13.3 Загрязнение мелководного донного ландшафта твердыми бытовыми отходами

Серьезной проблемой Ладожского оз. является загрязнение разных фаций мелководного ландшафта твердыми бытовыми отходами, в первую очередь металлическими объектами, древесиной, резиновыми покрышками. Во множестве встречаются рыбацкие сети, в том числе и затонувшие.

Средством выявления такого рода загрязнения дна могут служить обследования донных поверхностей аквалангистами и подводная видеосъемка с помощью необитаемых подводных аппаратов. В наших работах использовались оба этих метода. Погружения с аквалангом проводились на мелководье, где сосредоточена большая часть бытовых отходов. Исследования с помощью ТНПА «Limnoscout» позволили охватить диапазон глубин до 150 м. В ходе проведения полевых работ были подробно обследованы участки в разных местах озера от мало затронутых антропогенной деятельностью до сильно загрязненных прибрежных промышленных районов, что и послужило основой для представленных ниже материалов.

По результатам исследований оз. Байкал согласно [Потапская, 2016] выделяется несколько групп отходов, загрязняющих дно водоемов (табл. 13.3.1). Эти группы отходов в разном соотношении встречаются в литоральной зоне Ладожского оз. повсеместно, особенно концентрируясь вблизи населенных пунктов (рис. 13.3.1). Выделяются прибрежные промышленные города: Питкяранта, Сортавала, Хийденсельга (Ляскеля), Приозерск, Шлиссельбург. Чрезвычайно много бытового мусора скапливается на дне в районе грузовых причалов. В частности, происходит загрязнение резиновыми покрышками, которые используются в качестве швартовых кранцев. По мере изнашивания они рвутся и попадают на дно, откуда, как правило, не убираются. Велико количество затонувших судов, которые в определенных условиях способны сохраняться на дне сотни лет. Согласно оценкам профессиональных аквалангистов, число затонувших судов, от мелких катеров до крупных барж, теплоходов и т. п., которые обнаруживаются при подводных работах, по всей акватории Ладожского оз. исчисляется тысячами. Встречаются также остатки автомобильного и воздушного транспорта

времен Великой Отечественной войны, большая часть которого сконцентрирована в районе прохождения Дороги жизни на юге Ладожского оз.

Таблица 13.3.1

Группы отходов потребления, загрязняющих дно озерных водоемов

№	Группы отходов	Состав
1.	Отходы полимеров	полиэтилентерефталат (ПЭТ) (бутылки, пищевая упаковка, веревки); полиэтилен высокого давления (ПВД) (канистры для масел); поливинилхлорид (ПВХ) (упаковки для пищевых растительных масел, клеенка, линолеум); полиэтилен низкого давления (ПНД) (пластиковые пакеты, упаковка для чипсов, семечек, куски полиэтиленовой пленки); полипропилен (ПП) (крышки для ПЭТ-бутылок, бутылки для сиропа и кетчупа, стаканчики для йогурта, одноразовая посуда, обрывки туристических ковриков, мешки); полистирол (ПС) (поддоны, упаковка для пищевых продуктов, пенопласт); другие виды неперабатываемого пластика (монтажная пена, поролон, пластиковая обувь)
2.	Отходы металлов	алюминиевые сплавы (банки для напитков, алюминиевая фольга); жестяные банки для консервов; другие отходы металлов (стальная проволока, трос, использованные свечи зажигания, иные изделия из металлов, куски жести, металлические якоря)
3.	Отходы стекла	изделия из белого и цветного стекла, стеклобой
4.	Текстильные отходы	предметы одежды, обуви, куски ваты, меховые изделия
5.	Бумага	одноразовая посуда, картонная и бумажная упаковка
6.	Резина	автомобильные шины, резиновые изделия, обувь
7.	Отходы смешанного состава	рыболовные сети, рубероид, шифер, упаковка от соков, молока («тетрапак»), окурки и т. д.
8.	Другие виды отходов	изделия из дерева (доски, фанера); пищевые отходы

Специфичной проблемой является загрязнение дна и берегов крупным пластиком (в основном это пластиковые бутылки, крышки и пакеты). Имеется ряд пляжей в разных частях озера (например, в Волховской губе, восточнее места впадения р. Волхов; у западного берега в районе пос. Береговое в 15 км южнее г. Приозерска; на островах Сортавальских шхер), где за счет специфики гидродинамических процессов происходит концентрация пластиковых отходов на небольшом участке берега и прилегающей к ней мелководной части акватории.

Отдельной серьезной проблемой являются бесхозные рыбацкие сети, которые массово встречаются по всему Ладожскому оз., как в мелководной зоне, так и вплоть до глубин 50 м. Основная их часть сосредоточена на глубинах порядка 20 м. Помимо того, что они сами по себе загрязняют ландшафты, они продолжают представлять опасность для рыбы, которая, попадая в сети, гибнет. Итогом является снижение рыбных запасов в водоеме. Последнее может приводить к экономическому ущербу, связанному с сокращением численности ценных промысловых видов рыб. Особенно следует отметить узкие заливы, как, например, Импилахти, практически полностью перекрытые сетями, расставляемыми поперек залива. Такая ситуация исключает возможность рыбе совершать миграции без угрозы вылова. Сети,

наряду с большим количеством мусора (полимеры, резиновые покрышки, текстиль, стекло), делают залив Импилахти неблагоприятным по экологическому состоянию донных ландшафтов в этом районе акватории.

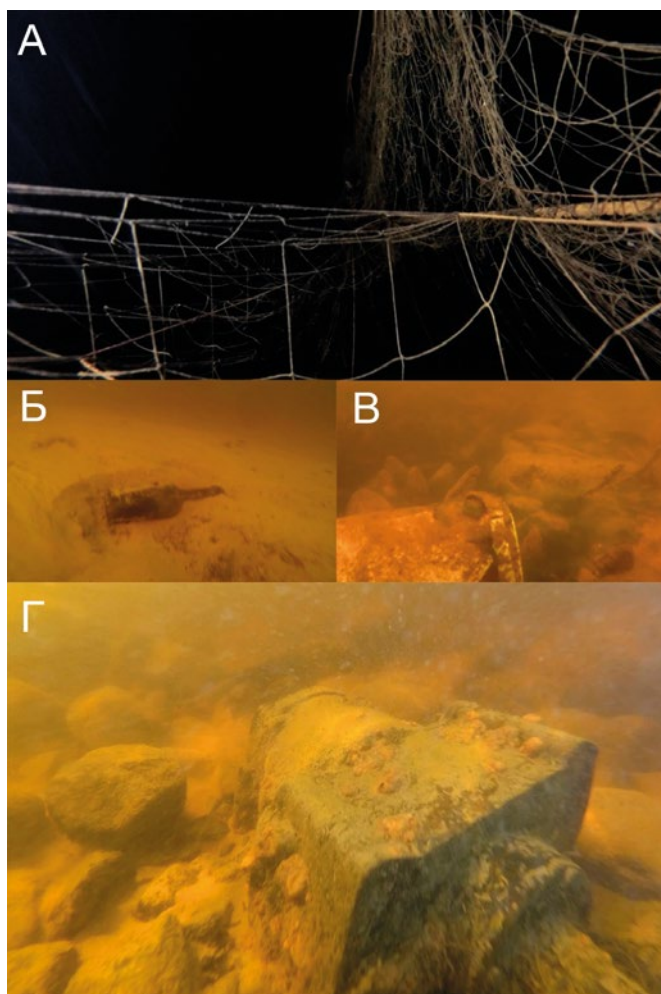


Рис. 13.3.1 – Твердые отходы разных типов на дне Ладожского оз.

Специфичный антропогенный подводный ландшафт представляют собой районы вблизи деревообрабатывающих предприятий, как, например, в поселке Хийденсельга (Ляскеля) в северных шхерах. В районе деревообрабатывающего предприятия, западнее устья р. Янис, дно на площади порядка четверти квадратного километра занято досками и опилками (рис. 13.3.2). По результатам исследования бентоса с помощью дночерпательного метода, проведенного в 2015 г., было выявлено отсутствие донных организмов на данном ландшафте антропогенного происхождения. Подводные видеосъемки также подтвердили отсутствие ландшафтообразующих видов донной биоты, как растительного, так и животного происхождения, не было

отмечено присутствия рыбы. При этом ландшафты с восточной стороны устья реки представляют собой естественные биотопы с характерными для района макрофитами и наличием крупных двустворчатых моллюсков унioniid, имеющих достаточно высокую плотность.

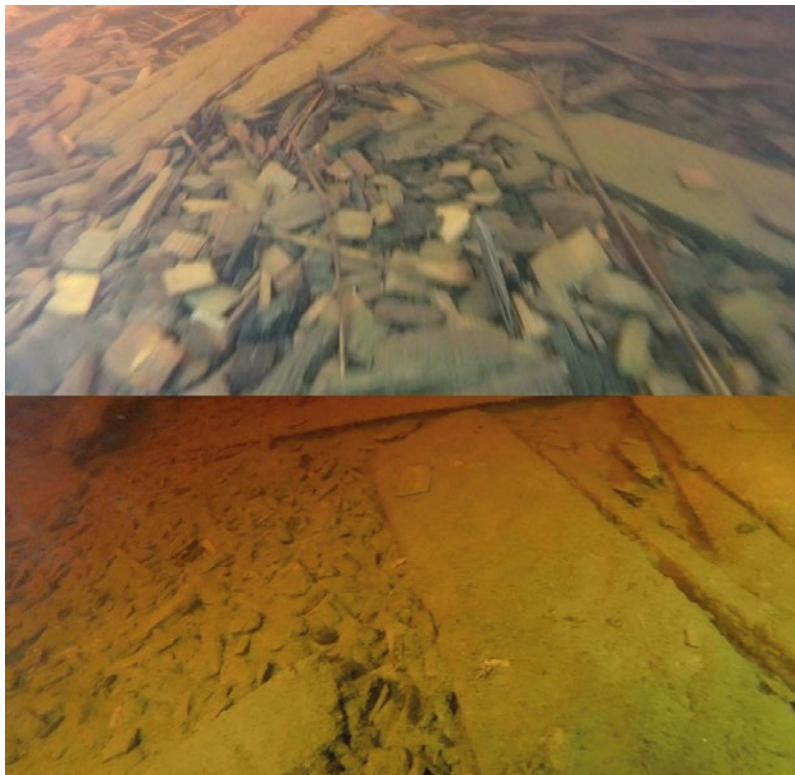


Рис. 13.3.2 – Антропогенно измененный ландшафт: дно со 100%-м перекрытием древесными отходами (пос. Хийденсельга, Ляскеля)

Таким образом, результаты проведенных работ показали, что загрязнение твердыми бытовыми отходами донных ландшафтов является распространенным явлением на акватории озера, особенно в прибрежной его части. Представляется необходимым большее внимание уделить наиболее проблемным в этом плане участкам – районам прибрежных промышленных городов. С помощью современного оборудования и новых методов (прохождение видеопрофилей с помощью ТНПА с привязкой результатов в ГИС-программах, съемка многолучевым эхолотом, извлечение обнаруженных объектов со дна для оценки их состава) возможно проведение исследований площадного распределения и количественного вклада отдельных типов твердых бытовых отходов, загрязняющих дно, с целью оценки масштабов проблемы в каждом конкретном месте потенциальной экологической опасности. Составление списка проблемных мест (например, пляжей с концентрированием крупного пластика) может помочь при выработке рекомендаций для организаций и лиц, отвечающих за поддержание над-

лежащего экологического состояния берега и акватории озера. Отдельная работа требуется в отношении норм законодательства, связанного с рыболовством, поскольку существующий порядок приводит к большому числу браконьерских действий, которые лишь увеличивают проблему бесхозных сетей в озере.

13.4 Зоны экологического риска, выявленные на основе гидробиологических и гидрохимических показателей

Как отмечается в работе, обобщающей многолетние исследования литорали Ладожского оз. [Литоральная..., 2011], зона экологического риска представляет собой участок акватории, приближенной к источникам техногенного загрязнения, где гидрохимические показатели и состояние сообществ гидробионтов в той или иной степени отличаются от фоновых. При продолжительном антропогенном воздействии степень негативных изменений здесь усиливается, приводя к постепенной деградации экосистемы вплоть до образования «мертвых зон».

На рис. 13.4.1 приведена регионализация прибрежных районов Ладожского оз. по уровню нагрузки и загрязнению в период максимального антропогенного воздействия и наихудшего состояния озера в середине 80-х годов [Гусаков, Петрова, 1990]. Видно, что в то время критическая нагрузка на прибрежные воды наблюдалась в районе г. Приозерска, п. Ляскеля и г. Питкяранты. Сильному антропогенному воздействию были подвержены юго-западный прибрежный район и Волховская губа, принимающие сток рр. Бурная, Волхов и Сясь. При этом по уровню загрязнения указанные районы классифицировались как умеренно и сильно загрязненные. Приведенные результаты можно расценивать, как возможный предельный вариант загрязнения в случае возврата к прежнему критическому уровню антропогенного воздействия, а также как иллюстрацию действия механизмов переноса примеси в Ладожском оз. на формирование качества воды.

В 90-х гг. уровень антропогенной нагрузки на Ладожское оз. существенно снизился, в том числе и из-за экономического кризиса в стране, что привело к улучшению качества воды в озере. Тем не менее зоны экологического риска на акватории сохранились, так как основные источники негативного антропогенного воздействия продолжают функционировать, хотя и менее интенсивно. Наиболее ярким примером экологического состояния водоема, испытывающего интенсивное воздействие стоков техногенного характера, является Щучий залив Ладожского оз., расположенный в западной части его шхерного района [Литоральная..., 2011]. Более трех десятилетий в этот небольшой водоем поступали сточные воды Приозерского ЦБК, что привело к полной деградации экосистемы, превратившейся в «мертвую зону». В 1986 г. комбинат был закрыт, а затем перепрофилирован в другие, не менее опасные производства. Аналогичная ситуация характерна и для других участков акватории озера, а также притоков. Несмотря на достигнутое снижение антропогенной нагрузки, сбросы сточных вод в реки и водоемы продолжают. Решение проблемы возможно только после законодательного закрепления кардинальных мер по снижению сбросов сточных вод

в водные объекты на водосборе Ладоги. Однако, как отмечалось в Главе 1 настоящей монографии, Государственная Дума отклонила в первом чтении проект закона об охране Ладожского и Онежского озер по причине недостаточной проработки. Основной причиной отклонения, по-видимому, явилось ущемление таким законом интересов крупных промышленных и сельскохозяйственных компаний, осуществляющих сброс сточных вод в северо-западном регионе. В сложившейся ситуации постоянный мониторинг существующих зон экологического риска является необходимым условием сохранения уникального водоема, каким является Ладожское оз., и предотвращения возникновения катастрофических ситуаций, связанных с неконтролируемым воздействием зон экологического риска на весь водоем.

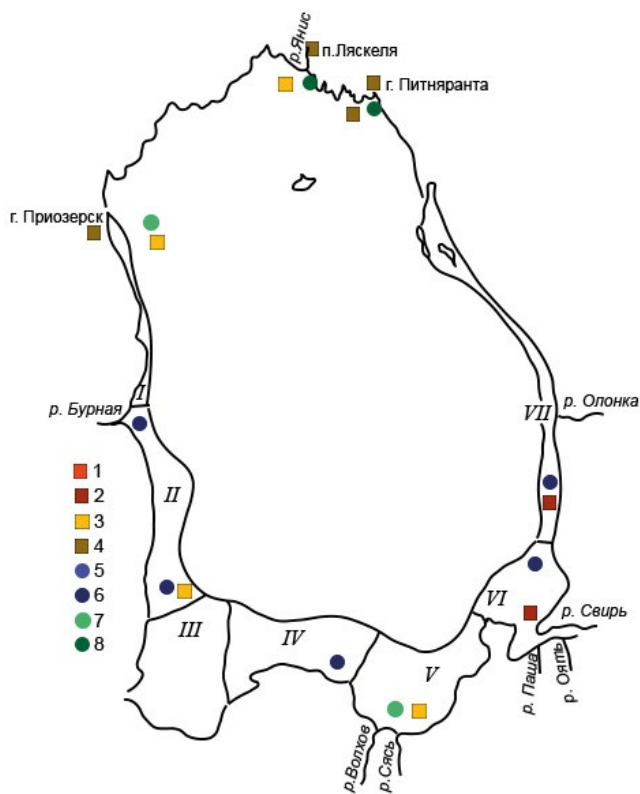


Рис. 13.4.1 – Уровень загрязнения прибрежных районов Ладожского оз. в период максимальной антропогенной нагрузки в середине 80-х годов [Гусakov, Петрова, 1990]. Выделенные зоны: I – северо-западный берег, II – юго-западный берег, III – бухта Петрокрепость, IV – южный берег, V – Волховская губа, VI – Свирская губа, VII – восточный берег. Уровни загрязнения по степени антропогенной нагрузки: 1 – допустимое, 2 – среднее, 3 – сильное, 4 – критическое. Характеристика загрязнения по биологическим показателям: 5 – слабое, 6 – умеренное, 7 – сильное, 8 – критическое

Результаты оценки расположения таких зон по данным гидрохимических и гидробиологических исследований Института озероведения [Андронникова, Распопов, 2007] на начало 2000-х годов представлены на рис. 13.4.2.

Из представленной схемы следует, что на акватории Ладоги преобладают зоны экологического риска двух основных типов:

- принимающие стоки населенных пунктов и расположенных в их окрестностях предприятий заливы, имеющие замедленный водообмен с центральной частью озера, накапливающие за счет этого загрязняющие вещества, что приводит к деградации биотических сообществ;
- места впадения в озеро загрязненных притоков, как крупных (Волхов, Сясь, Свирь), так и относительно мелких (Назия, Морье, Кабона).

Исток реки Невы также отнесен к зонам экологического риска, хотя Петрокрепостной залив среди них не значится.

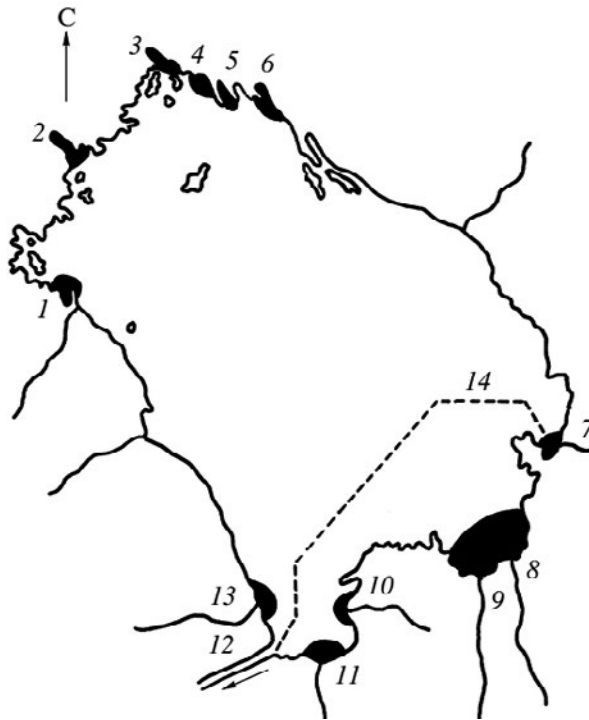


Рис. 13.4.2 – Зоны экологического риска Ладожского оз. по данным [Андронникова, Распопов, 2007]: 1 – г. Приозерск, прилежащие территории, Щучий залив; 2 – г. Лахденпохья, прилежащие территории; 3 – г. Сортавала, прилежащие территории; 4 – п. Ляскеля, прилежащие территории; 5 – п. Импилахти, прилежащие территории; 6 – г. Питкяранта, прилежащие территории; 7 – устье реки Свирь; 8 – устье реки Сясь, прилежащие территории; 9 – устье реки Волхов, прилежащие территории; 10 – устье реки Кабона; 11 – устье реки Назия; 12 – река Нева; 13 – устье реки Морье; 14 – судоходный фарватер

В рамках проекта Санкт-Петербургского Общества естествоиспытателей – СПбОЕ, выполненного при поддержке Всемирного Фонда Природы – WWF [www.ladoga.krc] составлена схема «горячих точек» в прибрежных районах Ладожского оз. (зоны 1–9 на рис. 13.4.3), которые определены как «участки с комплексом угроз всему биологическому разнообразию, территории, где под негативное антропогенное влияние попадают отдельные

компоненты биоты и факторы, представляющие опасность естественному развитию природных комплексов». К их числу отнесены:

- 1) устье реки Сясь и прилегающие территории;
- 2) устье реки Волхов, г. Волхов и прилегающие территории;
- 3) бухта Петрокрепость, г. Петрокрепость и прилегающие территории южного Приладожья;
- 4) устье реки Бурная;
- 5) город Приозерск, прилегающие территории и Щучий залив;
- 6) поселок Лахденпохья и прилегающая акватория;
- 7) город Сортавала, прилегающие территории и акватории;
- 8) город Питкяранта, прилегающие территории;
- 9) поселок Ляскеля, прилегающие территории, бухта Хиденселька.

В последующих работах ИНО РАН [Литоральная..., 2011] схема была дополнена тремя зонами. Это устье реки Свирь, п. Импилахти и прилегающие территории, Монастырская бухта острова Валаам (зоны 10–12 на рис. 13.4.3), а также акватория судоходного фарватера (зона 13 на рис. 13.4.3).

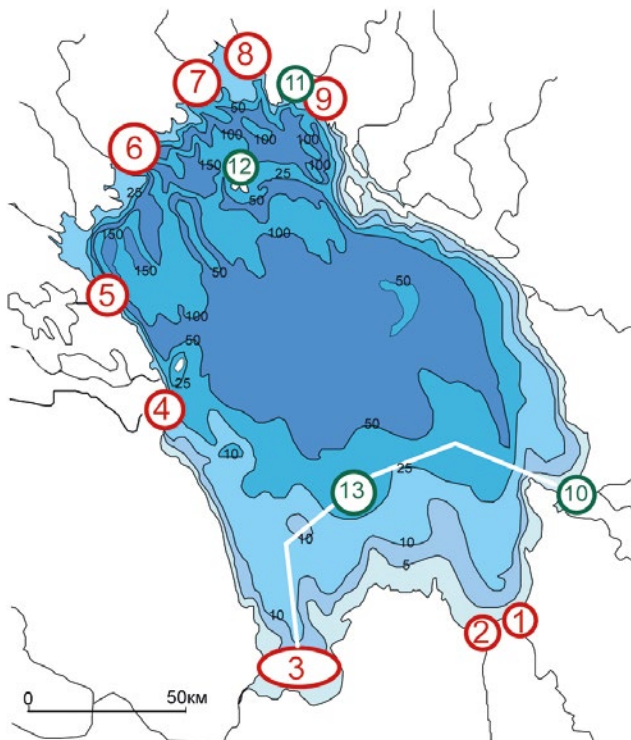


Рис. 13.4.3 – Зоны экологического риска Ладожского оз. по данным [www.ladoga.krc; Литоральная..., 2011]: 1. Устье реки Сясь, прилегающие территории; 2. Устье реки Волхов, прилегающие территории; 3. Бухта Петрокрепость, г. Шлиссельбург, прилегающие территории южного Приладожья; 4. Устье реки Бурной; 5. г. Приозерск, прилегающие территории, Щучий залив; 6. г. Лахденпохья, прилегающие территории; 7. г. Сортавала, прилегающие территории; 8. п. Ляскеля, прилегающие территории; 9. г. Питкяранта, прилегающие территории; 10. Устье реки Свирь; 11. п. Импилахти, прилегающие территории; 12. Монастырская бухта (о. Валаам); 13. Судоходный фарватер

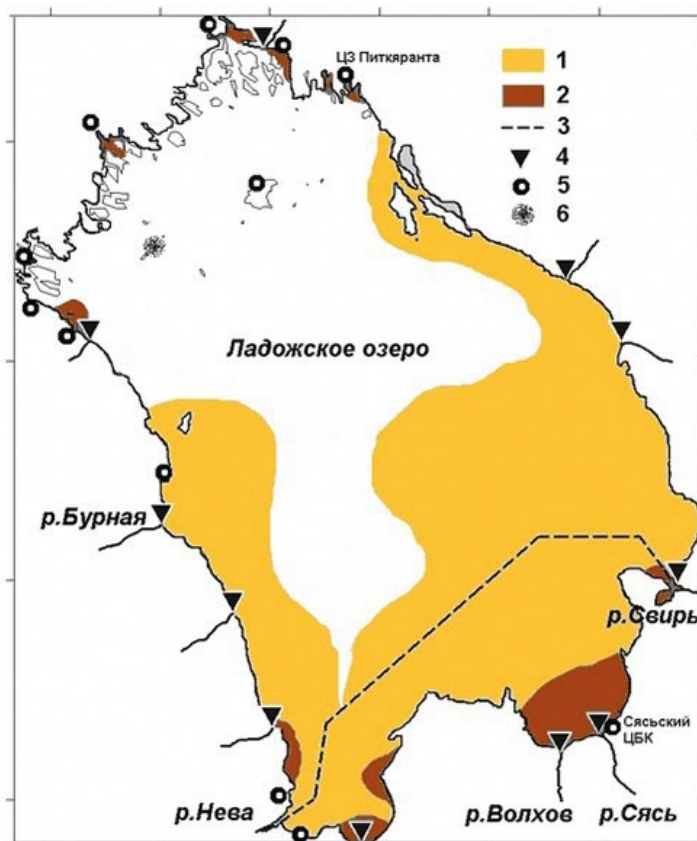


Рис. 13.4.4 – Факторы негативного воздействия на качество воды в возможном водозаборе [Ладога, 2013]: 1 – зона возможного распространения речных вод, 2 – зона устойчивого загрязнения и экологического риска, 3 – основной судоходный фарватер, 4 – места впадения крупных рек малых загрязненных притоков, 5 – точечные источники загрязнения, сбрасывающие сточные воды непосредственно в Ладожское озеро, 6 – зона возможного радиоактивного загрязнения

При решении задачи выбора альтернативного источника питьевого водоснабжения Санкт-Петербурга [Ладога, 2013] выполнено исследование возможного негативного воздействия различных источников загрязнения на качество воды в различных частях акватории Ладоги (рис. 13.4.4). Здесь указаны факторы негативного воздействия на качество воды, которые следует учитывать при выборе расположения водозабора: зона возможного распространения речных вод на акватории озера в различные сезоны, зоны устойчивого загрязнения и экологического риска, возникшие в результате многолетнего воздействия загрязненных речных вод и сбросов сточных вод предприятиями, расположение основного судоходного фарватера, к которому приурочены многочисленные несанкционированные сбросы загрязняющих веществ с проходящих судов. Кроме того, обозначены места впадения крупных рек, малых загрязненных притоков, являющихся важными источниками поступления в озеро химических веществ, расположение точечных

источников загрязнения, сбрасывающих сточные воды непосредственно в Ладожское оз., а также зона возможного радиоактивного загрязнения в районе островов Западного архипелага.

Согласно этой схеме наиболее крупными точечными загрязнителями озера являются Сясьский ЦБК, а также ЦЗ Питкяранта. Сбросы Сясьского ЦБК вместе со стоком рек Волхов и Сясь формируют зону устойчивого загрязнения в Волховской губе. Сбросы ЦЗ Питкяранта привели к возникновению кризисной экологической ситуации в прилегающих шхерах северо-ного побережья Ладожского оз.

Кроме того, к числу возможных «горячих точек» акватории Ладожского оз. может быть отнесена окрестность Западного архипелага (островов Хейнясенма, Кургисари и Верккосари). В начале 50-х годов, согласно информации, приведенной в средствах массовой информации [Тарасов, 1991], здесь проводились испытания так называемых грязных бомб. Взрывы проводились в воздухе, в воде и на бывшем немецком миноносце «Кит», который оставался вблизи острова Хейнясенма в притопленном состоянии до начала 90-х годов и затем был отбуксирован на Новую Землю. Сведения об указанных испытаниях крайне отрывочны, содержатся, главным образом, в материалах журналистских расследований, основных на рассказах оставшихся в живых очевидцев [Тарасов, 1991]. Немногочисленные исследования радиоактивного фона в окрестности упомянутых островов, выполненные как российскими специалистами [Катков, 1985], как и в ходе совместных российско-финских исследований [Gritchenko et al., 1996] не выявили каких либо радиоактивных аномалий в районе исследований.

Результаты гидрохимических и гидробиологических исследований Ладоги и ее литоральной зоны, выполненных в последнее десятилетие, достаточно подробно представлены в Главах 8–10 настоящей монографии. Они показали важную роль литорали в качестве источника информации и индикатора экологического состояния районов озера, подверженных влиянию антропогенных факторов [Литоральная..., 2011]. Именно в литоральной зоне выявлены наиболее загрязненные участки, или зоны экологического риска, расположенные вблизи источников загрязнения. Их влияние на водоем происходит постоянно, но при разбавлении в огромных водных массах оно не прослеживается в удаленных районах, создавая здесь впечатление вполне благополучной экологической обстановки. Между тем, загрязняющие вещества никуда не исчезают. Постепенно увеличивается их концентрация в воде и донных отложениях, они аккумулируются в телах гидробионтов и включаются в трофическую цепь. Чем больше таких неблагополучных районов в литоральной зоне, тем более «нездоровая» экосистема озера в целом. Примером такой постепенной деградации гидробиоценозов, по-видимому, являются обширные площади дна в районе г. Питкяранта, где на акватории, принимающей стоки Питкярантского целлюлозного завода и захватывающей как деклинальную, так и профундальную зоны на площади порядка 300 км², в настоящее время отмечаются низкие значения численности и биомассы мейобентоса и обедненная структура сообщества (встречались представители только трех таксонов: циклопы, нематоды и турбеллярии), что не характерно для других зон озе-

ра на сходных глубинах и грунтах. Вероятно, это связано не с природными факторами, а с негативным влиянием промышленных стоков на донную биоту. Отсюда очевидна важность мониторинга литоральной зоны как в ее фоновых участках, так и в выявленных зонах экологического риска [Литоральная..., 2011].

Результаты токсикологических исследований, проведенных главным образом сотрудниками СПб Филиала ФГБНУ «ВНИРО» («ГосНИОРХ» им. Л. С. Берга) в 2019–2020 гг., указывают на достаточно благоприятное экологическое состояние большей части акватории Ладожского оз. за исключением отдельных, локальных участков, где существует выраженное антропогенное воздействие. Сделано заключение, что самым неблагоприятным для среды обитания гидробионтов является район, примыкающий к г. Лахденпохья. Случаи превышения установленных нормативов содержания тяжелых металлов в пищевой рыбе обнаружены вблизи населенных пунктов с развитой промышленностью, в устьях рек, в бухтах с низким водообменом. Установлено, что в последние годы в южной мелководной зоне основного размножения и нагула многих видов рыб обострилась негативная ситуация нарушения воспроизводства рыб и беспозвоночных, что привело к падению вылова особенно ценных рыбных ресурсов. То есть локализация зон экологического риска на акватории Ладоги сохраняется и в настоящее время.

В заключение настоящего раздела следует обратить внимание на то, что постоянный мониторинг существующих зон экологического риска является необходимым условием сохранения уникального водоема, каким является Ладожское оз., и предотвращения возникновения катастрофических ситуаций, связанных с возможным неконтролируемым негативным воздействием этих зон на весь водоем. Однако существующая система государственного мониторинга водных объектов в данном случае малоэффективна, как по составу контролируемых веществ и расположению пунктов наблюдений, так и по частоте отбора проб. Более подробно проблемы современной системы мониторинга Ладоги будут рассмотрены в следующей главе.

Глава 14. Современное состояние и совершенствование системы мониторинга Ладожского озера

В соответствии с Положением о государственном мониторинге состояния и загрязнения окружающей среды (утв. постановлением Правительства РФ от 6 июня 2013 г. №477), Водным Кодексом РФ [2020] и Положением об осуществлении государственного мониторинга водных объектов (утв. постановлением Правительства РФ от 10 апреля 2007 г. №219) «Мониторинг представляет собой систему наблюдений, оценки и прогноза изменений состояния водных объектов, находящихся в федеральной собственности, собственности субъектов Российской Федерации, муниципальных образований, физических и юридических лиц...». «Организацию и осуществление государственного мониторинга обеспечивает Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды с участием других уполномоченных федеральных органов исполнительной власти». Цель мониторинга – «проведение наблюдений за состоянием и загрязнением окружающей среды, оценка происходящих в ней изменений, а также прогнозирование следующих опасных явлений и факторов: опасные природные явления, приводящие к стихийным бедствиям; неблагоприятные природные условия для отдельных направлений хозяйственной деятельности; химическое, радиоактивное и тепловое загрязнение, физические, химические и биологические (для поверхностных водных объектов) процессы; изменение компонентов природной среды, приводящее в том числе к изменению климата».

В настоящем разделе выполнен анализ состояния государственного мониторинга Ладожского оз. Проведено его сравнение с системами мониторинга ЕС и США. Сформулированы предложения по его совершенствованию в современных условиях, которые касаются развития системы наблюдений на водоеме, методов оценки качества воды и экологического состояния, а также прогнозирования возможных изменений под воздействием антропогенных и климатических воздействий с использованием методов математического моделирования.

Первый нормативный документ по организации и проведению системы наблюдений системы на водных объектах, в том числе и на Ладоге, был разработан и опубликован в 1977 г. [Методические..., 1977]. Последующие этапы развития системы нашли свое отражение в усовершенствованном документе [Методические..., 1984]. На сегодняшний день основной организацией, осуществляющей многолетние наблюдения за гидрологическими, гидрохимическими и гидробиологическими характеристиками Ладожского оз., является Северо-Западное УГМС Росгидромета (СЗ УГМС). В рамках своей компетенции к проведению мониторинга на Ладожском оз. и его водосборе привлечены Федеральное агентство водных ресурсов (Росводресурсы) и его территориальный орган – Невско-Ладожское бассейновое водное управление (НЛБВУ), Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав

потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор) и его территориальное управление, Государственный научно-исследовательский институт озерного и речного рыбного хозяйства (ГосНИОРХ СПб Филиал ФГБНУ ВНИРО), а также предприятия-водопользователи (ГУП Водоканал СПб – в том числе). При этом регулярные мониторинговые наблюдения за характеристиками водной массы Ладоги являются ответственностью СЗ УГМС.

Изначально мониторинг Ладоги проводился СЗ УГМС по индивидуальной схеме в существенно более расширенном варианте по сравнению с современными руководящими документами Росгидромета, учитывающей уникальность объекта и его геостратегическое значение. На начальном этапе своего существования система наблюдений СЗ УГМС в акватории Ладожского оз. имела пространственную структуру, включающую около 70 станций, достаточно полно охватывающую акваторию озера. При выборе сетки станций учитывался опыт работ Института озераведения, который выполняет исследования Ладоги, начиная с пятидесятых годов прошлого века [Тихомиров, 1968]. Однако в последние десятилетия трансформация системы наблюдения СЗ УГМС происходила в направлении ее оптимизации и сокращения в основном по причине уменьшения финансирования.

В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 14.03.1997 № 307 мониторинг водных объектов с 1997 г. осуществлялся МПР РФ совместно с Росгидрометом РФ. Для ведения мониторинга официально привлекались академические организации. В частности, на территории Республики Карелия, ответственной организацией за ведение мониторинга был назначен Институт водных проблем Севера РАН (ИВПС ФИЦ КарНЦ РАН), который осуществлял мониторинг как Онежского, так и северной части Ладожского озер [Современное..., 1998]. В дальнейшем, после 1999 г., ответственной организацией за ведением мониторинга этих объектов вновь был назначен Росгидромет, который привлекал ИВПС РАН для участия в ведении мониторинга Онежского и северной части Ладожского.

Существенным недостатком организации работ по мониторингу Ладоги являлось отсутствие координации работ между Карельским ЦГМС (Петрозаводск) и Северо-Западным УГМС (Санкт-Петербург). Кроме того, к выполнению мониторинговых работ привлекались организации, которые при конкурсном отборе назначали меньшую цену своих работ. Так, мониторинг Онежского оз. осуществляли такие организации, как Новгородводхоз, а также РГГМУ (Санкт-Петербург), не имеющие не только плавсредств для ведения работ на озере, но и необходимой аналитической базы. При этом к реализации программы мониторинга Ладожского и Онежского озер не привлекался ни Карельский ЦГМС, ни ИВПС РАН, ни ИНОЗ РАН [Крупнейшие..., 2015], что существенно снижало качество ведения мониторинга.

В работе [Совершенствование..., 2013] проведено сравнение требований РД 52.24.309–2016 [2016], регламентирующих состав и сроки наблюдений на водоеме, и результатов мониторинга Ладоги в 2009–2013 гг. Полученные результаты оказались неутешительными. В указанный период времени количество пунктов наблюдений за гидрохимическими характеристиками на акватории Ладожского оз. сократилось со 104 в конце 80-х годов прошлого века до 14–16 в 2013 г. При этом измерения проводились 1 раз в год

в разные сезоны, а полученные результаты принимались за среднегодовые значения, что не допустимо. В последующие годы ситуация несколько улучшилась, но все равно полученные материалы не позволяли давать объективную оценку современного состояния и закономерностей функционирования экосистемы Ладоги. К основным недостаткам существующей системы наблюдений Росгидромета на Ладожском оз. могут быть отнесены, прежде всего, следующие факторы [Поздняков, Кондратьев, 2016]:

- отсутствие регулярных наблюдений за гидробиологическими и токсикологическими характеристиками, а также характеристиками донных отложений;
- неполнота программы гидрохимического мониторинга, представляющая собой неполный вариант обязательной программы наблюдений, в которую не включен ряд важных характеристик, рекомендованных в РД 52.24.309–2016 [2016] (например, pH, цветность, CO_2);
- существенное сокращение сети наблюдений на озере, при котором гидрологический мониторинг представлен только тремя береговыми станциями: Валаам, Петрокрепость и Сторожно, при этом измерения метеозлементов на акватории не проводятся. Водный баланс озера с начала 2000-х годов не составляется.

В соответствии с существующими нормативными документами, все эти работы должны выполнять подразделения Росгидромета, но этого не происходит.

В компетенцию институтов РАН, таких как ИНОЗ РАН и ИВПС РАН, а также других научных учреждений, работающих на Ладоге, входит формулировка предложений по возможному совершенствованию системы мониторинга на основе результатов собственных исследований. Все организации, не упомянутые в приведенном выше списке участников, не привлекаются к проведению государственного мониторинга водных объектов и Ладожского оз. в том числе.

ИНОЗ РАН, ИВПС РАН и другие научные организации в своих работах на Ладожском оз. акцентируют внимание на выполнении различных научных проектов, связанных с организацией детальных экспериментальных исследований в различных частях озера [Ладога, 2013; Ладожское..., 1992; 2000; 2002]. В настоящее время программа экспедиционных работ на Ладоге ежегодно корректируется в соответствии с задачами, стоящими перед Институтами. В качестве примера на рис. 8.2 представлена основанная на опыте многолетних исследований схема расположения станций отбора проб в акватории озера, с ориентацией на которую ежегодно планируются экспедиционные работы ИНОЗ РАН. Регулярность и комплексность многолетних исследований ИНОЗ РАН и ИВПС РАН с использованием собственных научно-исследовательских судов, современных аналитических методов и моделирования на Ладожском оз. и его водосборе позволяет давать объективную научно обоснованную оценку состояния изучаемого объекта и формулировать рекомендации по совершенствованию системы мониторинга.

В последние десятилетия в странах ЕС и США реализуется планомерный переход от чисто гидрохимических методов контроля к определению

биологических параметров окружающей среды. Подход к осуществлению мониторинга претерпевает значительный прогресс в плане стандартизации методов и понятий. Считается, что биоиндикация является наиболее перспективным и недорогим инструментом определения качества воды [Шитиков, Зинченко, 2005]. На базе американской системы RPBs (Rapid Bioassessment Protocols) и британской RIVPACS (River Invertebrate Prediction and Classification System) созданы подробные протоколы описания условий среды обитания различных сообществ организмов (в частности, перифитона, макрозообентоса и рыб) и математические средства их обработки. Так, в рамках RPBs функционирует подсистема PBMS (Performance-Based Methods System), обеспечивающая единообразное представление факторов абиотической среды и параметров состояния биогидроценозов в 20-балльной шкале для каждой точки отбора проб и их сопоставление с эталонным створом с целью окончательного ранжирования условий обитания. Для статистической оценки класса качества вод при мультистворном варианте в системе RPBs используется дискриминантный анализ, позволяющий идентифицировать комбинации переменных, обеспечивающих наилучшее разделение тестируемых и эталонных водоемов. Заключительным этапом является интеграция полученных данных, которая включает в себя установление взаимосвязей между биологическими показателями и экологическими условиями створов, а также представление соответствующего картографического материала.

Существенным толчком к развитию и совершенствованию методов биоиндикации в странах ЕС стала Европейская Рамочная директива (Water Framework Directive – WFD), принятая Европейским парламентом в 2000 г. [Directive..., 2000]. WFD и тесно связанная с ней информационная сеть EuroWaterNet образуют статистически стратифицированную систему унифицированных стандартов, приспособленную для решения конкретных задач охраны использования и управления водными ресурсами. Директива определяет развитие и совершенствование систем биоиндикации в странах ЕС [Solimini et al., 2006]. Согласно WFD вводится специальная процедура создания интеркалибровочной сети стран ЕС для оценки биологического состояния водных объектов каждого типа в соответствии с утвержденным реестром [Шитиков, Зинченко, 2005].

В настоящее время в WFD различают следующие методы мониторинга: наблюдательный мониторинг, оперативный мониторинг и научный (исследовательский) мониторинг. Наблюдательный мониторинг преимущественно обеспечивает оценку общего состояния поверхностных вод в речном бассейне или его части. Удобен для выявления масштабных и долгосрочных тенденций развития качества воды и экологического состояния водных объектов. Оперативный мониторинг – основной инструмент для оценки состояния водоемов, которые, возможно, не соответствуют экологическим нормам и контроля успешности реализации восстановительных и водоохранных мер. Исследовательский мониторинг имеет целью выявление причин, по которым качество воды конкретного водоема не может быть оценено как «очень хорошее» или «хорошее», а также для оценки масштаба пространственного воздействия случайного загрязнения.

По мнению специалистов Института глобального климата и экологии Росгидромета и РАН [Буйолов и др., 2016], принципиальное отличие зарубежного опыта от отечественной практики в области режимных гидробиологических наблюдений за качеством вод заключается в:

- тщательном подходе к выбору эталонных (условно-чистых, не загрязненных) створов или целых водных объектов, относительно которых проводится оценка качества вод;
- учете региональных особенностей (геологического, гидрологического, климатического, физико-химического состава вод и др.) при классификации водных объектов и, соответственно, выбора для их мониторинга оптимальных гидробионтов;
- использовании большого числа различных групп гидробионтов и их структурно-функциональных характеристик для расчета многочисленных индексов, которые регулярно проходят интеркалибрацию для возможности сопоставления данных и проведения транснациональных оценок качества вод [Ector, Rimet, 2005];
- интеграции гидробиологических и гидрохимических критериев в единые нормативы для проведения оценки и менеджмента качества водных объектов [Хромов и др., 2015].

С целью гармонизации Российской системы мониторинга водных объектов с Директивами Европейского Союза в Росгидромете разработаны рекомендации [Р 52.24.763–2012] по оценке состояния пресноводных экосистем по комплексу химико-биологических показателей. Оценку экологического благополучия или неблагополучия пресноводных экосистем рекомендуется выполнять на основе анализа физико-химических характеристик водной массы и донных отложений, а также гидробиологических, микробиологических и токсикологических (биотестовых) показателей основных сообществ водных организмов – представителей основных трофических уровней водной экосистемы. Для оценки используется комплекс показателей, состоящий из четырех групп: физико-химических, гидробиологических, микробиологических и токсикологических (биотестовых). Установлены оценочные характеристики и параметры, ранжированные для состояний относительно удовлетворительного, чрезвычайной экологической ситуации и экологического бедствия. При оценке ситуации учитываются несколько параметров и характеристик по показателям, определяемым в ходе мониторинга, из которых обязательными являются классы качества воды и параметры загрязненности опасными химическими веществами. Рекомендуется использовать информацию о наиболее существенных изменениях в водной экосистеме, указывающих на деградацию или угрозу для существования вследствие резкого ухудшения ее состояния. Эти изменения устанавливают, сравнивая полученные характеристики относительно удовлетворительного состояния с таковыми для состояний чрезвычайной экологической ситуации и экологического бедствия. При этом отмечается, что оценка является экспертной. Любое ранжирование параметров в классификациях и в особенности зоны перехода из одного ранга в другой являются условными. Так как по разным показателям, характеристикам и параметрам оценки могут не совпадать, то окончательное заключение рекомендуется делать по наи-

худшему варианту с указанием на другие варианты, по которым имеется расхождение. К сожалению, рассмотренные Рекомендации не получили в нашей стране должного распространения при выполнении государственного мониторинга на пресноводных объектах.

Так как специальных нормативных документов по осуществлению мониторинга на Ладожском оз. нет, то его организация должна проводиться в соответствии с Руководящими Документами (РД) и Рекомендациями МПРиЭ РФ и Росгидромета. Одним из основных является упомянутый ранее РД 52.24.309–2016 [2016], регламентирующий состав измерений, расположение станций, частоту отбора проб и др. характеристики. Указанный РД декларирует следующие основные принципы организации системы наблюдений: а) комплексность и систематичность наблюдений; б) согласованность сроков их проведения с характерными фазами гидрологического режима водных объектов; в) определение состава и свойств воды едиными или сопоставимыми методиками. При этом комплексность наблюдений должна обеспечиваться одновременностью проведения наблюдений по гидрохимическим, гидрологическим, гидробиологическим показателям и определением в донных отложениях таких загрязняющих веществ, как ХОП, нефтяные углеводороды, ПАУ и тяжелые металлы. Можно сказать, что нормативная база мониторинга водных объектов в России находится на достаточно высоком уровне, чего нельзя сказать о практической реализации рекомендаций многочисленных РД.

На сегодняшний день наиболее распространенным способом оценки состояния водных объектов является сравнение содержания в них примесей со значениями предельно допустимых концентраций (ПДК). ПДК в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования – максимальная концентрация вещества в воде, которая при поступлении в организм в течение всей жизни не должна оказывать прямого или опосредованного влияния на здоровье населения в настоящем и последующих поколениях, в том числе в отдаленные сроки жизни, а также не ухудшать гигиенические условия водопользования. ПДК в воде рыбохозяйственного водного объекта (эколого-рыбохозяйственная ПДК) представляет собой максимальную концентрацию загрязняющего вещества в воде водного объекта, при которой в водоеме не возникает последствий, снижающих его рыбохозяйственную ценность в ближайшее время и в перспективе или затрудняющих его рыбохозяйственное использование. Таблицы, содержащие как ПДК хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, так и рыбохозяйственные ПДК, приведены в работах [Нормативы..., 2018; Предельно..., 2007]. С использованием значений ПДК выполняются расчеты комплексных критериев оценки качества воды в водных объектах. Примером является удельный комбинаторный индекс загрязнённости воды (УКИЗВ), который рассчитывается в зависимости от количества критических показателей загрязнённости (КПЗ). Значение УКИЗВ определяется по частоте и кратности превышения ПДК по нескольким показателям и может варьировать в водах различной степени загрязнённости от 1 до 16 (для чистой воды 0). При этом большему значению индекса соответствует худшее качество воды [РД 52.24.309–2016].

В системе Росгидромета разработан обширный арсенал средств для оценки качества воды и экологического состояния водных объектов по широкому спектру показателей. В качестве примера можно привести РД 52.24.620–2000 [2000], где предложена методика оценки уровня антропогенного эвтрофирования пресноводных экосистем по приоритетным показателям перестройки структурной организации фитопланктонных сообществ при усилении антропогенного воздействия. Оценка эффекта антропогенного воздействия согласно упомянутому РД базируется на анализе пространственно-временного распределения общей численности фитопланктона со ссылкой на то, что фитопланктону принадлежит ведущая роль в индикации природных модификаций пресноводных экосистем, антропогенное воздействие на которые вызывает как эвтрофирующий, так и регрессирующий эффекты. Характер вариации значений общей численности фитопланктона предлагается определять по относительной плотности вариационного ряда Π_0 и моде M_0 модального интервала. Относительная плотность вариационного ряда Π_0 рассчитывается по формуле:

$$\Pi_0 = \frac{w}{K}, \quad (14.1)$$

где w – частота (доля того или иного интервала в сумме всех частот), %; K – разность между верхней и нижней границами интервала. Мода M_0 рассчитывается по формуле:

$$M_0 = x_{M_{\min}} + \frac{K(w_{M_0} - w_{M_0-1})}{(w_{M_0} - w_{M_0-1}) + (w_{M_0} - w_{M_0+1})}, \quad (14.2)$$

где $x_{M_{\min}}$ – нижняя граница модального интервала; w_{M_0} – доля частоты модального интервала; w_{M_0-1} – доля частоты интервала, предшествующего модальному; w_{M_0+1} – доля частоты интервала, следующего за модальным. По относительной плотности вариационного ряда Π_0 и моде M_0 модального интервала общей численности фитопланктона производится классификация эффектов антропогенного воздействия на водные экосистемы (табл. 14.1).

Таблица 14.1

Классификация эффектов антропогенного воздействия на водные экосистемы по общей численности фитопланктона

Эффект антропогенного воздействия	Мода M_0 , тыс. кл./мл	Относительная плотность Π_0 , %
Экологический регресс 100–300	0,5	100–300
Элементы экологического регресса	До 1,5	50–100
Антропогенное напряжение с элементами экологического регресса	До 2,0	20–60
Антропогенное напряжение	2,0–5,0	50–100
Антропогенное эвтрофирование	Выше 10,0	До 30

В Р 52.24.763–2012 [2012] содержатся рекомендации по оценке состояния пресноводных экосистем по комплексу химико-биологических показателей. Упомянутой оценке предшествует сбор исходной информации и расчет некоторых показателей в соответствии с нормативными документами Росгидромета. В число характеристик и параметров по физико-химическим показателям входят: классы качества воды, установленный по УКИЗВ [РД 52.24.643–2002] и по Директивам ЕС; наличие и концентрации нормируемых, в том числе опасных загрязняющих веществ для рыбохозяйственных водных объектов; загрязненность донных отложений [РД 52.24.609–2013]; коэффициент донной аккумуляции ЗВ; БПК₅; концентрация растворенного кислорода; концентрация биогенных соединений (различных форм азота и минерального фосфора); концентрация взвешенных веществ; pH. В число характеристик и параметров по гидробиологическим, микробиологическим и биотестовым показателям входят: класс качества воды, установленный по характеристикам планктонных сообществ, макрозообентоса и микробиологическим показателям [Р 52.24.309–2004]; характеристики состояния и параметры развития водных сообществ; характеристики трофического статуса (трофности) водного объекта (характеристики состояния фитопланктона, площадь «цветения», содержание хлорофилла-а); характеристика сапробности; параметры токсичности воды и донных отложений [РД 52.24.635–2002]. По комплексу приведенных показателей в соответствии с таблицами из Р 52.24.763–2012 [2012] состояние водного объекта может быть отнесено к следующим категориям: удовлетворительное состояние, чрезвычайная экологическая ситуация и состояние экологического бедствия.

Тем не менее, несмотря на значительное число РД, посвященных оценке качества воды и состояния водных объектов, в них есть ряд серьезных недоработок. Например, в настоящее время не только отсутствуют официально утвержденные региональные ПДК, но и нет ПДК для таких важнейших биогенных веществ, как общий фосфор ($P_{\text{общ}}$) и общий азот ($N_{\text{общ}}$), определяющих процесс эвтрофирования большинства пресноводных водоемов. Это при том, что в соответствии с Планом действий по Балтийскому морю (ПДБМ) [HELCOM..., 2007; 2013] $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ являются основными элементами, по которым должна сокращаться биогенная нагрузка на Балтику со стороны водосбора, включающего и водосбор Ладоги.

В действующих на сегодняшний день нормативах качества воды водных объектов рыбохозяйственного назначения [Нормативы..., 2018] содержание фосфат-иона PO_4 (по Р) в воде олиготрофных водоемов не должно превышать 0,05 мг/л, мезотрофных – 0,15 мг/л, и эвтрофных – 0,2 мг/л. При этом градация трофического состояния водоемов отсутствует. Однако как зарубежные источники [Хендерсон-Селлерс, 1987; Carlson 1977; Vollenweider, Kerekes 1980], так и российские [Хрисанов, Осипов, 1993], указывают, что к олиготрофным относятся водоемы с содержанием общего фосфора менее 0,01 мг/л, а переход из мезотрофного в эвтрофное состояние происходит при концентрациях 0,020–0,035 мг/л. Часто возникают многочисленные казусы, к числу которых, например, относится использование при расчетах нормативов допустимого воздействия (НДВ) для водосбора Финского залива в качестве ПДК по $P_{\text{общ}}$ значений 160 и 190 мкг/л [Приложения..., 2015а;

20156] без указания происхождения этих цифр. Тем не менее расчеты НДВ в приведенных примерах выполняются с ориентацией именно на такой уровень трофии, что недопустимо. Из сказанного следует, что указанные выше значения ПДК соответствуют содержанию фосфора в воде высокоэвтрофных водных объектов, а вовсе не олиготрофным и мезотрофным. Указанные недочеты выявлены и отражены в публикациях уже давно, однако никакой реакции со стороны МПРиЭ и Росгидромета пока не последовало.

Важной составляющей мониторинга поверхностных вод является прогноз экологического состояния (экологический прогноз) – предсказание будущего развития окружающей среды на данной территории в изменяющихся природных и техногенных условиях [Словарь по географии]. Прогнозы делятся по срокам (краткосрочные, среднесрочные, долгосрочные) и по масштабу (локальные, региональные, глобальные). К основным методам прогнозирования относятся статистические методы, экспертные оценки и моделирование.

Если разработанные в Росгидромете РД и Рекомендации по оценке качества воды и экологического состояния водоемов в большинстве своем ориентированы на удовлетворение потребностей государственного мониторинга водных объектов, то с разработкой методов прогноза возможных изменений гидрохимического и гидробиологического режимов водоема под воздействием различных хозяйственных и климатических факторов дела обстоят гораздо хуже. В качестве положительного примера можно привести, пожалуй, только рекомендации Р 52.24.755–2011 [2011], в которых рассматриваются методы прогнозирования содержания загрязняющих веществ в водных объектах во времени по результатам систематических гидрохимических наблюдений. В основу положено использование корреляционного анализа зависимости между значениями рассматриваемого ингредиента и значениями временных характеристик (конкретные годы, календарные месяцы, декады или сутки). Разработанный программный комплекс выполняет поиск уравнения регрессии, которое наиболее представительно характеризует линеаризованную статистическую связь между коррелируемыми признаками (между значениями ингредиента и значениями времени или между значениями часто и редко измеряемых ингредиентов), с использованием 16 видов уравнений. Для выполнения прогнозирования выбирают то уравнение, при расчетах по которому будет получено наименьшее отклонение расчетных данных от измеренных в действительности. Естественно, что при использовании такого подхода особенности и закономерности физико-химического функционирования водных экосистем оказываются за рамками рассмотрения.

В то же время для крупных озер и для Ладожского оз. в том числе очевидна острая потребность в прогнозах, имеющих целью как изучение объектов, так и предсказание их возможных изменений в будущем под воздействием хозяйственной деятельности и климатических изменений. К их числу относятся:

- прогноз распространения шлейфов сточных вод и вод притоков в акватории озера под воздействием гидрометеорологических факторов и внешних воздействий;

- прогноз эвтрофирования озера и его частей;
- прогноз ледовых явлений;
- прогноз изменений уровня озера в зависимости от гидрометеорологических факторов;
- прогноз изменений внешней нагрузки на озеро под воздействием хозяйственной деятельности и климатических изменений;
- прогноз заиливания мелководных акваторий речными наносами; и др.

На водосборе Ладожского оз. расположено большое количество промышленных и сельскохозяйственных предприятий, сбрасывающих стоки в притоки озера, присутствуют также прямые сбросы на акваторию [Ладога, 2013]. При этом контроль токсикологического и биологического загрязнения со стороны водосбора отсутствует, не выполняется и контроль загрязнения донных осадков, являющихся источником вторичного загрязнения. В то же время Ладожское оз. – безальтернативный источник питьевого водоснабжения Санкт-Петербурга. А система мониторинга Ладоги не контролирует риски, связанные с возможным ущербом для здоровья людей за счет неудовлетворительного качества воды, поступающей в водозаборы города.

Совершенствованию системы мониторинга Ладожского оз. и его водосбора в соответствии с рекомендациями WFD был посвящен проект ТАСИС «Разработка и реализация интегрированной программы природоохранного мониторинга Ладожского оз.: охрана и устойчивое использование ресурсов (DIMPLA)» [Развитие..., 1999]. В проекте участвовали: Невско-Ладожское водное бассейновое Управление, Комитет по Охране окружающей среды Республики Карелия, Институт озераведения РАН, Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Государственный комитет по охране окружающей среды Санкт-Петербурга и Ленинградской области, Университет Йоенсуу (Йоенсуу, Финляндия), Региональный Центр Окружающей среды Северной Карелии (Йоенсуу, Финляндия). В качестве экспертов проектных работ была привлечена группа исследователей из Финляндии, Швеции, Германии, Нидерландов и Канады. В рамках проекта выполнена оценка существующей на тот момент программы мониторинга на Ладоге и сравнение ее с программами мониторинга других больших озер. По результатам исследований определена общая схема системы мониторинга Ладожского оз., состоящая из следующих основных компонент:

- мониторинг источников внешней и внутренней нагрузки;
- гидрологический, метеорологический, химический, биологический, экотоксикологический, ихтиологический мониторинг озера;
- спутниковый мониторинг водосбора и акватории.

В проекте отмечено, что будущая программа мониторинга Ладожского оз. должна быть в большой степени сфокусирована на биологических индикаторах. Этот подход предусматривает увеличение объема прямых измерений биологических, а также физико-химических параметров, связанных с развитием биоты. Показана важная роль использования математических моделей, дающих возможность перейти от описательного, ретроспективного мониторинга к прогностическому с последующей экономической оценкой ущерба, наносимого озеру водопользователями. Также в проекте дана рекомендация по регулярному пересмотру и уточнению программы монито-

ринга с целью учета динамических изменений внешних воздействий и соответствующих рисков для экологической системы, здоровья людей и устойчивого использования водных ресурсов Ладожского оз. Сначала – ежегодно, а затем – через 5 лет. В дальнейшем рекомендации проекта DIMPLA успешно использовались при организации и проведении работ на Ладожском оз. и его водосборе ИНОЗ РАН и ИВПС РАН. Однако на совершенствование системы Государственного мониторинга Росгидромета эти рекомендации практически не повлияли.

По мнению авторов работы [Буйволол и др., 2016], при внедрении новых методов мониторинга в целях гармонизации и повышения качества данных необходимо переоснащение всех лабораторий, задействованных в системе мониторинга, единым комплектом оборудования и определителей. При этом контроль и обеспечение качества гидробиологических данных может быть осуществлен с выполнением комплекса мер лабораторной практики, заключающейся в следующем:

- техническое перевооружение региональных лабораторий унифицированным оптическим оборудованием, позволяющим обеспечить возможности фотофиксации высокой четкости, контроль определений и передачи изображения по сети Интернет;
- развитие взаимодействия между лабораториями по обмену данными и опытом;
- повышение квалификации специалистов, регулярное проведение научно-практической мероприятий (стажировки, семинары);
- проведение межлабораторных сличительных испытаний для проверки качества работ лабораторий УГМС на основе природных или стандартизованных образцов;
- участие лаборатории Института глобального климата и экологии Росгидромета и РАН как регионального научно-методического центра в международной интеркалибрации, координируемой Норвежским Институтом водных исследований (NIVA); проведение научно-методических инспекций лабораторий УГМС не реже 1 раза в 5 лет;
- создание базы данных гидробиологических наблюдений с использованием ГИС технологий.

Вопросы совершенствования системы мониторинга состояния экосистемы и качества воды Ладожского оз. и р. Невы рассмотрены в рамках проекта Федеральной целевой программы «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах» [Совершенствование..., 2013]. Отмечено, что необходимо существенно изменить и усовершенствовать систему мониторинга, используя при этом как опыт многолетних предшествующих работ, так и научно-технические достижения последних лет. Кроме стремления к максимально полному выполнению требований существующих РД по составу измерений, их частоте и расположению пунктов измерений, упомянутые усовершенствования должны выполняться в следующих основных направлениях.

Актуальным направлением развития мониторинга водных объектов является организация токсикологического и гидробиологического мониторинга в соответствии с требованиями РД 52.24.309–2016 [2016].

Необходимо организовать мониторинг состояния донных отложений, дополнив его следующими пунктами: а) ввести в рассмотрение дополнительные поддиапазоны частиц нанометрического масштаба; б) разработать расширенную систему методов гранулометрического анализа проб донных отложений с учетом частиц нанометрических размеров, где гидравлические методы измерений должны быть состыкованы с современными методами, использующими лазерные анализаторы крупности [Поздняков, 2016].

Перспективным является внедрение в систему наблюдений автономных буйковых станций, пригодных для использования в условиях Ладожского оз., в результате чего должна быть получена достаточно эффективная система контактных измерений параметров Ладожского оз.

Использование дистанционных методов измерений дает возможность проведения мгновенной съемки всей акватории озера. Спутниковая составляющая мониторинга характеризуется оперативностью и регулярностью получения данных, а также относительно низкими затратами по сравнению с проведением натурных измерений.

Необходимо правильно выбирать время проведения мониторинговых съемок, приурочив их к середине сезона, опираясь на информацию прежде всего о температуре поверхности воды, получаемую со спутников. Для гидрологической весны предпочтителен период, когда около 50% площади озера имеет температуру менее 4 °С. Для лета – период достижения наибольшего прогрева температуры поверхности воды. Для осени – период интенсивного выхолаживания и перемешивания в результате которого выравнивается температура воды (до 6 °С) как на поверхности, так и на глубине в результате заглубления слоя температурного скачка.

Плавсредства, на которых проводятся наблюдения, должны не только обладать современными средствами навигации и набором приборов для отбора проб воды и донных отложений, но и обеспечивать лабораторные условия для своевременной и оперативной обработки проб на химический и биологический анализы.

Выполнение мониторинга состояния экосистемы в зимний период требует отдельного рассмотрения. Наблюдений за качеством воды в это время могут носить эпизодический характер, а районы их выполнения должны быть ограничены небольшим удалением от берега.

Систему мониторинга Ладоги следует дополнить мониторингом водосборной территории с целью оценки притока воды и внешней нагрузки на озеро. Для этого необходимо организовать ежемесячные измерения расходов воды и отбор проб в замыкающих створах основных притоков – Волхова, Свири и Бурной. При этом следует обращать внимание на необходимость отбора проб воды на всех нормативно установленных вертикалях, а не только на прибрежных. Для оценки и прогноза биогенной нагрузки с водосбора целесообразно использовать данные спутникового мониторинга о структуре подстилающей поверхности [Кондратьев, 2016].

Так же, как и в случае с использованием материалов проекта DIMPLA, приведенные рекомендации пока не нашли своего отражения в изменениях системы государственного мониторинга Ладожского оз. и его водосбора.

В работах [Румянцев и др., 2012; Поздняков, Кондратьев, 2016] на основе опыта работ на Ладоге предложен ряд направлений развития методов оценки состояния водных объектов и прогнозирования их возможных изменений. Дальнейшее совершенствование способов оценки качества воды и экологического состояния Ладожского оз., прежде всего, должно заключаться в следующем.

Разработка региональных значений предельно допустимых концентраций (ПДК), учитывающих естественные геохимические аномалии с различным уровнем содержания природных соединений.

Разработка и совершенствование нормативов на загрязнение донных отложений.

Совершенствование и более широкое внедрение нормативов допустимого воздействия НДВ [Методические..., 2007], устанавливающих безопасные уровни содержания загрязняющих веществ, а также других показателей, характеризующих воздействие на водные объекты, с учетом природно-климатических особенностей водных объектов данного региона, сложившейся в результате хозяйственной деятельности природно-техногенной обстановки и целевого назначения водного объекта.

Совершенствование и более широкое внедрение метода экологически допустимых уровней воздействия ЭДУ [Левич, Терехин, 1997], который позволяет: 1) на основе биотических оценок экологического состояния водных экосистем провести диагностику экологического состояния тестируемой экосистемы, т.е. составить список факторов, значимо влияющих на возникновение экологического неблагополучия биоты; 2) вычислить ЭДУ значимых физико-химических характеристик водной среды; 3) провести ранжирование значимых факторов в зависимости от степени их опасности для экосистемы. В основе метода лежит биотическая концепция контроля природной среды, согласно которой оценки состояния экосистем на шкале «норма – патология» следует проводить не по уровням абиотических факторов (как, например, в концепции ПДК), а по комплексу биологических показателей.

Таблица 14.2

Классификация трофности водоемов по содержанию $P_{\text{общ}}$ с учетом гумусности [Лозовик, Ефременко, 2017]

	ультраолиготрофные	олиготрофные	мезотрофные	эвтрофные	высокоэвтрофные
Низкогумусные $P_{\text{общ}}^*$ мкг/л	2–4	4–10	10–25	25–60	60–150
Мезогумусные $P_{\text{общ}}^*$ мкг/л	2–5	5–12	12–30	30–75	75–190
Мезополигумусные $P_{\text{общ}}^*$ мкг/л	2–6	6–15	15–40	40–95	95–235
Полигумусные $P_{\text{общ}}^*$ мкг/л	3–8	8–20	20–50	50–125	125–310
	низкотрофные		среднетрофные		высокотрофные

Здесь же предлагается в качестве достаточно простой и в то же время адекватной системы оценки трофического статуса водоемов использовать классификацию, предложенную специалистами ИВПС РАН и приведенную в табл. 14.2 [Лозовик, Ефременко, 2017]. Основа классификации – содержание общего фосфора $P_{\text{общ}}$ с учетом гумусности воды, что актуально для условий северо-запада России. При этом в качестве ПДК разумно выбирать значения концентрации $P_{\text{общ}}$ ниже значений, соответствующих эвтрофному статусу.

Нужно отметить, что согласно нормативным документам Росгидромета при выполнении мониторинга водных объектов большое внимание должно уделяться оценке состояния водных объектов по гидробиологическим показателям. В соответствии с РД 52.24.309–2016 [2016] рекомендованная программа проведения мониторинговых наблюдений предусматривает определение следующих параметров:

- по фитопланктону: общая численность клеток, общее число видов, общая биомасса, численность основных групп, биомасса основных групп, численность синезеленых, доля синезеленых в общей численности, биомасса синезеленых, доля синезеленых в общей биомассе, число видов в группе, массовые виды и виды-индикаторы сапробности, индекс сапробности, класс качества воды;
- по зоопланктону: общая численность организмов, общее число видов, численность основных групп, биомасса основных групп, число видов в группе, массовые виды и виды-индикаторов сапробности, индекс сапробности, класс качества воды;
- по зообентосу: общая численность организмов, общая биомасса, количество групп по стандартной разборке, число видов в группе, общее число видов, биомасса основных групп, численность основных групп, индекс Вудивисса, индекс Гуднайта – Уитлея, индекс сапробности, класс качества воды;
- по перифитону: общее число видов; массовые виды, частоты встречаемости, сапробности;
- по микробиологическим показателям: общее количество бактерий, количество сапрофитных бактерий, отношение общего количества бактерий к количеству сапрофитных бактерий, класс качества воды;
- по степени трофности и интенсивности «цветения» воды: по содержанию хлорофилла, по фитопланктону;
- по макрофитам: проективное покрытие опытной площадки, характер распространения растительности, общее число видов, преобладающие виды, фенофаза, аномальные признаки, индекс сапробности.

Рекомендуется также проводить биотестирование. В качестве тест-объектов могут использоваться дафнии, цериодафнии, водоросли, парамеции, коловратки, рыбы. Как нетрудно видеть, официальные РД охватывают достаточно широкий круг гидробиологических показателей. Однако, к сожалению, в программу мониторинга Ладожского оз. они не включены.

Тем не менее, как в ИНОЗ РАН и ИВПС РАН, так и в других научных организациях в рамках исследовательских программ большое внимание уделяется использованию гидробиологических параметров для оценки состояния

и изменений экосистемы озера. Еще в 1989 г. в качестве методологии биомониторинга озерных экосистем предложен подход, основанный на оценке степени отклонения среды водоема от «нормального», естественного состояния [Курашов, 1989]. Он был успешно применен при оценке состояния Ладожского и Онежского озер на основе анализа сообществ мейобентоса с использованием оригинальных биоиндикационных индексов (Индекса характерных ракообразных, Таксономического индекса, Обобщенного экологического индекса) [Kurashov, Gorichenskiy, 1992; Курашов, 1994]. Применительно к литоральной зоне Ладожского оз. инструментом биомониторинга метод оценки стабильности водной экосистемы может стать метод оценки стабильности экологического состояния озерной среды на основе анализа низкомолекулярного метаболома (НМ) водных макрофитов [Курашов и др., 2018]. Отмечается, что данный метод по своей сути является интегральным и имеет целый ряд преимуществ перед стандартными методами мониторинга состояния озерных экосистем, которые он может эффективно дополнить.

Возможности развития прогностической части государственного мониторинга Ладожского оз. и его водосбора также рассмотрены в работах [Румянцев и др., 2012; Поздняков, Кондратьев, 2016]. Специалистами ИНОЗ РАН разработан ряд инструментов (математических моделей), позволяющих решать прогностические задачи, которые могут быть рекомендованы для внедрения в систему государственного мониторинга водных объектов. К их числу относятся:

- детерминированно-стохастическая модель формирования стока и внешней биогенной нагрузки;
- модель внутренней нагрузки;
- одномерные модели FLake и FLakeEco термического и кислородного режимов водоема;
- трехмерные модели гидродинамики, биохимического круговорота веществ и переноса растворенной примеси.

Детерминированно-стохастическая модель формирования стока и внешней биогенной нагрузки включает блок генерирования продолжительных рядов метеорологических элементов, которые затем используются в качестве входа в детерминированные блоки модели, описывающей сток и вынос примесей с водосбора [Кондратьев и др., 2016; Кондратьев, Шмакова, 2019]. Итогом моделирования является набор кривых распределения годовых значений стока и биогенной нагрузки.

Модель внутренней нагрузки основана на балансовой схеме представления основных потоков химического вещества (седimentации, захоронения и поступления из донных отложений в воду) в пограничной зоне «вода – дно». Рассчитывается суммарный поток со дна, формирующийся в результате действия различных механизмов. Разработаны две модификации метода – для крупных глубоководных водоемов, где массообмен на границе «вода – дно» происходит в стационарных (квазистационарных) условиях, и для мелководных водоемов, для которых характерна сезонная изменчивость условий формирования потоков [Ignatieva, 1999].

Модель FLake представляет собой универсальную одномерную математическую модель гидротермодинамики озера. Online-версия модели, а так-

же программный код модели для некоммерческого использования приведены на сайте <http://lakemodel.net/>. Модель FLakeEco предназначена для описания вертикального распределения концентрации растворенного кислорода в период открытой воды и ледостава. Идейно и структурно является продолжением модели FLake, которая здесь выступает в роли гидротермодинамического блока. Модель также включает параметризацию фотосинтеза фитопланктона [Golosov et al., 2007].

Трехмерная модель гидродинамики и переноса растворенной примеси, используемая в настоящее время в исследованиях ИНОЗ РАН, основана на модели гидродинамики внутреннего моря, разработанной в Институте вычислительной математики РАН [Ибраев, 2008], адаптированной к озерным условиям. Модель позволяет исследовать термический и ледовый режимы крупных озерных систем в условиях среднеклиматических атмосферных воздействий и при возможных климатических изменениях [Зверев и др., 2017; Голосов и др., 2020]. Модель также включает биотические блоки и блоки, описывающие внутреннюю нагрузку за счет массообмена с донными отложениями. Примеры результатов расчета по этой модели для Ладожского оз. представлены в Главе 12 настоящей монографии.

В настоящее время в этот список могут быть добавлены разработанные за последние годы двумерная модель течений и транспорта наносов в водоеме, а также трехмерная модель биогеохимического круговорота вещества в озере.

Двумерная модель течений и транспорта наносов в мелководном водоеме разработана в Институте озероведения РАН и основана на совместном решении уравнений мелкой воды в двумерной постановке и аналитической формулы расхода наносов [Рахуба, Шмакова, 2018; Кондратьев, Шмакова, 2019]. Модель позволяет рассчитывать не только пространственную структуру течений и траектории распространения примеси на акватории при различном ветровом воздействии и стоке с водосбора, но и вычислить изменения морфометрических характеристик ложа водоема, что актуально для южной мелководной акватории Ладоги. В зависимости от изменения транспортирующего потенциала потока соответствующая масса наносов или осаждается на дно, или, наоборот, вымывается с площади рассматриваемой ячейки и переносится в соседние.

Трехмерная модель биогеохимического круговорота вещества, которая ранее успешно применялась для оценки современного состояния и прогноза изменений экосистемы Балтийского моря в целом и Финского залива в частности [Рябченко и др., 2016; Isaev et al., 2017; Владимирова и др., 2018], может быть использована для описания механизмов изменений в экосистеме Ладожского оз. [Филатов и др., 2019]. При этом воспроизводимый моделью биогеохимический круговорот осуществляется процессами транспорта и трансформации с учетом динамики биогенных элементов в донных отложениях, служащих «памятью» эволюции озерной экосистемы и важнейшим звеном, замыкающим биогеохимический круговорот путем реминерализации биогенов [Savchuk, 2002; Рябченко и др., 2016]. Примеры результатов расчета по этой модели для Ладожского оз. представлены в Главе 12 настоящей монографии.

Часто возникают вопросы, связанные с непониманием отличия имитационных расчетов (вычислительного эксперимента) от прогноза. Разница здесь заключается в том, что при прогнозировании более четко определены начальные условия, более жесткие требования предъявляются к заданию возможных внешних воздействий и оценке достоверности получаемых результатов. Прогноз обязательно строится на понимании причинно-следственных связей изучаемых природных процессов. Прогностические модели могут использовать как условия, поставленные в начальный момент времени, так и результаты измерений, проводящихся в реальном масштабе времени [Румянцев, Кондратьев, 1981; Кондратьев, 2007]. Такие модели, получившие название адаптивных, предполагают наличие корректировки в ходе расчетов и обычно используются в практике оперативного прогнозирования.

Таким образом, на основании результатов анализа представленных материалов можно сделать вывод о том, что в настоящее время имеется достаточно серьезная научная основа для существенного развития системы государственного мониторинга Ладожского оз. и других водных объектов Северо-Запада России как за счет совершенствования системы наблюдений и методов оценки качества воды и экологического состояния водных объектов, так и за счет использования современных средств прогнозирования возможных изменений водных экосистем под воздействием хозяйственной деятельности и климатических изменений. В то же время складывается впечатление, что требования руководящих документов по осуществлению государственного мониторинга вошли в противоречие с реальными возможностями его проведения на конкретных водных объектах. В результате сегодня на крупных водоемах проводятся эпизодические бессистемные съемки по узкому перечню малообоснованных показателей, что совершенно не согласуется с понятием государственного мониторинга водных объектов в целом.

Насущной задачей становится поиск путей создания альтернативной реально реализуемой на практике системы мониторинга. Как отмечают авторы работ [Румянцев, Крюков, 2015; 2017], достижение успеха в решении этой задачи связано с тем, что «пора избавляться от иллюзии полного понимания и контроля за происходящими в водоемах процессами и стремления до бесконечности расширять перечень измеряемых при мониторинге показателей. В мире ежегодно выявляется множество новых малоизученных химических соединений. Даже частичное включение их в программу государственного мониторинга потребует колоссальных финансовых затрат на разработку нормативно-методической базы и окажется малопродуктивным и неподъемным для экономики любой страны».

Предлагается организовать двухкомпонентную систему государственного мониторинга крупнейших водоемов России, Ладоги в том числе, в которой целесообразно иметь две части: базовую и индивидуальную [Румянцев, Крюков, 2015; 2017]. Базовая часть мониторинга должна основываться на унифицированной программе с перечнем показателей изменений для всех без исключения крупнейших водоемов России. Этот перечень не должен быть излишне перегружен показателями, редко ис-

пользуемыми на практике и интересными лишь для узкого круга специалистов или отдельных потребителей. Цель базовой части государственного мониторинга крупнейших водоемов должна состоять в том, чтобы с помощью получаемых данных фиксировать основные процессы внутри водоема и их изменения под влиянием природных и антропогенных факторов. В базовую часть мониторинга должны быть включены только наиболее важные гидрологические, гидрохимические, гидробиологические и токсикологические показатели, а также основные характеристики донных отложений. Базовая часть мониторинга должна обеспечить сопоставимость и преемственность будущих данных мониторинга с имеющимися материалами наблюдений за прошлые годы. При этом обязательным условием для реализации системы мониторинга является согласование сроков и состава наблюдений, выполняемых мониторинговыми службами различных территориальных образований Росгидромета, в пределах которых расположен водный объект. Для условий Ладожского оз. – это Карелия и Ленинградская область.

Система государственного мониторинга крупнейших водоемов должна быть дополнена индивидуальной частью мониторинга [Румянцев, Крюков, 2015; 2017]. Последняя должна учитывать уникальность того или иного водного объекта, характер его использования и особенности хозяйственной деятельности на водосборе. Таким образом, для каждого крупнейшего водоема будет своя индивидуальная программа мониторинга и перечень измеряемых показателей. Индивидуальная часть государственного мониторинга Ладожского оз. должна быть ориентирована на получение информации, необходимой прежде всего для безопасного водоснабжения жителей северо-запада России. Так как нельзя исключать, что постоянное и длительное влияние ладожской воды на жителей территорий водосбора Ладоги является одной из важных причин роста заболеваемости населения и особенно детей [Румянцев, Крюков, 2015; 2017].

Естественно, что накопленный опыт многолетних натурных исследований и математического моделирования, представленный в настоящей монографии, может и должен быть использован при разработке как базовой, так и индивидуальной частей предлагаемой двухкомпонентной системы мониторинга Ладожского оз. и его водосбора. Предстоит разработать локальные методики мониторинга, учитывающие в том числе и индивидуальные особенности Ладоги, обусловленные геохимическими характеристиками ландшафта и уровнем антропогенного воздействия, что позволит быстро, экономично и продуктивно наладить работу по реализации нового государственного мониторинга крупнейшего озера Европы. «В целом, пора научиться смотреть правде в глаза и соизмерять желания с возможностями» [Румянцев, Крюков, 2015; 2017].

Предлагаемый состав основных блоков двухкомпонентной системы мониторинга Ладожского оз. представлен на рис. 14.1.



Рис. 14.1 – Основные блоки предлагаемой двухкомпонентной системы мониторинга Ладожского оз.

При этом базовая программа мониторинга разрабатывается Росгидрометом на основе существующих рекомендаций и руководящих документов с учетом реальных финансовых возможностей СЗ УГМС. Для выполнения индивидуальной программы целесообразно привлекать научные организации, имеющие опыт многолетних исследований Ладожского оз. и его водосбора. Более детальная разработка двухкомпонентной системы мониторинга Ладожского оз. и взаимосвязей между отдельными блоками этой системы является задачей ближайшего будущего.

Заклучение

Как отмечалось выше, Ладожское оз. является самым крупным озером Европы не только по площади его водной поверхности и объему заключенной воды, но и обладает самым обширным водосборным бассейном, который наряду с собственным (частным), включает также Сайма-Вуоксинский, Онежско-Свирский и Ильмень-Волховский водосборы. Суммарная площадь водосбора Ладожского оз. в 16 раз превышает площадь его водного зеркала, что обуславливает повышенную чувствительность экосистемы водоема к наблюдающимся в его бассейне явлениям и процессам. Поэтому учет происходящих на водосборе процессов, обусловленных как естественными (природными), так и антропогенными причинами, крайне важен при анализе любых изменений, происходящих с экосистемой озера. Ладожское оз. оказывает большое влияние на окружающую природную среду, а также на социально-экономическое развитие региона. Антропогенные воздействия в совокупности с климатическими вариациями существенным образом отражаются на гидротермодинамических и химико-биологических процессах в водоеме, определяющих его экологическое состояние.

За последние десятилетия на водосборе Ладожского оз., как и в большинстве регионов земного шара, происходят заметные изменения климатических условий, определяемые антропогенным потеплением. Наблюдается сокращение продолжительности морозного периода, увеличение средних зимних температур приземного воздуха, рост средних годовых температур, изменения режима осадков и влажности приземного слоя воздуха. Все это приводит к изменению норм целого ряда метеорологических характеристик, рассчитанных по данным наблюдений XX века. Приводимые в данной монографии средние значения температур и осадков по бассейну Ладожского оз. учитывают данные наблюдений XXI века, что определяет их отличие от опубликованных ранее.

Водосбор Ладожского оз. характеризуется высоким уровнем сельскохозяйственного и промышленного производства. Несмотря на целый ряд природоохранных мер, принятых еще в конце XX века и включающих закрытие и перепрофилирование ряда производств, вносящих основной вклад в загрязнение Ладожского оз., нагрузка на водоем остается высокой. С сельскохозяйственных полей продолжается вынос в водотоки и водоемы органического и минерального фосфора, а также плохо очищенных стоков животноводства. В отличие от сельскохозяйственных стоков, сточные воды от городов и промышленных предприятий поступают в Ладожское оз. локализовано, что обуславливает возникновение вблизи побережья точечных очагов загрязнения, крайне негативно отражающихся на конкретных водных биотопах. Такие очаги, прежде всего, охватывают устьевые участки рек, небольшие заливы и губы. Как результат, намечившееся в конце 1990-х годов улучшение экологического состояния Ладожского оз. замедлилось. Восстановление экосистемы водоема в различных его частях проходит неравномерно и сопровождается периодическим ухудшением целого ряда характеристик.

За последнее десятилетие в ИНОЗ РАН и сотрудничающих с ним организациях решён ряд важных фундаментальных и прикладных задач по изучению антропогенной трансформации экосистемы Ладожского оз. в условиях изменяющегося климата, существенно расширяющих имеющиеся представления о функционировании и развитии самого озера и его водосборной территории. Полученным новым результатам уделено особое внимание при подготовке настоящей монографии.

На основе спутниковой информации высокого разрешения проведена оценка расположенного на водосборе озерного фонда, включающего в том числе водоемы, не превышающие по площади 1 га. Рассчитано, что суммарное количество озер (естественных водоемов с площадью зеркала более 1 га) на общем Ладожском водосборе приближается к 23 тысячам, а малых водоемов (менее 1 га) – около 40 тыс. На Сайма-Вуоксинский водосбор приходится чуть менее половины всех дешифрируемых водоемов, на Онежско-Свирский – около четверти, на Ильмень-Волховский – $\sim 1/10$, и на собственно Ладожский – $\sim 1/6$. С учетом включения в расчет акваторий всех крупнейших озер, средняя озерность по всему Ладожскому водосбору оценивается в 16,3%. Полученные результаты позволяют конкретизировать роль тех или иных частей ладожского водосбора в формировании пространственно-временных изменений, имеющих место в водоеме, в том числе вызванных климатическими изменениями и антропогенной нагрузкой, и позволяют учесть локализацию последней при разработке и принятии необходимых природоохранных мер. Проведен расчет площади водной поверхности и ее изменений на основе дистанционной информации и современных компьютерных методов обработки с максимально возможной степенью детализации. С использованием каталогов данных Global Surface Water, полученных на основе спутниковой информации, проведен анализ изменений площадей водной поверхности бассейна с 1984 по 2019 г. в сезонном и многолетнем разрезе, связанных с происходящими изменениями климатических характеристик, а также возрастающим антропогенным воздействием. При этом оценивалась вся водная поверхность, без учета ее классификации на различные водные объекты суши (водоемы, речная сеть, области открытой воды на заболоченных участках водосбора). На «постоянную» воду приходится 89,6% от всей водной поверхности на водосборе, на «регулярную сезонную» – 3,80%. Большая часть «сезонной» поверхности воды приходится на Ильмень-Волховский водосбор. За исследуемый интервал времени 0,27% площади водной поверхности на водосборе исчезло. Анализ многолетних и сезонных изменений водной поверхности предоставляет дополнительную информацию для определения зон экологического риска.

Палеолимнологические исследования позволили проследить историю озера с позднеледникового периода и на протяжении всего голоцена. Установлено, что одним из основных факторов воздействия на озеро являлся климат. Повышение продуктивности в олиготрофном озере началось с бореального периода. Климат постепенно становился теплее. В это время уровень Ладоги снижался, и началось заболачивание берегов. Максимальное увеличение продуктивности Ладожского оз. отмечалось в атлантическом периоде, связанное с термическим оптимумом голоцена. Высокая продук-

тивность озера сохранялось также и на протяжении суббореального и первой половины субатлантического периодов. В это время помимо климатических на экосистему озера начали оказывать и антропогенные факторы. Около 1700 лет назад отмечено похолодание и снижение продуктивности озерной экосистемы. С наступлением индустриального периода отмечается усиление влияния антропогенных факторов. При этом накопление в донных отложениях свинца демонстрирует наибольшую вероятность антропогенного воздействия. Показано, что в разные периоды голоцена скорость седиментации в озере была различной и менялась от 0,03 до 0,16 мм в год. Самая низкая скорость осаждения характерна для центральной части озера в современный период. За последние 1300 лет сформировалось всего около 3 см осадка. При этом на скорость седиментации и накопление органического вещества в Ладожском оз. влияли в основном природные факторы. Показано, что история деятельности человека началась с первых поселений на побережье Ладоги около 10500 лет назад. Полученные данные позволяют датировать начало земледелия на водосборе Ладожского оз. около 5000–4000 лет до нашей эры, т. е. более ранним периодом, чем это считалось ранее. В связи с распространением земледелия начался процесс масштабной вырубki лесов, изменения ландшафтов и деградации почв.

С использованием методов детерминированно-стохастического моделирования выполнена оценка возможных изменений стока с водосбора Ладожского оз. и р. Невы под воздействием климатических факторов. Использован сценарий климатических изменений, разработанный совместными усилиями Института физики атмосферы, Главной геофизической обсерватории и ИНОЗ РАН именно для водосбора Ладожского оз. Рассчитанные средние значения годового стока составили 271 мм/год для современного периода и 254 мм/год для 2100 г. То есть согласно использованному климатическому сценарию, несмотря на существенное увеличение слоя осадков, следует ожидать снижения стока с изучаемого водосбора ориентировочно на 6,3% по отношению к современному периоду. Причиной указанного тренда может являться увеличение испарения за счет потепления, которое компенсирует возрастание осадков. Дана количественная оценка стока наносов с водосбора Ладоги и их поступления в озеро. Проведенные расчеты позволяют сделать вывод о том, что годовой сток наносов, поступающий в акваторию Ладоги, составляет около 432 тыс. т/год. Основными источниками наносов являются три крупных притока Ладожского озера – реки Свирь, Волхов и Вуокса, на долю которых приходится 253 тыс. т/год, или 59% от общего количества наносов, поступивших в озеро. При этом средний по водосбору Ладожского оз. годовой модуль твердого стока оценен в 1,53 т/(км²·год). Выполнена количественная оценка современной сельскохозяйственной нагрузки на ладожский водосбор. Показано, что в период 2014–2016 гг. сельскохозяйственная нагрузка составила 7444,4 т N/год и 434,6 т P/год. При этом внедрение наилучших доступных технологий (НДТ) может положительно сказаться на снижении сельскохозяйственной биогенной нагрузки на водные объекты водосбора Ладоги. Так на собственном (частном) водосборе Ладожского оз. возможно сократить поступление азота и фосфора от сельскохозяйственного производства более чем на 17

и 12% соответственно. Имитационное моделирование последствий гипотетических вырубок леса на экспериментальных лесных водосборах Карелии позволило оценить интервал возможных экстремальных изменений стока и выноса биогенных элементов. Так, после 100% вырубки леса можно ожидать увеличение стока с лесного водосбора на 48 мм/год и снижение выноса на $\sim 80\text{--}100 \text{ кгN/км}^2 \text{ год}$ и $\sim 2,5 \text{ кгP/км}^2 \text{ год}$. Последующее восстановление леса, снижение стока и связанное с ним возрастание значений выноса азота и фосфора, обусловленное увеличением листового опада, будет иметь продолжительность около 70–80 лет в зависимости от типа леса.

Разработаны методика и технические средства изучения донных ландшафтов различного иерархического уровня. С их помощью показано, что наибольшей структурной сложностью донных ландшафтов обладает прибрежная зона озера, причем имеются отличия для разных частей озера, во многом обусловленные морфометрическими особенностями берегового склона, что в свою очередь связано с геологическим строением. Выявлено, что с ростом крутизны склона наблюдается более резкая смена ландшафтных фаций и уменьшается их разнообразие. Высокая сложность ландшафтов выявлена для относительно пологих участков береговой зоны с неровным мезорельефом, сформированным за счет гляциальных моренных отложений. Построена карта-схема распределения плотности донных отложений Ладожского оз., демонстрирующая уменьшение плотности донных наносов при переходе от южных мелководных районов Ладоги к северным глубоководным. Показано, что плотность частиц донных отложений оказывает влияние как на результирующие формы донного ландшафта, так и на условия взаимодействия твердых частиц с водной массой в придонной зоне. Подтвержден вывод о значительном влиянии плотности донных наносов на гидродинамические процессы и необходимости учета ее вариаций.

Рисунок линейных форм рельефа и образованных ими линеаментов дна Ладожского оз. показывает блоковую расчлененность фундамента, подчиняющуюся 4 главным направлениям – меридиональному, широтному, диагональному СВ (40–50°) и диагональному ЮВ (140°). Т. е. направлениям планетарной трещиноватости, или регматической сети с преобладанием СЗ-ЮВ систем направлений. Несмотря на существенную разницу в типах рельефа в пределах северо-западной и юго-восточной частей дна Ладожского оз., общие направления линейных форм рельефа одинаковы для всего дна озера и в общем соответствуют направлениям сети планетарной трещиноватости Земли. Выделенная на дне озера сеть линеаментов совпадает с известными дизъюнктивами, и, следовательно, с некоторой долей условности, сеть разломов может быть прослежена вдоль линий линеаментной сети. Построена новая геоморфологическая карта, на которой отражены особенности геоморфологического строения дна озера. В частности, выполнено разделение площади дна озера на 3 крупные геоморфологические зоны: 1) структурно-денудационного долинно-грядового рельефа в северной части озера (зона Балтийского щита); 2) абразионно-аккумулятивного, в основном гляциального, рельефа в центральной части озера; 3) аккумулятивного рельефа в южной части озера. Выделяются также участки распространения прибрежного рельефа.

Выполнена оценка водного баланса Ладожского оз. за промежутки времени 1956–2018 гг. Приток в озеро оценивался как сумма притоков с 24 частных водосборов. Результаты расчета: приток $-70,16$, сток $-76,49 \text{ км}^3/\text{год}$. Осадки на поверхность озера и испарение с него оценивались по данным результатов наблюдений за температурой воздуха и осадками на метеостанциях Росгидромета. Результаты расчета: испарение $-8,17 \text{ км}^3/\text{год}$, осадки $-11,32 \text{ км}^3/\text{год}$. Значение притока грунтовых вод принималось равным $1,3 \text{ км}^3/\text{год}$ по оценкам предыдущих исследований. Невязка баланса составила $1,88 \text{ км}^3/\text{год}$, или 2,2% от суммарного значения расходной части ВБ. Для уточнения оценок элементов водного баланса требуется проведение современных измерений подземного притока в озеро.

Внутривековые колебания уровня озер Ладожского, Саймаа и Онежского когерентны в период до регулирования гидрологического режима, т. е. до середины 50-х годов XX в. Амплитуда и дисперсия флуктуаций уровня воды озер для периода регулирования примерно на 30% меньше, чем для периода до зарегулирования. Не выявлено общих глобальных закономерностей в изменчивости уровня крупных озер мира, которые позволили бы улучшить возможности долгосрочного прогноза внутривековых колебаний уровня. Природа колебаний уровня озер Ладожского и Онежского обусловлена сменой тенденций в транспорте тепла и влаги из северной Атлантики и Арктики в их бассейны. При этом зональный перенос влаги можно отнести к глобальному (главному) фактору изменчивости баланса влаги над водосборами, а меридиональный – к региональному фактору. Результаты расчетов показывают возможное сокращение транспорта влаги и уменьшение атмосферных осадков на Европейской части России в ближайшие 15–20 лет, из-за чего со сдвигом в несколько лет будет продолжаться падение уровня Ладожского оз. Режим уровня Онежского оз. регулируется работой ГЭС, здесь не так заметно влияние возможных изменений климата. Примерно с 2035 до 2070 г. транспорт влаги из Атлантики увеличится, что приведет к росту осадков и повышению уровня этих водоемов.

Выявлены тренды увеличения значений температуры воздуха на водосборе Ладоги в марте, апреле, мае, начиная с 1980 г., по сравнению с периодом 1945–1980 гг. В двадцать первом веке исчезновение 4-градусной изотермы на поверхности озера происходит на две-три недели раньше климатической нормы при резком уменьшении ледового покрытия в зимний период с более ранними датами устойчивого перехода температур воздуха через 0°C , а также уменьшением средней скорости ветра в период существования фронтальной зоны. Статистически значимые отклонения от климатических норм свидетельствуют об изменении внешних воздействий на экосистему озера. Определена среднегодовая температура воздуха, при которой Ладожское оз. не будет замерзать ($\sim 5,9^\circ\text{C}$). Из-за отсутствия льда на поверхности озера в будущие зимы будет происходить более раннее начало прогрева водной массы с увеличением поступления тепла и света, ветрового перемешивания при открытой поверхности, а также более раннее возникновение термической фронтальной зоны, полной стратификации озера и, как следствие, перестройка экосистемы Ладоги. Построены схемы поверхностных течений для определенных ветровых ситуаций и сезонов

с использованием метода максимальной кросс-корреляции, показана перспективность использования метода в условиях практического отсутствия прямых измерений течений.

Основные результаты гидрохимических исследований последних лет на Ладожском оз. и его притоках сводятся к следующему. В период 2011–2019 гг. слабо выраженный тренд снижения содержания общего фосфора наблюдался в воде рек Свирь, Бурная, Вуокса, Янис, Тулема, Паша, Авлога, Назия и Морье. Концентрация общего фосфора в озере после 2003 г. ни разу не превышала допустимого значения (15 мкг Р/л), оставаясь в 2009–2019 гг. в пределах 10–14 мкг Р/л, при этом в отдельные годы она снижалась до минимальных значений для всего периода наблюдений, начиная с 1976 г., и приближалась к значениям 1959–1962 гг., когда трофический статус озера оценивался как олиготрофный. Начиная с 2010 г., практически полное потребление фосфатов часто отмечалось не только в воде прибрежной зоны и в эпилимнионе, но и в гипolimнионе глубоководных зон. В 2016 г. низкая концентрация фосфатов наблюдалась в озере во все сезоны, а в сентябре 2016 г. впервые она оказалась ниже предела обнаружения во всех отобранных пробах воды как по вертикали, так и по акватории, что свидетельствовало об интенсивном обороте фосфора в водоеме. Существенных изменений в содержании общего азота в озере не зафиксировано. Наибольшие значения суммы главных ионов были отмечены в 2001–2004 гг. (до 71,6 мг/л), после чего наметилась тенденция снижения. В 2019 г. среднее значение суммы ионов в воде озера в летне-осенний период составляло 64,8 мг/л. Отмечено незначительное снижение значений рН в устьях основных притоков и в истоке р. Невы. Аналогичный тренд наблюдается и в озере. Как правило, кислородный дефицит не достигал критических значений, наиболее низкое относительное содержание O_2 (70%) отмечалось в Волховской губе осенью 2019 г. Исключением являлись заливы в северной части озера, отличающиеся от основной водной массы уровнем антропогенной нагрузки и изолированностью. В 2011–2019 гг. значения цветности и содержания общего органического углерода в воде рек были высокими и мало отличались от значений, относящихся к периоду 2001–2008 гг. Начиная с 2011 г. концентрация лабильного углерода и его доля в общем органическом углероде начинают постепенно снижаться во всех лимнических зонах озера (менее 10% общего углерода). В последние годы наблюдалось наименьшее за весь период наблюдений содержание органической взвеси. Воздействие антропогенного фактора проявлялось в повышенном содержании общего азота в стоке рек Волхова, Лавы, Назии, Морье и Авлоги, что является следствием их загрязнения. Заметное повышение концентрации общего фосфора фиксировалось в Авлоге. Отмечено ухудшение кислородного режима в изолированных заливах северной части озера, принимающих сбросы сточных вод. Так, в 2018–2019 гг. в мелководной части Сортавальского залива содержание кислорода в придонном слое в летний период снижалось до 24% насыщения (2,8 мг/л).

Гидробиологические исследования продуктивности фитопланктона свидетельствуют о мезотрофном и слабо-мезотрофном характере экосистемы в различных зонах. В период своего сезонного существования теплоинерт-

ная область имеет показатели продуктивности ультраолиготрофных вод. Для южных губ озера (Петрокрепость, Волховская губа) прослеживаются повышения продукционных показателей, возможно, обусловленные именно климатическим воздействием составляющей. С данными по фитопланктону согласуются данные по бактериопланктону, которые показывают, что трофический статус озера по общей численности бактериопланктона не изменился по сравнению с первым десятилетием XXI века. Одной из наиболее проблемных акваторий озера продолжает оставаться Волховская губа, характеризующаяся наибольшей продуктивностью. Она по-прежнему остается районом озера, наиболее подверженным антропогенному эвтрофированию и загрязнению, которые продолжают оставаться причиной/угрозой изменения экосистемы озера. Глубоководный и склоновый районы озера по структуре и количественному развитию зоопланктонного сообщества соответствуют олиготрофному статусу озерной экосистемы. Литоральная зона, мелководный и прибрежный районы бухты Петрокрепость и Волховской губы могут быть отнесены к мезотрофному типу. Исследования макрозообентоса показали, что в профундали озера видовой состав донных биоценозов, их доминирующий комплекс, соотношение основных групп остаются достаточно стабильными. При этом отмечается тенденция увеличения средних значений биомассы в северной глубоководной зоне и снижения этих показателей в южной части озера. Последнее обстоятельство вызывает беспокойство, т. к. снижение уровня воспроизводства бентосных беспозвоночных может быть обусловлено общим уровнем загрязнения южной части Ладоги. Данные, полученные при исследовании мейобентоса как в основной акватории, так и в литоральной зоне, выявили в открытой акватории озера в районе г. Питкяранта угнетение донной мейофауны на площади дна в несколько сотен квадратных километров, что определенно связано с негативным влиянием стоков Питкярантского целлюлозного завода, которые поступают непосредственно в открытую акваторию озера.

В настоящее время в Ладожском оз. активно идут процессы проникновения и распространения в нем видов-вселенцев, что приводит к трансформации всей экосистемы водоема. Этому активно способствуют климатические изменения, приводящие к увеличению температуры прибрежных вод озера, что сделало возможным вселение в озеро более теплолюбивых видов, понто-каспийских амфипод и дрейссены полиморфной. Особое беспокойство вызывает именно вселение в озеро дрейссены, мощного вида-эдификатора. Ладожская популяция моллюска еще слабо развита, представлена в основном одиночными особями и, по-видимому, пока не составляет значимой конкуренции аборигенным видам моллюсков. В то же время обнаруженная способность к длительному существованию в низкоминерализованной воде Ладоги в условиях климатического потепления указывает на ее возможную натурализацию и не исключает дальнейшего распространения вида в озере.

Одним из последствий антропогенно-климатической трансформации озера является формирование специфических группировок водных макрофитов, которые могут служить индикаторами этого процесса. Воздействие на прибрежную зону приводит к снижению общего синтеза низкомолекулярных органических соединений водными макрофитами и особенно ал-

лелопатически активных метаболитов, таких как карбоновые кислоты, что улучшает условия для развития нежелательных цианобактерий и тем самым ухудшает экологическое состояние водной среды в прибрежной зоне озера. Для литоральной зоны озера наиболее значимой является антропогенно-климатическая трансформация биоценозов, выражающаяся в формировании специфических растительных ассоциаций, усилении роли растительных и животных популяций видов-вселенцев и снижении контроля развития цианобактерий со стороны макрофитов в результате ослабления синтеза аллелохемиков.

Наиболее ценные ладожские виды рыб озерные формы сига и судак до настоящего времени имеют промысловое значение. За последние двадцать лет динамика уловов этих видов рыб имеет устойчивую тенденцию к снижению. Также наблюдается снижение их промысловых параметров и биологических показателей: возрастного состава, среднего возраста и размеров. Для короткоциклового озерного вида (корюшка и ряпушка) характерно чередование сезонов с высоким и низким уровнями изъятия, что связано с их коротким жизненным циклом. Вылов корюшки и ряпушки даже при интенсивном промысле не достигает их коэффициента естественной смертности. Такая особенность обеспечивает высокую воспроизводительную способность популяций этих рыб и их сегодняшнее состояние не вызывает тревоги, несмотря на падение их уловов.

Среди причин, определивших современное состояние запасов промысловых видов рыб, выделяются природные и антропогенные. Первые связаны с глобальными климатическими изменениями и соответствующей перестройкой ихтиоценоза водоема, а также с сокращением поступления биогенных элементов в озеро и низкими показателями кормового зообентоса. На природный фактор в водоеме накладываются антропогенные воздействия: неудовлетворительное экологическое состояние водоема; неудовлетворительное соблюдение действующих Правил рыболовства; интенсивный браконьерский лов, в т. ч. на нерестилищах; неполное отражение фактических уловов в статистической отчетности; мизерный объем работ по искусственному воспроизводству. Для сохранения запасов наиболее ценных в настоящее время промысловых видов рыб Ладоги необходимо принятие комплекса мер по устранению негативного антропогенного влияния на биоту озера. С этой целью требуется выполнение таких неотложных мер, как: оздоровление экологического состояния озера и его бассейна, прежде всего в районах нерестилищ; усиление мероприятий по охране рыбных ресурсов и соблюдению режимов рыболовства; значительное расширение работ по искусственному воспроизводству запасов ценных видов рыб; разработка и практическое исполнение мер по государственной поддержке ладожского рыболовства.

Одной из основных причин снижения запасов и уловов лососевых и сиговых рыб в рыбохозяйственных водоемах северо-западного региона, включая Ладожское оз., является воздействие токсикологического фактора на их кормовую базу и воспроизводство их как в естественных, так и в заводских условиях, что особенно выражено в период раннего онтогенеза. На существующих рыбозаводах в целях профилактики токсикоза

рыб необходима водоподготовка для очистки воды от взвешенных веществ, растворимых и эмульгированных соединений, включая нефтепродукты, наночастицы и ионы металлов. Можно рекомендовать реагентную обработку воды коагулянтами и флокулянтами с последующим отстаиванием и/или фильтрованием. Случаи превышения установленных нормативов содержания тяжелых металлов в пищевой рыбе обнаружены вблизи населенных пунктов с развитой промышленностью, в устьях рек, в бухтах с низким водообменом, что является тревожным симптомом, заставляющим в очередной раз задуматься о путях предотвращения дальнейшего загрязнения Ладоги.

Значительная часть экосистемы прибрежной зоны Валаамского архипелага сохраняет фоновый режим функционирования. Исключением является Монастырская бухта, для ее изолированной части, испытывающей более длительное антропогенное воздействие, отмечены серьезные перестройки в биологических сообществах. Это связано прежде всего с локальной антропогенной нагрузкой в виде коммунально-бытовых стоков поселка Валаам и функционированием причалов. После начала безаварийной работы очистных сооружений экологическая ситуация стала улучшаться, что говорит о высоком потенциале самоочищения водного объекта. В Малой Никоновской бухте источником антропогенного воздействия являлось рыбоборозное хозяйство. Здесь не выявлено существенных изменений лимнологических характеристик в поверхностных слоях водной массы по сравнению с открытой акваторией, что связано с интенсивным водообменом с остальной частью Ладоги. Однако, несмотря на относительно благополучную экологическую ситуацию в поверхностных горизонтах, на дне происходит накопление органических веществ. Бактериальное покрытие (мат), сформировавшееся в результате деятельности форелевого хозяйства, занимает треть площади кутовой части бухты, что отражается в характеристиках зообентоса и донных осадков. Озера, имеющие водообмен с Ладогой, также подвержены антропогенному воздействию. Наиболее продолжительное и интенсивное воздействие оказывается на оз. Сисяярви. Как результат – изменение трофического статуса, ухудшение газового режима. Мелиорационные работы на водосборе оз. Лещевое привели к изменениям в структурных показателях зоопланктона, но на данный момент существенно не затронули фитопланктон и гидрохимические параметры. Большинство малых озер Валаамского архипелага также сохраняют фоновый режим функционирования. Антропогенное воздействие затронуло экосистему оз. Никоновского. Здесь произошли существенные изменения прозрачности, цветности, а также газового режима, что связано с поступлением из мелиорационных канав не только органических веществ, но и минеральных взвесей в значительном объеме. В связи с небольшими глубинами и площадью зеркала, а также значительным удельным водосбором озеро характеризуется высокой уязвимостью. Увеличение температуры воды, которое можно связать с общим потеплением, пока не привело к увеличению количественного развития организмов планктона. В то же время влияние прогрева сказывалось на уменьшении различий между участками прибрежной зоны. Уменьшались значения вертикальных и горизонтальных градиентов температуры, содержания

кислорода и других гидрохимических параметров. Вследствие этого структура планктонных комплексов становилась менее разнообразной, высокого количественного развития достигали эврибионтные виды, значения показателей видового разнообразия существенно уменьшались. Анализ состояния всей водной системы Валаамского архипелага в 1996–2019 гг. показал, что прибрежная зона Ладожского оз. относится преимущественно к олиго- и мезотрофному типу. Монастырская бухта может классифицироваться как эвтрофный водоем. Озера Сисяярви и Лещевое, связанные с Ладогой протоками, а также малые озера имеют мезотрофный статус.

Впервые на акватории Ладожского оз. и его притоках проведены исследования по оценке загрязнения микропластиком. В образцах воды и донных отложений были идентифицированы частицы микропластика в диапазоне от 60 мкм до 5 мм. Минимальная концентрация частиц микропластика в водной толще на акватории Ладожского оз. зафиксирована в северной части, вблизи острова Валаам. В пробах прибрежной зоны северной части Ладоги в районе залива Импилахти концентрации составили в среднем 1,3, а вблизи о. Кухка – 1,1 частиц/литр. В восточных прибрежных зонах озера концентрация в среднем составляет 1,5 частицы/литр. В пробах донных отложений Ладожского оз. зафиксированы концентрации микропластика, существенно превышающие соответствующие значения в воде. В южной части акватории концентрации частиц микропластика в донных отложениях достигали 70 частиц/кг.

Достигнуты значительные успехи в создании и практическом применении моделей термогидродинамических процессов и экосистемы Ладожского оз. Модель гидродинамики внутреннего моря – МГВМ – адаптирована к озерным условиям, в нее включены дополнительные программные модули для расчета теплообмена через границу раздела вода – дно, и расчета первичного продуцирования в озерах, уравнение состояния морской воды заменено на уравнение состояния для слабоминерализованной воды [Зверев и др., 2016]. 3D-модель экосистемы [Исаев, Савчук, 2020] позволяет воспроизводить особенности концентраций и биомасс компонентов экосистемы в виде биогеохимического круговорота вещества. С использованием аппарата клеточных автоматов удастся описывать функционирование различных биотических сообществ в озере, включая динамику ихтиомассы рыб, и подойти, таким образом, к решению задачи оптимального выбора условий рыболовства при существенной размытости исходных данных. К сожалению, все перечисленные модели являются сугубо авторскими, т. е. применяются для решения задач применительно к условиям Ладоги только авторскими коллективами разработчиков.

В соответствии с результатами математического моделирования потепление климата по сценарию MPI B2 на величину до 5 °С к концу XXI века повлияет как на термический, так и на ледовый режимы озера, но сроки образования ледяного покрова в Ладожском оз. практически не изменятся. Потепление скажется прежде всего на скорости нарастания и таяния льда. При потеплении озеро может полностью покрыться льдом, однако его малая толщина до 10 см при среднеклиматических 20–25 см предопределяет ранние сроки таяния. Следует ожидать, что полное очищение Ладожского оз.

ото льда, возможно, будет происходить на 2–3 недели раньше по сравнению со среднеклиматическим атмосферным воздействием. Раннее исчезновение ледяного покрова приведет к временному сдвигу в процессах, определяющих термический режим озера в весенне-летний период. Образование термобара также начнется раньше на 2–3 недели, скорость его распространения по акватории озера будет выше. В результате весенне-летний термобар закончится в середине июня вместо середины июля при среднеклиматическом атмосферном воздействии. Как следствие, летний прогрев основной водной массы начнется почти на месяц раньше. При атмосферном воздействии, соответствующем климатическому сценарию, практически вся акватория озера прогреется до 20 °С, чего не бывает при среднеклиматическом воздействии. При таком развитии событий следует ожидать, что возможные климатические изменения способны привести к существенному изменению в термогидродинамических процессах в озере и, как следствие, в функционировании водной экосистемы. Сравнение результатов моделирования с натурными наблюдениями показывает, что различия между расчетными и измеренными значениями продукции фитопланктона составят $\pm 40\text{--}50\%$. Таким образом, использование математических моделей позволяет в какой-то мере восполнить отсутствие натурной информации в прогнозируемый период и получить представление о продукционных процессах, протекающих в озере в течение значительной части года.

На водосборе Ладожского оз. существует большое количество объектов накопленного экологического риска, требующих не только контроля, но и принятия мер по их ликвидации. Это сельскохозяйственные угодья южного побережья Ладоги, на которые вносятся экстремальные дозы органических удобрений с птицефабрик Синявинская и Северная, а также крайняя северная и южная части водосбора оз. Ильмень. Рекультивация загрязненных сельскохозяйственных территорий, а также внедрение наилучших доступных технологий ведения сельскохозяйственного производства на птицефабриках и животноводческих комплексах Северо-Запада в совокупности с современными методами мониторинга и контроля соблюдения технологий, являются приоритетными задачами для снижения биогенной нагрузки на водосбор Ладожское оз. и водные объекты его водосбора. Доля неутилизованных твердых коммунально-бытовых отходов на водосборе Ладожского оз. остается критически высокой – свыше 85%, что приводит к росту числа полигонов и свалок хранения отходов поликомпонентного состава. Выделяются несколько зон потенциально высоко уровня воздействия отходов: Южное Приладожье – Санкт-Петербургская агломерация, северное Приладожье – Сартавала – Питкяранта, север оз. Ильмень – Велико-Новгородская агломерация, а также северо-запад Онежского озера – район г. Петрозаводск. В зависимости от типологии объекта и степени отклонения параметров среды от нормативов восстановительные мероприятия могут заключаться в благоустройстве территории, экологической реабилитации, рекультивации и консервации, а также прямой ликвидации. Серьезной проблемой Ладожского оз. является загрязнение мелководного донного ландшафта твердыми бытовыми отходами, в первую очередь металлическими объектами, древесиной, резиновыми покрышками. Во мно-

жестве встречаются рыбацкие сети, в том числе и затонувшие. Выделяются прибрежные промышленные города: Питкяранта, Сортавала, Хийденсельга (Ляскеля), Приозерск, Шлиссельбург. Чрезвычайно много бытового мусора скапливается на дне в районе грузовых причалов. Согласно оценкам профессиональных аквалангистов, число затонувших судов по всей акватории Ладожского оз. исчисляется тысячами. Встречаются также остатки автомобильного и воздушного транспорта времен Великой Отечественной войны, большая часть которого сконцентрирована в районе прохождения Дороги жизни на юге Ладожского оз. Имеется ряд участков, где за счет специфики гидродинамических процессов происходит концентрация пластиковых отходов на небольшом участке берега и прилегающей к ней мелководной части акватории.

По данным гидрохимических и гидробиологических исследований к числу зон экологического риска на акватории Ладожского оз. могут быть отнесены: устья рек Свирь, Сясь, Волхов, Бурная, Кабона, Назия и Морье, Волховская губа, Щучий залив, акватории, прилегающие к г. Приозерск, п. Лахденпохья, г. Сортавала, г. Питкяранта, п. Ляскеля, п. Импилахти, бухты Петрокрепость, Хиденселька и Монастырская (о. Валаам), а также акватория судоходного фарватера. Причиной возникновения и существования этих зон являются, как правило, стоки населенных пунктов, промышленных и сельскохозяйственных предприятий, поступающие в заливы с замедленным водообменом, а также загрязненный сток притоков, как крупных (Волхов, Сясь, Свирь), так и относительно мелких (Назия, Морье, Кабона). Постоянный мониторинг существующих зон экологического риска является необходимым условием сохранения уникального водоема, каким является Ладожское оз., и предотвращения возникновения катастрофических ситуаций, связанных с возможным неконтролируемым негативным воздействием этих зон на весь водоем. Однако существующая система государственного мониторинга водных объектов в данном случае малоэффективна.

На основании результатов анализа материалов, представленных в Главе 14, можно сделать вывод о том, что в настоящее время имеется достаточно серьезная научная основа для существенного развития системы государственного мониторинга Ладожского оз. и других водных объектов северо-запада России как за счет совершенствования системы наблюдений и методов оценки качества воды и экологического состояния водных объектов, так и за счет использования современных средств прогнозирования возможных изменений водных экосистем под воздействием хозяйственной деятельности и климатических изменений. Однако, как показывает проведенный анализ, в существующих реалиях нашей страны практически все предложения и научные разработки по совершенствованию системы мониторинга так и остаются на бумаге. Складывается впечатление, что требования руководящих документов по осуществлению государственного мониторинга вошли в противоречие с реальными возможностями его проведения на конкретных водных объектах. Проводимые различными организациями на крупных водоемах эпизодические бессистемные съемки по узкому перечню малообоснованных показателей совершенно не согласуются с понятием государственного мониторинга водных объектов. В этой связи пред-

лагается организовать новую двухкомпонентную систему государственного мониторинга крупнейших водоемов России, Ладоги в том числе, в которой целесообразно иметь две части: базовую и индивидуальную. Базовая часть мониторинга должна основываться на унифицированной программе с перечнем показателей изменений для всех без исключения крупнейших водоемов России. В базовую часть мониторинга должны быть включены только наиболее важные гидрологические, гидрохимические, гидробиологические и токсикологические показатели, а также основные характеристики донных отложений. Базовая часть мониторинга должна обеспечить сопоставимость и преемственность будущих данных мониторинга с имеющимися материалами наблюдений за прошлые годы. При этом обязательным условием для реализации системы мониторинга является согласование сроков и состава наблюдений, выполняемых мониторинговыми службами различных территориальных образований Росгидромета, в пределах которых расположен водный объект. Для условий Ладожского оз. это Карелия и Ленинградская область. Система государственного мониторинга крупнейших водоемов должна быть дополнена индивидуальной частью мониторинга, которая должна учитывать уникальность того или иного водного объекта, характер его использования и особенности хозяйственной деятельности на водосборе. Таким образом, для каждого крупнейшего водоема будет своя индивидуальная программа мониторинга и перечень измеряемых показателей. Индивидуальная часть государственного мониторинга Ладожского оз. должна быть ориентирована на получение информации, необходимой прежде всего для безопасного водоснабжения населения. При этом базовая программа мониторинга разрабатывается Росгидрометом на основе существующих рекомендаций и руководящих документов с учетом реальных финансовых возможностей региональных управлений. Для выполнения индивидуальной программы целесообразно привлекать научные организации, имеющие опыт многолетних исследований на озерах и их водосборах.

Ранее отмечалось, что Ладожское оз. является удивительным объектом, в котором его огромные запасы качественной пресной воды и биологические ресурсы сочетаются с красотой побережья и представленными на нем памятниками природы, культуры, зодчества и истории государства Российского. Огромное социально-экономическое, стратегическое и геополитическое значение озера и его бассейна для страны, к сожалению, до сих пор недооценивается. Об этом, в частности, свидетельствуют принятые за последнее время законодательные и правительственные документы, в которых Ладога упоминается лишь вскользь, в то время как по другим водным объектам выпущены федеральные законы и целевые программы мер. Такое недопонимание значения Ладоги и непринятие должных водоохраных мер в области хозяйственной деятельности на водоеме и его водосборе может негативно сказаться на природном и социально-экономическом потенциале озера. Сказанное прежде всего относится к поступающим из Новгородской области загрязненным водам оз. Ильмень, из Республики Карелия – водам Онежского оз., из Финляндии – водам оз. Саймы. Для снижения их негативного воздействия нужны определенные скоординированные действия. Много нерешенных вопросов имеется и по самой Ладоге. Это проблема от-

сутствия системы мониторинга водоемов, не выявленная роль возможных выходов подземных вод и газов из многочисленных разломов в коренных породах дна озера, влияние растущего неорганизованного водного и наземного туризма, искусственного разведения рыбы на состояние экосистемы и качество воды литоральной зоны озера и т. д. Приходится еще раз напомнить о высокой социальной значимости Ладоги в качестве безальтернативного источника питьевого водоснабжения Санкт-Петербурга, когда любые ухудшения ее состояния и качества воды не проходят бесследно и негативно сказываются на здоровье жителей города, что уже не раз было показано в результатах прежних работ Института озераведения РАН. Настало время для принятия Федеральной целевой программы мер по Ладоге, в которой должен быть поставлен вопрос о возможном строительстве водовода из озера для подачи воды в водозаборы ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», создании дееспособной системы мониторинга водоема, развитии туристической инфраструктуры в Ладожском бассейне с полным осуществлением комплекса необходимых природоохранных мер, и т. д. Дальнейшая задержка с принятием Федеральной целевой программы мер чревата нанесением серьезного ущерба Северо-Западному региону РФ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Abatzoglou J. et al. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015 / J. Abatzoglou, S. Dobrowski, S. Parks et al. // Режим доступа свободный [Электронный ресурс]. – URL: <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191> (дата обращения: 01.01.2020).

Ackerman J.D. et al. A review of the early life history of zebra mussels (*Dreissena polymorpha*): comparisons with marine bivalves / J.D. Ackerman, B. Sim, S.J. Nichols, R. Claudi // *Canadian Journal of Zoology*. – 1994. – Vol. 72. – P. 1169–1179.

Afanasyev Y.D. Analysis of velocity field in the eastern Black Sea from satellite data during the Black Sea '99 experiment / Y.D. Afanasyev, A.G. Kostianoy, A.G. Zatsepin, P.-M. Poulain // *J. Geophys. Res.* – 2002. – Vol. 107. – No. 8. – P. 3098–4003.

Aksenov A.O. et al. Geomorphology of Lake Ladoga basin / A.O. Aksenov, A.E. Rybalko, M.A. Naumenko // *Limnology and Freshwater Biology*. – 2020. – Vol. 4. – P. 492–494. DOI:10.31951/2658-3518-2020-A-4-492.

Alenius T. Early Farming in the Northern Boreal Zone: Reassessing the History of Land Use in Southeastern Finland through High-Resolution Pollen Analysis / T. Alenius, T. Makkonen, A. Lahelma // *Geoarchaeology*. – 2013. – 28. – P. 1–24.

Alenius T. et al. Human-environment interaction during the Holocene along the changing shorelines of Ancient Lake Ladoga. Multiproxy analyses from Lake Bol'shoe Zavetnoe, the Karelian Isthmus, Russia / T. Alenius, D. Gerasimov, T. Sapelko et al. // *Holocene*. – 2020. – Vol. 30. – Issue 11. – P. 1622–1636.

Alenius T. Land-use history of Riekkalansaari Island in the northern archipelago of Lake Ladoga, Karelian Republic, Russia / T. Alenius, E. Grönlund, H. Simola, A. Saksa // *Vegetation History and Archaeobotany*. – 2004. – Vol. 13. – P. 23–31.

Amoatey P., Baawain M.S. Effects of pollution on freshwater aquatic organisms / P. Amoatey, M.S. Baawain // *Water Environment Research*. – 2019. – Vol. 91. – P. 1272–1287. DOI: <https://doi.org/10.1002/wer.1221>.

Andrady A.L. Microplastics in the marine environment / A.L. Andrady // *Marine Pollution Bulletin*. – 2011. – Vol. 62. – P. 1596–1605.

Andronikova I.N., Avinski V.A. General characteristics of Lake Ladoga zooplankton at present / I.N. Andronikova, V.A. Avinski // *Report of Lake Ladoga research in 1991–1993*. University of Joensuu. Publications of Karelian Institute. – Joensuu, 1994. – No. 111. – P. 81–91.

Annual conference GEOHAB 2019. Marine geological and biological habitat mapping: Abstracts. (Russia, St. Petersburg, May 13–17, 2019). – Spb.: VSEGEI Press. – 2019. – 240 p.

Araujo C.F. et al. Identification of microplastics using Raman spectroscopy: latest developments and future prospects / C.F. Araujo, M.M. Nolasco, A.M. P. Ribeiro, P.J. A. Ribeiro-Claro // *Water Research*. – 2018. – Vol. 142. – P. 426–440.

Arbačiauskas K. Ponto-Caspian amphipods and mysids in the inland waters of Lithuania: history of introduction, current distribution and relations with native malacostracans / K. Arbačiauskas // *Invasive Aquatic Species of Europe – Distribution, Impacts and Management*. – Eds. Leppäkoski E., Gollasch S., Olenin S. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. – 2002. – P. 104–115.

Arvola L. et al. The Impact of the Changing Climate on the Thermal Characteristics of Lakes / Arvola L. et al. // In D.G. George (ed.). – *The Impact of Climate Change on European Lakes*. – Aquatic Ecology Series 4. – 2010. – P. 85–101. DOI: 10.1007/978-90-481-2945-4_6.

Ashton K., Holmes L., Turner A. Association of metals with plastic production pellets in the marine environment / K. Ashton, L. Holmes, A. Turner // Mar. Pollut. Bull. – 2010. – Vol. 60. – P. 2050–2055.

Austin J.A., Allen J., Sensitivity of summer Lake Superior thermal structure to meteorological forcing / J.A. Austin, J. Allen // Limnol. Oceanogr. – 2011. – 56 (3). – P. 1141–1154.

Avinski V.A. et al. Plankton communities of Lake Ladoga under thermal bar conditions / V.A. Avinski, L. L. Kapustina, G. I. Letanskaja, E. V. Protopopova // Proceedings of the Third International Lake Ladoga Symposium. – Joensuu, 2000. – P. 21–26.

Barnes D.K. A. et al. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments / D.K. A. Barnes, F. Galgani, R. C. Thompson, M. Barlaz // Philosophical Transactions of the Royal Society B. – 2009. – Vol. 364. – No. 1526. – P. 1985–1998.

Battarbee R.W. Diatoms / R.W. Battarbee, V.J. Jones, R.J. Flower, et al. // Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Vol. 3. Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators. – New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2002. – P. 155–202.

Bennington V. et al. General circulation of Lake Superior: Mean, variability, and trends from 1979 to 2006 / V. Bennington, G.A. McKinley, N. Kimura, Ch.H. Wu // J. Geophys. Res. – 2010. – Vol. 115. – P. 12015. DOI: 10.1029 / 2010JC006261.

Berezina N.A. et al. Key role of the amphipod *Gmelinoides fasciatus* in reed beds of Lake Ladoga / N.A. Berezina, L.V. Zhakova, N.V. Zaporozhets, V.E. Panov // Boreal Environment Research. – 2009. – Vol. 14. – No. 3. – P. 404–414.

Berezina N.A. Food spectra and consumption rates of four amphipod species from the North-West of Russia / N.A. Berezina // Fundamental and Applied Limnology (Archiv für Hydrobiologie). – 2007. – Vol. 168. – No. 4. – P. 317–326.

Berglund B.E., Ralska-Jasiewiczowa M. Pollen analysis and pollen diagrams / B.E. Berglund, M. Ralska-Jasiewiczowa // Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology. – 1986. – P. 455–484.

Björck S. The late Quaternary development of the Baltic Sea basin / S. Björck // Assessment of climate change for the Baltic Sea Basin. – Berlin, Heidelberg, 2008. – P. 398–407.

Boström B. et al. Phosphorus release from lake sediments / B. Boström, M. Jansson, C. Forsberg // Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol. – 1982. – 18. – P. 5–59.

Boulion V.V., Hakanson L.A. A new general dynamic model to predict biomass and production of bacterioplankton in lakes / V.V. Boulion, L.A. Hakanson // Ecol. Model. – 2003. – Vol. 160. – P. 91–114.

Browne M.A. et al. Microplastic Moves Pollutants and Additives to Worms, Reducing Functions Linked to Health and Biodiversity / M.A. Browne, S.J. Niven, T.S. Galloway, S.J. Rowland, R. C. Thompson // Current Biology. – 2013. – Vol. 23. – No. 23. – P. 2388–2392.

Browne M.A., Galloway T.S. Spatial Patterns of Plastic Debris along Estuarine Shorelines / M.A. Browne, T.S. Galloway // Environmental Science & Technology. – 2010. – Vol. 44. – No. 9. – P. 3404–9.

Carlson R.E. A trophic state index for lakes / R.E. Carlson // Limnol. Oceanogr. – 1977. – Vol. 22. – P. 361–369.

Carlson R.E. Estimating Trophic State / R. E. Carlson // LakeLine. – 2007. – Vol. 27. – No. 1. – P. 25–28.

Carpelan C. On the history and recent studies of the "Antrea net find" / C. Carpelan // Iskos 16. – 2008. – P. 88–127.

Carpenter S.R. et al. Global change and fresh-water ecosystems / S.R. Carpenter, S.G. Fisher, N.B. Grimm, J.F. Kitchell // Annu. Rev. Ecol. Syst. – 1992. – No. 23. – P. 119–139.

Chen C.T., Millero F.J. Precise thermodynamic properties for natural waters covering only limnological range / C.T. Chen, F.J. Millero // *Limnol. Oceanogr.* – 1986. – Vol. 31 (3). – P. 657–662.

Chernov I., Tolstikov A. The White Sea: Available Data and Numerical Models / I. Chernov, A. Tolstikov // *Geosciences.* – 2020–10 (11). – P. 463–473. DOI: 10.3390/geosciences10110463.

Choudri B.S., Baawain M. Effects of Pollution on Freshwater Organisms / B.S. Choudri, M. Baawain // *Water Environment Research.* – 2016. – Vol. 88. – No. 10. – P. 1672–1692.

Cincinelli A. et al. Microplastic in the surface waters of the Ross Sea (Antarctica): Occurrence, distribution and characterization by FTIR / A. Cincinelli, C. Scopetani, D. Chelazzi, E. Lombardini, T. Martellini, A. Katsoyiannis, M. C. Fossi, S. Corsolini // *Chemosphere.* – 2017. – Vol. 175. – P. 391–400.

Clayton J., Edwards T. Aquatic plants as environmental indicators of ecological conditions in New Zealand lakes / J. Clayton, T. Edwards // *Hydrobiologia.* – 2006. – Vol. 570. – P. 147–151.

Cole J.J. et al. Bacterial production in fresh and saltwater ecosystems: A cross-system overview / J.J. Cole, S. Findlay, M.L. Pace // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* – 1988. – Vol. 43. – P. 1–10.

Copernicus: Europe's eyes on Earth // Режим доступа свободный [сайт]. – URL: <https://www.copernicus.eu/> (дата обращения: 01.01.2020).

Corradini F. et al. Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal / F. Corradini, P. Meza, R. Eguiluz, F. Casado et al. // *Science of The Total Environment.* – 2019. – Vol. 671. – P. 411–420.

Cózar A. et al. The Arctic Ocean as a dead end for floating plastics in the North Atlantic branch of the Thermohaline Circulation / A. Cózar, E. Martí, C.M. Duarte, J. Garcia-de-Lomas et al. // *Science Advances.* – 2017. – Vol. 3. – No. 4. – P. e1600582.

Currie D.J. Large-scale variability and interactions among phytoplankton, Bacterioplankton, and phosphorus / D.J. Currie // *Limnol. Oceanogr.* – 1990. – No. 35 (7). – P. 1437–14550.

Czekanowski J. Coefficient of racial likeness and durchschnittliche Differenz / J. Czekanowski // *Anthropol. Anz.* – 1922. – Vol. 9. – P. 227–249.

Davydova N. Palaeolimnology and sediments of Lake Ladoga: monitoring programme proposal / N. Davydova, D. Subetto, N. Belkina et al. // *Environmental monitoring in Lake Ladoga. Proposal for a monitoring programme. Karelian Institute. Working Papers.* – 2000. – P. 68–75.

Davydova N.N. Human impact on Lake Ladoga as indicated by long-term changes of sedimentary diatom assemblages / N.N. Davydova, M. Kukkonen, H. Simola, D. Subetto // *Boreal Environmental Research.* – 1999. – Vol. 4. – P. 269–275.

Delusin I. The Holocene pollen stratigraphy of Lake Ladoga and vegetational history of its surroundings / I. Delusin // *Annales Academiae Scientiarum Fennicae.* – 1991. – Series A III 153. – 66 p.

Directive 2000 / 60 / EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. – Official Journal, L 327, 22 / 12 / 2000. P. 0001–0073.

Dolukhanov P.M. et al. Holocene oscillations of the Baltic Sea and Lake Ladoga levels and early human movements / P.M. Dolukhanov et al. // *QUATERNARY INTERNATIONAL.* – 2010. – Vol. 220. – No. 1–2. – P. 102–111.

Dolukhanov P.M. Evolution of waterways and early human settlements in the eastern Baltic area: radiocarbon-based chronology / P.M. Dolukhanov, A.M. Shukurov, K.A. Arslanov et al. // *Radiocarbon.* – 2007. – Vol. 49. – No. 2 – P. 527–542.

Dolukhanov P.M. The Baltic Sea and Ladoga Lake transgressions and early human migrations in North-western Russia / P.M. Dolukhanov, D.A. Subetto, Kh.A. Arslanov et al. // *Quaternary International*. – 2009. – Vol. 203. – P. 33–51.

Döscher R. The development of the regional coupled ocean-atmosphere model RCAO / R. Döscher, U. Willén, C. Jones et al. // *Boreal Envir. Res.* – 2002. – Vol. 7. – P. 183–192.

Dupont F. A NEMO-based modelling system for the Great Lakes / F. Dupont, C. Padala, H. Anning et al. // *15th Workshop on Physical Processes in Natural Waters*. Burlington, 2011. – P. 46–52.

ECMWF / European Centre for Medium-Range Weather Forecasts // Режим доступа свободный [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ecmwf.int> (дата обращения: 01.12. 2020).

Ector L., Rimet F. Using bioindicators to assess rivers in Europe: An overview / L. Ector, F. Rimet // *Modelling Community Structure in Freshwater Ecosystems* / Ed. S. Lek et al. – Berlin: Springer Verlag, Heidelberg. – 2005. – P. 7–19.

Emery W.J. An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images / W.J. Emery, A.C. Thomas, M.J. Collins, W.R. Crawford, D.L. Mackas // *J. Geophys. Res.* – 1986. – Vol. 91. – No. 11. – P. 12865–12878.

Endo S. et al. Concentration of polychlorinated biphenyls (PCBs) in beached resin pellets: Variability among individual particles and regional differences / S. Endo, R. Takizawa, K. Okuda, H. Takada et al. // *Marine Pollution Bulletin*. – 2005. – Vol. 50. – No. 10. – P. 1103–1114. DOI: 10.1016 / j. marpolbul. 2005.04.030.

Fendall L.S., Sewell M.A. Contributing to marine pollution by washing your face: Microplastic in facial cleansers / L. S. Fendall, M.A. Sewell // *Marine Pollution Bulletin*. – 2009. – Vol. 58. – P. 1228–1255.

Feng M. et al. A global, high-resolution (30-m) inland water body dataset for 2000: first results of a topographic – spectral classification algorithm / M. Feng, J.O. Sexton, S. Channan, J.R. Townshend // *International Journal of Digital Earth*. – 2016. – 9:2. – P. 113–133. DOI: 10.1080 / 17538947.2015.1026420.

Fer I. et al. Observations of mixing near the sides of a deep lake in winter / I. Fer, U. Lemmin, S.A. Thorpe // *Limnol. Oceanogr.* – 2020. – 47. – P. 535–544.

Fichota Cédric G. et al. Assessing change in the overturning behavior of the Laurentian Great Lakes using remotely sensed lake surface water temperatures / Cédric G. Fichota, K. Matsumoto, B. Holt, M.M. Gierach, K. S. Tokos // *Remote Sensing of Environment*. – 2019. – Vol. 235. – P. 111427.

Filatov N.N. et al. Modern changes in the ecosystem of Lake Onego with climate warming / N.N. Filatov, N.M. Kalinkina, E.V. Tekanova // *Limnol. and Freshwater Biol.* – 2018. – Vol. 1. – P. 15–17. DOI: 10.31951 / 2658-3518-2018-A-1-15.

Fink P. Ecological functions of volatile organic compounds in aquatic systems / P. Fink // *Marine and freshwater behaviour and physiology*. – 2007. – Vol. 40. – No. 3. – P. 155–168. DOI: 10.1080 / 10236240701602218.

FLake // Режим доступа свободный [Электронный ресурс]. – URL: www.lakemodel.net (дата обращения: 01.12. 2020).

Frias J.P. G. L. et al. Organic pollutants in microplastics from two beaches of the Portuguese coast / J.P. G. L. Frias, P. Sobral, A. M. Ferreira // *Marine Pollution Bulletin*. – 2010. – Vol. 60. – No. 11. – P. 1988–1992. DOI: 10.1016 / j. marpolbul. 2010.07.030.

Gachenko A. S. Development of an integrated GIS for monitoring of anthropogenic impact on the Coastal Area of Lake Baikal / A. S. Gachenko, A. E. Hmel'nov, R. K. Fedorov, E. S. Fereferov // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. – 2018. – 11 (8). – P. 946–955.

Gade M. et al. Mesoscale surface current fields in the Baltic Sea derived from multi-sensor satellite data / M. Gade, B. Seppke, L. Dreschler-Fischer // *International Journal of Remote Sensing*. – 2012. – Vol. 33. – P. 3122–3146. DOI: 10.1080 / 01431161.2011.628711.

Garton D.W., McMahon R., Stoeckmann A.M. Limiting Environmental Factors and Competitive Interactions between Zebra and Quagga Mussels in North America / D.W. Garton, R. McMahon, A.M. Stoeckmann // *Quagga and Zebra Mussels: Biology, Impacts, and Control* / Nalepa T.F., Schloesser D.W. (eds). – CRC Press: Boca Raton, USA. – 2013. – P. 383–402. DOI: 10.1201 / b15437–6.

George D. G. (ed.) *The Impact of Climate Change on European Lakes* / D. G. George // *Aquatic Ecology Series 4*. – 2010. – 492 p. DOI: 10.1007 / 978-90-481-2945-4_6.

George G., Hurley M., Hewitt D. The impact of climate change on the physical characteristics of the larger lakes in the English Lake District / G. George, M. Hurley, D. Hewitt // *Freshw. Biol.* – 2007. – 52. – P. 1647–1666. DOI: 10.1111 / j. 1365–2427.2007.01773. x.

Gerasimov D., Kriiska A. Early-Middle Holocene archaeological periodization and environmental changes in the Eastern Gulf of Finland: Interpretative correlation / D. Gerasimov, A. Kriiska // *Quaternary International*. – 2018. – 465. – P. 298–313.

Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L. Production, use, and fate of all plastics ever made / R. Geyer, J.R. Jambeck, K.L. Law // *Science Advances*. – 2017. – Vol. 3. – No. 7.

Global Surface Water Explorer // Режим доступа свободный [сайт]. – URL <https://code.earthengine.google.com/> (дата обращения: 01.01.2020).

Golitsyn G. S. Changes of temperature of air and precipitation for the Lake Ladoga basin according to results of long-term integration of ECHAM4 / OPYC and HadCM3 models / G. S. Golitsyn, L. K. Efimova, I. I. Mokhov et al. // *Proc. Of the Fourth International Lake Ladoga Symposium 2002* / Eds: H. Simola, A. Yi. Terzhevik, M. Viljanen et al. Joensuu, 2003. – P. 449–455.

Golosov S. Climate change impact on thermal and oxygen regime of Shallow lakes / S. Golosov, A. Terzhevik, I. Zverev et al. // *Tellus*. – Vol. 64. – 2012. – P. 1–11.

Golosov S. Physical background of the development of oxygen depletion in ice-covered lakes / S. Golosov, O.A. Maher, E. Shipunova, A. Terzhevik, G. Zdorovenova, G. Kirillin // *Oecologia*. – 2007. – Vol. 151. – P. 331–340.

Goodnight C.J., Whitley L. S. Oligochaetes as indicators of pollution / C. J. Goodnight, L. S. Whitley // *Proceedings of the 15th Industrial Waste Conference Eng.* – *Pardne Univ. Ext. Ser.* – 1961. – P. 106–139.

Google Earth Engine // Режим доступа свободный [Электронный ресурс]. – URL <https://code.earthengine.google.com/> (дата обращения: 01.01.2020).

Grabowski M. et al. Alien Crustacea in Polish waters – Amphipoda / M. Grabowski, K. Jażdżewski, A. Konopacka // *Aquatic Invasions*. – 2007. – Vol. 2. – No. 1. – P. 25–38.

Gritchenko Z.G. Joint Russian-Finnish study of radioactive contamination in the NW part of Lake Ladoga / Z.G. Gritchenko, L. V. Ivanova, Y.A. Panteleev et al. // *Hydrobiologia*. – 1996. – 322. – P. 125–128.

Gromig R. Deglaciation history of Lake Ladoga (northwestern Russia) based on varved sediments / R. Gromig, B. Wagner, V. Wennrich et al. // *Boreas*. – 2019. – Vol. 48. – P. 330–348.

Gronewold Andrew D., Craig A. Stow. Water Loss from the Great Lakes / D. Gronewold Andrew, Craig A. Stow // *Science* 07 Mar 2014. – Vol. 343. – Issue 6175. – P. 1084–1085. DOI: 10.1126 / science. 1249978.

Gustafsson E. Key processes in the coupled carbon, nitrogen, and phosphorus cycling of the Baltic Sea / E. Gustafsson, O.P. Savchuk, B. G. Gustafsson, B. Muller-Karulis // *Biogeochem.* – 2017. – Vol. 134. – P. 301–317.

Haralick R.M., Shapiro L.G. Computer and Robot Vision. V. II / R.M. Haralick, L.G. Shapiro // Addison-Wesley. – 1992. – P. 316–317.

Harbeck G.E. A practical field technique for measuring reservoir evaporation utilizing mass-transfer theory / G.E. Harbeck. – US Government Printing Office, 1962. – T. 272. – 105 p.

Harris P.T. Seafloor Geomorphology as Benthic habitat: GEOHAB Atlas of seafloor geomorphologic features and benthic habitats – synthesis and lessons learned / P.T. Harris, E.K. Baker // GEOHAB Atlas of seafloor geomorphologic features and benthic habitats (First edition). – 2012. – P. 871–890.

Hebert P.D. et al. Ecological and genetic studies on *Dreissena polymorpha* (Pallas): a new mollusk in the Great Lakes / P.D. Hebert, B.W. Muncaster, G.L. Mackie // Can J Fish Aquat Sci. – 1989. – Vol. 46. – P. 1587–1591.

Hegazy A.K. Allelopathic effect of *Nymphaea lotus* L. on growth and yield of cultivated rice around Lake Manzala (Nile Delta) / A.K. Hegazy, W.M. Amer, A.A. Khedr // Hydrobiologia. – 2001. – Vol. 464. – P. 133–142. DOI: 10.1023 / A:1013943318230.

Hegazy A.K. Allelopathic effect of *Nymphaea lotus* L. on growth and yield of cultivated rice around Lake Manzala (Nile Delta) / A.K. Hegazy, W.M. Amer, A.A. Khedr // Hydrobiologia. – 2001. – Vol. 464. – P. 133–142. DOI: 10.1023 / A:1013943318230.

HELCOM Baltic Sea Action Plan. – Helsinki, Finland: Helsinki Commission Publ, 2007. – 103 p.

HELCOM Copenhagen Ministerial Declaration: Taking Further Action to Implement the Baltic Sea Action Plan // Reaching Good Environmental Status for a healthy Baltic Sea. – Copenhagen, Denmark, 2013. – 19 p.

HELCOM, Sources and pathways of nutrients to the Baltic Sea. // Baltic Sea Environment Proceedings No. 153. – 2018. – 47 p.

Hengl T., Gupta S. Soil water content (volumetric %) for 33kP. and 1500kP. suction predicted at 6 standard depths (0, 10, 30, 60, 100 and 200 cm) at 250 m resolution / T. Hengl, S. Gupta // Режим доступа свободный [База данных]. – URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.2629589> (дата обновления: 05.04.2019).

Hidalgo-Ruz V. et al. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification / V. Hidalgo-Ruz, L. Gutow, R.C. Thompson, M. Thiel // Environmental Science & Technology. – 2012. – Vol. 46. – No. 6. – P. 3060–3075.

Hobbie L.E. et al. Use of nucleopore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy / L.E. Hobbie, R.I. Daley, S. Jasper // Appl. and Environ. Microb. – 1977. – 33 (5). – P. 1225–1228.

Holopainen A.-L., Letanskaya G.I. Effects of nutrient load on species composition and productivity of phytoplankton in Lake Ladoga / A.-L. Holopainen, G.I. Letanskaya // Boreal Environmental Research. – 1999. – Vol. 4. – P. 215–227.

Hu H., Hong Y. Algal-bloom control by allelopathy of aquatic macrophytes – A review / H. Hu, Y. Hong // Front. Environ. Sci. Engin. China. – 2008. – Vol. 2. – No. 4. – P. 421–438. DOI: 10.1007 / s11783-008-0070-4.

Hua X. Y. et al. Bioavailability of phthalate congeners to earthworms (*Eisenia fetida*) in artificially contaminated soils / X. Y. Hua, B. Wen, S. Zhang, X. Q. Shan // Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2005. – Vol. 62. – P. 26–34.

Huang A. et al. On Recent Trends in Atmospheric and Limnological Variables in Lake Ontario / A. Huang, Y.R. Rao, W. Zhang // J. of Climate. – 2012. – Vol. 25. – P. 5807–5816. DOI: 10.1175 / JCLI-D-11-00495.1.

Ignatieva N.V. Nutrient exchange across the sediment-water interface in the eastern Gulf of Finland / N.V. Ignatieva // Boreal Environment Research. – 1999. – Vol. 4. – P. 295–305.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report // Режим доступа свободный [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ipcc.ch/> (дата обращения: 25.11.2020). – 2007.

IPCC: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, et al. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New-York, NY, USA, 2001. – 881 p.

IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, et al. – Cambridge Univ. Press. – Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. – 2013. – 1535 p.

Isaev A. V. et al. Model estimates of the impact of bioirrigation activity of *Marenzelleria* spp. on the Gulf of Finland ecosystem in a changing climate / A. V. Isaev, T. R. Eremina, V. A. Ryabchenko, O. P. Savchuk // J. Mar. Syst. – 2017. – Vol. 171. – P. 81–88.

Jaccard P. Distribution de la flore alpine dans le Bassin des Dranses et dans quelques regions voisines / P. Jaccard // Bull. Soc. Vaudoise sci. Natur. – 1901. – Vol. 37. – Bd. 140. – P. 241–272.

Jasechko S., Gibson J. J., Edwards T. W. D. Stable isotope mass balance of the Laurentian Great Lakes / S. Jasechko, J. J. Gibson, T. W. D. Edwards // Journal of Great Lakes Research. – 2014. – Vol. 40. – P. 336–346.

Jasser I., Arvola L. Potential effects of abiotic factors on the abundance of autotrophic picoplankton in four boreal lakes / I. Jasser, L. Arvola // Journal of Plankton Research. – 2003. – 25. – P. 873–883.

Jorgensen S. E. A review of recent developments in lake modeling / S. E. Jorgensen // Ecol. Modelling. – 1994. – Vol. 221. – P. 689–692.

JRC Global Surface Water Mapping Layers, v1.2. // Режим доступа свободный [Электронный каталог]. – URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/JRC_GSW1_2_GlobalSurfaceWater (дата обращения: 01.01.2020).

JRC Global Surface Water Metadata, v1.2 // Режим доступа свободный [Электронный каталог]. – URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/JRC_GSW1_2_Metadata (дата обращения: 01.01.2020).

JRC Monthly Water History, v1.2. // Режим доступа свободный [Электронный каталог]. – URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/JRC_GSW1_2_MonthlyHistory (дата обращения: 01.01.2020).

JRC Monthly Water Recurrence, v1.2 // Режим доступа свободный [Электронный каталог]. – URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/JRC_GSW1_2_MonthlyRecurrence (дата обращения: 01.01.2020).

JRC Yearly Water Classification History, v1.2. // Режим доступа свободный [Электронный каталог]. – URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/JRC_GSW1_2_YearlyHistory (дата обращения: 01.01.2020).

Juggins S. C2 Version 1.5 User guide. Software for ecological and palaeoecological data analysis and visualisation / S. Juggins. – Newcastle upon Tyne: Newcastle University, 2007. – 73 p.

Jungclaus J. H. Ocean circulation and tropical variability in the coupled ECHAM5 / MPI-OM / J. H. Jungclaus, M. Botzet, H. Haak et al. // J. Climate. – 2006. – Vol. 19. – P. 3952–3972.

Jussila T., Kriiska A. Shore displacement chronology of the estonian stone age / T. Jussila, A. Kriiska // Est. J. Archaeol. – 2004. – 8 (1). – P. 3–32.

Kalnay E. et al. The NCEP / NCAR 40-year reanalysis project / E. Kalnay et al. // Bulletin of the American Meteorological Society. – 1996. – Vol. 77. – No. 3. – P. 437–470.

Kamachi M. Advective surface velocities derived from sequential images for rotational flow field: limitations and applications of maximum cross correlation method with rotational registration / M. Kamachi // J. Geophys Res. – 1989. – Vol. 94. – No. 12. – P. 18227–18233.

Kapanen G. Phosphorus flux in Lake Peipsi sensu stricto, Eastern Europe / G. Kapanen // Estonian Journal of Ecology. – 2009. – 58 (1). – P. 3–17.

Karatayev A.Y. et al. Benthic video image analysis facilitates monitoring of *Dreissena* populations across spatial scales / A.Y. Karatayev, K. Mehler, L. E. Burlakova, E. K. Hinchey, G. J. Warren // Journal of Great Lakes Research. – 2018. – Vol. 44 (4). – P. 629–638.

Karatayev A.Y. et al. The effects of *Dreissena polymorpha* (Pallas) invasion on aquatic communities in Eastern Europe / A.Y. Karatayev, L. E. Burlakova, D. K. Padilla // Journal of Shellfish Research. – 1997. – Vol. 16. – No. 1. – 187–203.

Karetnikov S.G., Naumenko M.A. Lake Ladoga ice phenology: mean condition and extremes during last 65 years / S.G. Karetnikov, M.A. Naumenko // Hydrological processes. – 2011. – 25. – P. 2859–2867. DOI: 10.1002 / hyp. 8048.

Karetnikov S.G., Naumenko M.A. Recent trends in Lake Ladoga ice cover / S.G. Karetnikov, M.A. Naumenko // Hydrobiologia. – 2008. – Vol. 599. – P. 41–48. DOI: 10.1007 / s10750-007-9211-1.

Karjalainen J. et. al. Comparison of methods used in zooplankton sampling and counting in the joint Russian-Finnish evaluation of the trophic state of Lake Ladoga / J. Karjalainen, M. Rahkola, M. Viljanen et al. // Hydrobiologia. – 1996. – Vol. 322. – P. 249–253.

Keddy P.A., Twolan-Strutt L., Shipley B. Experimental evidence that interspecific competitive asymmetry increases with soil productivity / P.A. Keddy, L. Twolan-Strutt, B. Shipley // Oikos. – 1997. – Vol. 80. – P. 253–256.

Keim D.A. et al. in Visual Data Mining 76–90 / D.A. Keim et al. // Режим доступа свободный [Электронный ресурс]. – URL: http://kops.uni-konstanz.de/bitstream/handle/123456789/5631/Visual_Analytics_Scope_and_Challenges.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата обращения: 01.01.2020).

Kelly K.A., Strub P.T. Comparison of velocity estimates from advanced very high-resolution radiometer in the coastal transition zone / K.A. Kelly, P.T. Strub // J. Geophys. Res. – 1992. – Vol. 97. – No. 6. – P. 9653–9668.

Kelly M.G. et al. Recommendations for the routine sampling of diatoms for water quality assessments in Europe / M.G. Kelly, A. Cazaubon, E. Coring et al. // Journal of Applied Phycology. – 1998. – Vol. 10. – No. 2. – P. 215–224.

Kim D.J., Lee D.I., Keller J. Effect of temperature and free ammonia on nitrification and nitrite accumulation in landfill leachate and analysis of its nitrifying bacterial community by FISH / D.J. Kim, D.I. Lee, J. Keller // Bioresource Technology. – 2006. – Vol. 97. – P. 459–468.

King J. et al. The response of the thermal stratification of South Bay (Lake Huron) to climatic variability / J. King, B. Shuter, A. Zimmerman // Can. J. Fish. – Aquat. Sci. – 1997. – Vol. 54. – P. 1873–1882.

Kireta A.R. et al. Coastal geomorphic and lake variability in the Laurentian Great Lakes: implications for a diatom-based monitoring tool / A.R. Kireta, E.D. Reavie, N.P. Danz et al. // Journal of Great Lakes Research. – 2007. – Vol. 33. – P. 136–153.

Klaveness D. Ecology of the Cryptomonadida: a first review / D. Klaveness // Growth and reproductive strategies of freshwater phytoplankton. (ed. C.D. Sandgren). Cambridge, 1991. – P. 105–133.

Kostrova S.S. Holocene hydrological variability of Lake Ladoga, northwest Russia, as inferred from diatom oxygen isotopes / S.S. Kostrova, H. Meyer, H.L. Bailey et al. // Boreas. – 2019. – Vol. 48. – P. 361–376.

Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae: Achnanthaceae, kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema Gesamtliteraturverzeichnis Teil 1–4 / K. Krammer, H. Lange-Bertalot. – Stuttgart-New York: Gustav Fischer Verlag, 1986–1991. – 876 p.

Kriiska A. The beginning of farming in the Eastern Baltic Area / A. Kriiska // In P.M. Dolukhanov, G.R. Sarson, A.M. Shukurov (Eds.) / The East European Plain on the eve of agriculture. – Oxford: Archaeopress, 2009. – P. 159–180.

Kurashov E.A. et al. Low-molecular-weight metabolites of aquatic macrophytes growing on the territory of Russia and their role in hydroecosystems / E.A. Kurashov, J.V. Krylova, G.G. Mitrukova, A.M. Chernova // Contemporary Problems of Ecology. – 2014. – Vol. 7. – No. 4. – P. 433–448. DOI: 10.1134 / S1995425514040064.

Kurashov E.A. et al. Interannual Variability of Low-Molecular Metabolite Composition in Ceratophyllum demersum (Ceratophyllaceae) from a Floodplain Lake with a Changeable Trophic Status / E.A. Kurashov, G.G. Mitrukova, Yu.V. Krylova // Contemporary Problems of Ecology. – 2018. – Vol. 11. – No. 2. – P. 179–194. DOI: 10.1134 / S1995425518020063.

Kurashov E.A. et al. Change of Low-Molecular-Weight Metabolome of Alien Species Potamogeton pectinatus L. in Lake Ladoga in Comparison with Population of Native Range / E.A. Kurashov, J.V. Krylova, A.G. Rusanov // Russ J Biol Invasions. – 2020. – Vol. 11. – P. 246–264. DOI: 10.1134 / S2075111720030066.

Kurashov E.A. et al. Interannual Variability of Low-Molecular Metabolite Composition in Ceratophyllum demersum (Ceratophyllaceae) from a Floodplain Lake with a Changeable Trophic Status / E.A. Kurashov, G.G. Mitrukova, Yu.V. Krylova // Contemporary Problems of Ecology. – 2018. – Vol. 11. – No. 2. – P. 179–194. DOI: 10.1134 / S1995425518020063.

Kurashov E.A., Gorichenskiy A.Y. The use of meiobenthic community for indication of ecological state of environment in lakes Ladoga and Onega. A comparative analysis of some methods and approaches / E.A. Kurashov, A.Y. Gorichenskiy // Russian Journal of Aquatic Ecology. – 1992. – No. 1. – P. 125–136.

Kurashov E.A., Barbashova M.A. First record of the invasive Ponto-Caspian amphipod Pontogammarus robustoides G.O. Sars, 1894 from Lake Ladoga, Russia / E.A. Kurashov, M.A. Barbashova // Aquatic Invasions. – 2008. – Vol. 3. – No. 2. – P. 253–256.

Lambert S., Wagner M. Microplastics Are Contaminants of Emerging Concern in Freshwater Environments: An Overview / S. Lambert, M. Wagner // Freshwater Microplastics: Emerging Environmental Contaminants? – 2018. – P. 1–23.

Lange-Bertalot H. et al. Freshwater benthic diatoms of Central Europe: over 800 common species used in ecological assessments. English edition with updated taxonomy and added species / H. Lange-Bertalot, G. Hofmann, M. Werum, M. Cantonati. – Schmitten-Oberreifenberg: Koeltz Botanical Books, 2017. – 942 p.

Lavento M. An archaeological field survey of Stone Age and Early Metal Period settlement at Kaukola (Sevastjanovo) and Raisala (Melnikovo) in Karelian Isthmus in 1999 / M. Lavento, P. Halinen, V. Timofeev et al. // Fennoscandia archaeologica XVIII (Helsinki, 2002). – P. 3–25.

Lavrentyeva G.M. Changes in the structure of plankton communities in southern Lake Ladoga under conditions of technogenic pressure / G.M. Lavrentyeva, V.A. Ogorodnikova, O.N. Susloparova, T.V. Tereshenkova // Proceedings of the Second International Lake Ladoga Symposium 1996. – Joensuu, 1997. – P. 94–102.

Lehmann A., Lachavanne J.B. Changes in the water quality of Lake Geneva indicated by submerged macrophytes / A. Lehmann, J.B. Lachavanne // Freshwater Biology. – 1999. – Vol. 42. – P. 457–466.

Lehtovaara A., Sarvala J. Seasonal dynamics of total biomass and species composition of zooplankton in the littoral of an oligotrophic lake / A. Lehtovaara, J. Sarvala // SIL Proceedings, 1922–2010. – 1984. – Vol. 22. – No. 2. – P. 805–810.

Lepisto L. Phytoplankton studies / L. Lepisto // Results of the Finnish-Russian joint study of the Lakes Onega, Ladoga and Saimaa conducted in the summer of 1990. – Helsinki, 1997. – P. 34–42.

Lewis J.P. Fast Normalized Cross-Correlation / J.P. Lewis // Industrial Light & Magic. – 1995. – No. 10. – P. 120–123.

Li J., Liu H., Chen J.P. Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection / J. Li, H. Liu, J.P. Chen // Water Research. – 2018. – Vol. 137. – P. 362–374.

Lithner D. et al. Leachates from plastic consumer products – screening for toxicity with *Daphnia magna* / D. Lithner, J. Damberg, G. Dave, A. Larsson // Chemosphere. – 2009. – Vol. 74. – No. 9. – P. 1195–1200.

Livingstone D.M. Impact of secular climate change on the thermal structure of a large temperate central European Lake / Clim. Change. – 2003. – 57. – P. 205–225. DOI:10.1023 / A: 1022119503144.

Lodder J. The yeast. A taxonomic study / Lodder J. – Amsterdam-London, 1970. – 658 p.

LP DAAC // Режим доступа свободный [Электронный ресурс]. – URL: <https://ltpdaac.usgs.gov/data/> (дата обращения: 01.01.2020).

Ludikova A.V. Siliceous microalgae in the Holocene sediments of Lake Ladoga / A.V. Ludikova // Limnology and Freshwater Biology. – 2020. – No. 4. – C. 453–454.

Lyon D.Y. et al. Ecotoxicology – logical impacts of nanomaterials / D.Y. Lyon, A. Thill, J. Rose, P.J. Alvarez // Environmental nanotechnology: applications and implications of nanomaterials. Weisner M.R., Bottero J-Y. (eds.). – New York: McGraw-Hill, 2007. – P. 445–479.

Maberly Stephen C. et al. Global lake thermal regions shift under climate change / Stephen C. Maberly et al. // Nature communications. – 2020. – 11. – P. 1232. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15108-z>.

MacIsaac H. Comparative growth and survival of *Dreissena polymorpha* and *Dreissena bugensis*, exotic mollusks introduced to the Great Lakes / H. MacIsaac // Journal of Great Lakes Research. – 1994. – Vol. 20. – No. 4. – P. 783–790.

MacKay M., Seglenieks F. On the simulation of Laurentian Great Lakes water levels under projections of global climate change / M. MacKay, F. Seglenieks // Climatic Change. – 2013. – Vol. 117 (12). – P. 55–67.

Magnuson J.J. et al. Quinn. Potential effects of climate changes on aquatic systems: Laurentian Great lakes and Precambrian shield region / J.J. Magnuson et al. // Hydrological Processes. – 1998. – Vol. 11. – No. 8. – P. 825–871.

Malm J. et al. Investigation of the spring thermal regime in Lake Ladoga using field and satellite data / J. Malm, D. Mironov, A. Terzhevik, L. Jonsson // Limnol. Oceanogr. – 1994. – Vol. 39. – No. 6. – P. 1333–1348.

Manning P.G. Forms of iron, phosphorus and trace-metal ions in a layered sediment core from Lake Ontario / P.G. Manning, K.R. Lum // Can. Mineral. – 1983. – No. 22. – P. 121–128.

Mason Lacey A. et al. Fine-scale spatial variation in ice cover and surface temperature trends across the surface of the Laurentian Great Lakes / Mason Lacey A., Catherine M. Riseng, Andrew D. Gronewold, Edward S. Rutherford, Jia Wang, Anne Clites, Sigrid D.P. Smith // Climatic Change. – 2016. – Vol. 138. – P. 71–83. DOI: 10.1007 / s10584-016-1721-2.

Mato Y. et al. Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment / Y. Mato, T. Isobe, H. Takada, H. Kanehiro, C. Ohtake, T. Kaminuma // *Environmental Science & Technology*. – 2001. – Vol. 35. – P. 318–324.

McCormick M. J. Potential Changes in Thermal Structure and Cycle of Lake Michigan Due to Global Warming / M. J. McCormick // *Transact. Amer. Fish. Soc.* – 1990. – Vol. 119. – P. 183–194.

Mehler K. et al. Sonar technology and underwater video analysis can enhance invasive *Dreissena* distribution assessment in large rivers / K. Mehler, L. E. Burlakova, A. Y. Karatayev, Z. Biesinger et al. // *Hydrobiologia*. – 2018. – Vol. 810. – P. 119–131.

Miettinen A. The palaeoenvironment of the Antrea net find / A. Miettinen, K. Sarmaja-Korjone, E. Sonninen et al. // *Karelian Isthmus*. – Helsinki, 2008. – Iskos 16. – P. 71–87.

Millenium Ecosystem Assessment Synthesis Report // Editors V. Reid, et al. Island Press. – Washington, DC. – 2005. – 155 p. – Режим доступа свободный [Электронный ресурс]. – URL: https://www.researchgate.net/publication/40119375_Millennium_Ecosystem_Assessment_Synthesis_Report (дата обращения: 01.01.2020).

MITgcm Massachusetts Institute of Technology General Circulation Model // Режим доступа свободный [Электронный ресурс]. – URL: <http://mitgcm.org> (дата обращения: 01.12. 2020).

Moll R. A. et al. Physical, chemical and biological conditions associated with the early stages of the Lake Michigan Vernal Thermal Front / R. A. Moll, A. Bratkovich, W. Chang, P. P. // *Estuaries*. – 1993. – Vol. 16. – No. 1. – P. 92–103.

Mooij W. M. Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modeling approach / W. M. Mooij, D. Trolle, E. Jeppesen et al. // *Aquatic Ecology*. – 2010. – Vol. 44. – No. 3. – P. 633–667.

Moore C. J. Synthetic polymers in the marine environment: A rapidly increasing, long-term threat / C. J. Moore // *Environmental Research*. – 2008. – Vol. 108. – No. 2. – P. 131–139.

Morisita M. Measuring of interspecific association and similarity between communities / M. Morisita // *Memoires of the Faculty of Science, Kyushu University, Series E (Biology)*. – 1959. – No. 3. – P. 65–80.

Morisita M. Measuring of interspecific association and similarity between communities / M. Morisita // *Memoires of the Faculty of Science, Kyushu University, Series E (Biology)*. – 1959. – No. 3. – P. 65–80.

Nakai S., Yamada S., Hosomi M. Anti – cyanobacterial fatty acids released from *Myriophyllum spicatum* / S. Nakai, S. Yamada, M. Hosomi // *Hydrobiologia*. – 2005. – Vol. 543. – P. 71–78. DOI: 10.1007 / s10750-004-6822-7.

NASA Ocean Color. URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 25.11.2020).

Naumenko M. A. et al. Current ecological state of the Volkhov Bay of the Ladoga Lake / M. A. Naumenko, V. A. Avinsky, M. A. Barbashova, V. V. Guzivaty, et al. // *Ecological Chemistry*. – 2000. – No. 9. – P. 75–87.

Naumenko M. A. Lake Ladoga digital bathymetric models: development approaches and insight for limnological investigations / M. A. Naumenko // *Limnological Review*. – 2020. – 20 (2). – P. 65–80. DOI: 10.2478 / limre-2020–0008.

Naumenko M. A. Some Aspects of the Thermal Regime of Large Lakes: Lake Ladoga and Lake Omega // *Water Pollution Res. J. of Canada*. – 1994. – Vol. 29. – No. 2/3. – P. 423–439.

Niinemets Ü., Tamm Ü. Species differences in timing of leaf fall and foliage chemistry modify nutrient resorption efficiency in deciduous temperate forest stands / Ü. Niinemets, Ü. Tamm // *Tree Physiology*. – 2005. – No. 25. – P. 1001–1014.

Notarstefano G. et al. Estimation of Surface Currents in the Adriatic Sea from Sequential Infrared Satellite Images / G. Notarstefano, P.-M. Poulain., E. Mauri // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – 2008. – Vol. 25. – No. 2. – P. 271–285.

O'Reilly C.M. et al. Climate change decreases aquatic ecosystem productivity of Lake Tanganyika, Africa / C.M. O'Reilly, S.R. Alin, P. Plisnier et al. // Nature. – 2003. – 424. – P. 766–768. DOI:10.1038 / nature01833.

Oehlmann J. et al. A critical analysis of the biological impacts of plasticizers on wildlife / J. Oehlmann, U. Schulte-Oehlmann, W. Kloas, O. Jagnytsch et al. // Philosophical Transactions of the Royal Society B. – 2009. – Vol. 364. – P. 2047–2062.

Oksanen J. et al. Package 'vegan': Community ecology package / J. Oksanen, F.G. Blanchet, R. Kindt, P. Legendre. – Режим доступа свободный [Электронный ресурс]. – URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/vegan/vegan.pdf> (дата обновления: 28.11.2020).

O'Reilly C.M. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe / C.M. O'Reilly et al. // Geophysical Research Letters. – 2015. – Vol. 42. – No. 24. – P. 10773–10781.

Orlova M. I., Kchlebovich V. V., Komendantov A. Y. Potential euryhalinity of *Dreissena polymorpha* (Pallas) and *Dreissena bugensis* (Andr.) / M. I. Orlova, V. V. Kchlebovich, A. Y. Komendantov // Russian Journal of Aquatic Ecology. – 1998. – No. 7. – P. 17–28.

Panov V. E., Berezina N. A. Invasion history, biology and impacts of the Baikalian amphipod *Gmelinoides fasciatus* / V. E. Panov, N. A. Berezina // Invasive Aquatic Species of Europe – Distribution, Impacts and Management. Eds. Leppäkoski E, Gollasch S, Olenin S. – Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. – 2002. – P. 96–103.

Parzych A., Trojanowski J. Precipitation and duff fall as natural sources of nitrogen and phosphorus for forest soils in the Slowinski National Park / A. Parzych, J. Trojanowski // Baltic coastal zone. – 2006. – No. 10. – P. 47–59.

Peeters V., Ector L. Atlas des diatomées des cours d'eau du territoire bourguignon. Volume 1: Centriques, Araphidées / V. Peeters, L. Ector. – Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Bourgogne-Franche-Comté, Dijon, 2017. – 309 p.

Peeters V., Ector L. Atlas des diatomées des cours d'eau du territoire bourguignon. Volume 2: Monoraphidées, Brachyraphidées / V. Peeters, L. Ector. – Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Bourgogne-Franche-Comté, Dijon, 2018. – 271 p.

Peeters V., Ector L. Atlas des diatomées des cours d'eau du territoire bourguignon. Volume 3: Naviculacées partie 1. Adlafia, Amphipleura, Aneumastus, Anomoeoneis, Berkeleya, Biremis, Brachysira, Caloneis, Cavinula, Chamaepinnularia, Craticula, Diadsmis, Eolimna, Fallacia, Fistulifera, Geissleria, Gyrosigma, Hippodonta, Humidophila, Luticola, Mayamaea, Microcostatus, Neidiomorpha, Neidium, Nupela, Playaensis, Pseudofallacia, Sellaphora / V. Peeters, L. Ector. – Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Bourgogne-Franche-Comté, Dijon, 2019. – 324 p.

Pekel JF., Cottam A., Gorelick N. et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes / JF. Pekel, A. Cottam, N. Gorelick et al. // Nature. – 2016. – 540. – P. 418–422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>.

Peng G. et al. Microplastics in sediments of the Changjiang estuary, China / G. Peng, B. Zhu, D. Yang, S. Lei, H. Shi, D. Li // Environmental Polluton. – 2017. – Vol. 225. – P. 283–290.

Penning W.E. Classifying aquatic macrophytes as indicators of eutrophication in European lakes / W.E. Penning, M. Mjelde, B. Dudley et al. // Aquatic Ecology. – 2008. – Vol. 42. – P. 237–251.

Petrova N. The phytoplankton of Ladoga and Onega lakes and its recent successional changes / N. Petrova // Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol. – 1987. – No. 25. – P. 11–18.

Phipps D.A. Metals and Metabolism / D.A. Phipps. – Oxford: Clarendon press, 1976. – 134 p.

Piccolroaz S. et al. The role of stratification on lakes' thermal response: The case of Lake Superior / S. Piccolroaz, M. Toffolon, B. Majone // Water Resour. Res. – 2015. – Vol. 51. – No. 10. – P. 7878–7894. DOI: 10.1002 / 2014WR016555.

Pilipenko A.V., Naumenko M.A. Spatial inhomogeneity of thermal interaction of Lake Ladoga surface with air boundary layer / A.V. Pilipenko, M.A. Naumenko // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 321. – P. 012006. DOI:10.1088 / 1755–1315 / 321 / 1 / 012006.

Pitknen H. Searching Efficient Protection Strategies for the Eutrophied Gulf of Finland: The Combined Use of 1D and 3D Modeling in Assessing Long-term State Scenarios with High Spatial Resolution Searching / H. Pitknen, M. Kiirikki, O. Savchuk et al. // Ambio – Vol. 36. – No. 2–3, April 2007. – P. 272–279.

Pla S. et al. Spatial variability in water quality and surface sediment diatom assemblages in a complex lake basin: Lake of the Woods, Ontario, Canada / S. Pla, A.M. Paterson, J.P. Smol et al. // Journal of Great Lakes Research. – 2005. – Vol. 31. – P. 253–266.

Pollux B.J. A., van der Velde G., bij de Vaate A. A perspective on global spread of *Dreissena polymorpha*: a review on possibilities and limitations / B.J. A. Pollux, G. Van der Velde, A. Bij de Vaate // The Zebra Mussel in Europe. – Gerard van der Velde, Sanjeevi Rajagopal and Abraham bij de Vaate (Eds). – Margraf Publishers GmbH. – 2010. – P. 45–58.

Pomeroy L.R. The ocean's food web. a changing paradigm / L.R. Pomeroy // Bioscience. – 1974. – Vol. 24. – P. 499–504.

Poska A., Saarse L. New evidence of possible crop introduction to North-Eastern Europe during the Stone Age. Cerealia pollen finds in connection with the Akali Neolithic settlement, East Estonia / A. Poska, L. Saarse // Vegetation History and Archaeobotany. – 2006. – 15. – P. 169–179.

Potapova M., Charles D.F. Diatom metrics for monitoring eutrophication in rivers of the United States / M. Potapova, D.F. Charles // Ecological Indicators. – 2007. – Vol. 7. – No. 1. – P. 48–70.

Pozdnyakov Sh. R. et al. Studying the concentration of microplastic particles in water, bottom sediments and subsoils in the coastal area of the Neva Bay, the Gulf of Finland / Sh. R. Pozdnyakov, E. V. Ivanova, A. V. Guzeva et al. // Water Resources. – 2020. – Vol. 47. – P. 599–607.

Prata J.C. et al. Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: A critical review / J.C. Prata, J. P. da Costa, A. C. Duarte, T. Rocha-Santos // TrAC Trends in Analytical Chemistry. – 2019. – Vol. 110. – P. 150–159.

R Development Core Team. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2016. – Режим доступа свободный [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.R-project.org/> (дата обращения: 28.11.2020).

Raspletina G.F., Ulyanova D.S. Hydrochemical characteristics of River Vuoksi / G.F. Raspletina, D.S. Ulyanova // Proceedings of the Second International Lake Ladoga Symposium 1996. Joensuu, 1997. – P. 40–47.

Reavie E.D. Diatom-based weighted-averaging transfer functions for Great Lakes coastal water quality: relationships to watershed characteristics / E.D. Reavie, R.P. Axler, G.V. Sgro et al. // Journal of Great Lakes Research. – 2006. – Vol. 32. – P. 321–347.

Rochman C. M. et al. Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress / C. M. Rochman, E. Hoh, T. Kurobe, S. J. Teh // *Scientific Reports*. – 2013. – Vol. 3. – 7 p.

Rodgers G. Time of onset of full thermal stratification in Lake Ontario in relation to lake temperature in winter // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* – 1987. – No. 44. – P. 2225–2229.

Roeckner E. Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model / E. Roeckner, R. Brokopf, M. Esch et al. // *J. Climate*. – 2006. – Vol. 19. – P. 3771–3791.

Rukhovets L., Filatov N. (Eds.) *Ladoga and Onego – Great European Lakes. Observation and Modelling* / L. Rukhovets, N. Filatov (Eds.). – Springer Praxis, 2010. – 302 p.

Rumyantsev V. et al. *Lake Ladoga* / V. Rumyantsev, L. Kudersky, A. Izmailova // *Breaf*. – 2009. – 64 p. – Режим доступа свободный [Электронный ресурс]. – URL: http://rcse.edu.shiga-u.ac.jp/govpro/plan/2009list/11wlc13_wuhan/ilbm_expert_group_meeting/ilbm_lake_briefs_in_progress/06_aladi_ldoga_lake_brief_%28final_draft%29.pdf (дата обращения: 01.01.2020).

Rusanov A. G. et al. Distribution of periphytic diatoms in the rivers of the Lake Ladoga basin (Northwestern Russia) / A. G. Rusanov, E. V. Stanislavskaya, É. Ács // *Acta Botanica Croatica*. – 2009. – Vol. 68. – No. 2. – P. 123–134.

Rusydi A. F. Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review / A. F. Rusydi // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2018. – Vol. 118. – conference 1. DOI: 10.1088 / 1755–1315 / 118 / 1 / 012019.

Saarnisto M. Late Holocene land uplift / neotectonics on the island of Valamo (Valaam), Lake Ladoga, NW Russia / M. Saarnisto // *Quaternary International*. – 2012. – Vol. 260. – P. 143–152.

Saarnisto M. Shoreline displacement of Lake Ladoga – new data from Kilpolansaari / M. Saarnisto, T. Grönlund // *Hydrobiologia*. – 1996. – 322. – P. 205–215.

Saarnisto M. The Late Weichselian and Flandrian history of the Saimaa Lake Complex / M. Saarnisto // *Societas Scientiarum Fennica, Commentationes Physico-Mathematicae*. 1970. – 37. – 107 p.

Sadegh H. et al. The role of nanomaterials as effective adsorbents and their applications in wastewater treatment / H. Sadegh, G. A. M. Ali, V. K. Gupta, et al. // *J. Nanostruct. Chem.* – 2017. – Vol. 7. – P. 1–14. DOI: 10.1007 / s40097–017–0219–4.

Sager L., Lachavanne J.-B. The M-NIP. a macrophyte-based Nutrient Index for Ponds / L. Sager, J.-B. Lachavanne // *Hydrobiologia*. – 2009. – Vol. 634. – P. 43–63.

Saimaan alueen vesien käytön kokonaissuunnitelma. Vesihallituksen julkaisuja // *Publications of the National Board of Waters*, 42. – Helsinki, 1983. – 94 p.

Sand-Jensen K. et al. Macrophyte decline in Danish lakes and streams over the past 100 years / K. Sand-Jensen, T. Riis, O. Vestergaard, S. E. Larsen // *Journal of Ecology*. – 2000. – Vol. 88. – P. 1030–1040.

Sapelko T. et al. Holocene sedimentation in the central part of Lake Ladoga / T. Sapelko, Sh. Pozdnyakov, D. Kuznetsov et al. // *Quaternary International*. – 2019. – Vol. 524. – P. 67–75.

Sapelko T. et al. Paleolimnology and Paleoenvironments of Lake Uzlovoye (Lake Ladoga Region, NW Russia) / T. Sapelko, D. Subetto, D. Gerasimov, et al. // *Man and environment in boreal forest zone: past, present and future. Abstracts of the Conference (Moscow, 2008)*. – P. 85–87.

Sapelko T. The development of island lakes of Lake Ladoga during the Late Pleistocene Holocene / T. Sapelko, D. Kuznetsov, A. Ludikova et al. // *Limnology and Freshwater Biology*. – 2020. – 4. – P. 470–471.

Sapelko T.V. et al. Pollen spectra of the modern sediments of Lake Ladoga / T.V. Sapelko // Proceedings of the Fourth Int. Lake Ladoga Symp / H. Simola, A. Yu. Terzhevik, M. Viljanen, I. J. Holopainen (eds). – Univ. of Joensuu, Publ. of Karelian Inst., 2003. – 138. – P. 223–227.

Savchuk O.P. Nutrient biogeochemical cycles in the Gulf of Riga: scaling up field studies with a mathematical model / O.P. Savchuk // J.Mar. Sys. – 2002. – Vol. 32. – P. 235–280.

Savelieva L.A. et al. Vegetation and climate changes in northwestern Russia during the Lateglacial and Holocene inferred from the Lake Ladoga pollen record / L.A. Savelieva., A.A. Andreev, R. Gromig et al. // Boreas. – 2019. – Vol. 48. – P. 349–360.

Scheffer M. et al. Climatic warming causes regime shifts in lake food webs / M. Scheffer, D. Straile, E. H. van Nes, H. Hosper // Limnol. Oceanogr. – 2001. – 46. – P. 1780–1783. DOI: 10.4319 / lo. 2001.46. 7.1780.

Schertzer M., Taylor B. Assessment of the Capability to Compute Evaporation from Okanagan Lake, other Mainstem Lakes and Basin Lakes and Reservoirs using the Existing Database / M. Schertzer, B. Taylor // William. WSTD Contribution No. – 2009. – P. 08–547.

Schmid M. et al. Lake surface temperatures in a changing climate: a global sensitivity analysis / M. Schmid, S. Hunziker, A. Wüest // Climatic Change. – 2014. – 124. – P. 301–315. DOI: 10.1007 / s10584-014-1087-2.

SeaDAS – SeaWiFS Data Analysis System // Режим доступа свободный [Электронный ресурс]. – URL: <http://seadas.gsfc.nasa.gov> / seadas (дата обращения: 25.11.2020).

Segers H. The biogeography of littoral Lecane Rotifera / H. Segers // Hydrobiologia. – 1996. – Vol. 323. – P. 169–197.

Shala S. Palaeoenvironmental record of glacial lake evolution during the early Holocene at Sokli, NE Finland / S. Shala, K.F. Helmens, K.N. Jansson et al. // Boreas. – 2013. – Vol. 43. – P. 362–376.

Shuter B.J., Ing K.K. Factors affecting the production of zooplankton in lakes / B.J. Shuter, K.K. Ing // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science. – 1997. – Vol. 54. – No. 2. – P. 359–377.

Slepukhina T., Bottom sediments and biocenoses of northern Ladoga and their changes under human impact / T. Slepukhina, I. Belyakova, Yu. Chichikalyuk et al. // Hydrobiology. – 1996. – No. 322. – P. 23–26.

Smirnova L. Multipurpose use of water resources / L. Smirnova // Proceedings of a workshop on environmental data systems for large lakes. – Joensuu, 1999. – P. 93–99.

Smol J.P. The power of the past: using sediments to track the effects of multiple stressors on lake ecosystems / J.P. Smol // Freshwater biology. – 2010. – 55. – P. 43–59.

Smol J.P. The ratio of diatom frustules to chrysophycean statospores: a useful paleolimnological index / J.P. Smol // Hydrobiologia. – 1985. – Vol. 123. – P. 199–208.

Smol J.P., Stoermer E.F. Applications and uses of diatoms: prologue / J.P. Smol, E.F. Stoermer // The diatoms: Application for the environmental and earth sciences. – Eds.: J.P. Smol, E.F. Stoermer. – New-York: Cambridge University Press, 2010. – P. 3–7.

Snøeijls P., Potapova M. Intercalibration and distribution of diatom species in the Baltic Sea / P. Snøeijls, M. Potapova. – Vol. 3. – Opulus Press, Uppsala. – 1995. – 126 p.

Sokal R.R., Rolf F.J. Biometry: the principles and practice of statistics in biological research / R.R. Sokal, F.J. Rolf. – San Francisco: W.H. Freeman and Company, 1981. – 859 p.

Solimini A.G., Cardoso A.C., Heiskanen A.S. Indicators and methods for the ecological status assessment under the Water Framework Directive / A.G. Solimini, A.C. Cardoso, A.S. Heiskanen. – European Union Report 22314EN. – EC, Joint Research Centre: Ispra., 2006. – 262 p.

Solomon S. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment / S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al. // Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. – 996 p.

Sorensen T.A. A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content, and its application to analyses of the vegetation on Danish com-mons / T.A. Sorensen // Kongelige Danske Videnskabernes Selskabs Biologiske Skrifter. – 1948. – Vol. 5. – P. 1–34.

Sorokin A., Naumenko M., Veselova M. New morphometrical data of Lake Ladoga / A. Sorokin, M. Naumenko, M. Veselova // Hydrobiologia. – 1996. – Vol. 322. – P. 65–67.

Stefan H.G. et al. Simulated climate change effects on year-round water temperatures in temperate zone lakes / H.G. Stefan, X. Fang, M. Hondzo // Climatic Change. – 1998. – 40. – P. 547–576.

Steissberg T.E. et al. Measuring surface currents in lakes with high spatial resolution thermal infrared imagery / T.E. Steissberg, J.H. Simon, S.S. Geoffrey // Geophysical Research Letters. – 2005. – Vol. 32. – L11402. – 4 p.

Stemberger R.S. et. al. Climatic forcing on zooplankton richness in lakes of the northeastern United States / R.S. Stemberger, A.T. Herlihy, D.L. Kugler, S.G. Paulsen // Limnology and Oceanography. – 1996. – Vol. 41. – No. 5. – P. 1093–1101.

Stepanova A. Inter-annual Fluctuation of Summer Plankton in a coastal zone of Lake Ladoga around Valaam archipelago / A. Stepanova // 2nd European large lakes symposium (ELLS) (Norrtälje, Sweden, August 2009) – Norrtälje, 2009. – P. 15–16.

Stewart A.J., Wetzel R.G. Cryptophytes and other microflagellates as couplers of planktonic community / A.J. Stewart, R.G. Wetzel // Arch. Hydrobiol. – 1986. – No. 106. – P. 1–19.

Straile D. et al. Complex effects of winter warming on the physiochemical characteristics of a deep lake / D. Straile, K. Jöhnk, H. Rosksnecht // Limnol. Oceanogr. – 2003. – 48. – P. 1432–1438.

Subetto D. Contribution to the lithostratigraphy and history of Lake Ladoga / D. Subetto, N. Davydova, A. Rybalko // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 1998. – Vol. 140. – P. 113–119.

Sugiyama N., Kravtsov S., Roebber P. Multiple climate regimes in an idealized lake – ice – atmosphere model / N. Sugiyama, S. Kravtsov, P. Roebber // Clim Dyn. – 2018. – 50. – P. 655–676. DOI: 10.1007 / s00382-017-3633-x.

Sun X. et al. Screening and isolation of the algicidal compounds from marine green alga *Ulva intestinalis* / X. Sun, H. Jin, L. Zhang, W. Hu, Y. Li, N. Xu // Chin. J. Ocean. Limnol. – 2016. – Vol. 34. – P. 781–788. DOI: 10.1007 / s00343-016-4383-z.

Taavitsainen J.-P. On early agriculture in the archipelago of Lake Ladoga / J.-P. Taavitsainen, L. Ikonen, A. Saksa // Fennoscandia archaeologica XI, 1994. – P. 29–39.

Takala H. The Ristola Site in Lahti and the Earliest Postglacial Settlement of South Finland / H. Takala. – Jyväskylä. Lahti: Lahti City Museum, 2004. – 205 p.

Telesh I.V. Species composition of planktonic Rotifera, Cladocera and Copepoda in the littoral zone of Lake Ladoga / I.V. Telesh // Hydrobiologia. – 1996. – Vol. 322. – P. 181–185.

ter Braak C.J. F., van Dam H. Inferring pH from diatoms: a comparison of old and new calibration methods / C.J. F. ter Braak, H. van Dam // Hydrobiologia. – 1989. – Vol. 178. – No. 3. – P. 209–223.

Terekhov A., Sapelko T. New paleoreconstruction of transgressive stages in the northern part of Lake Ladoga, NW Russia / A. Terekhov, T. Sapelko // *Geophysical Research Abstracts* (Vienna, EGU General Assembly 2016). – 2016. – P. 500.

Teuten E.L. et al. Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife / E.L. Teuten, J.M. Saquing, D.R. U. Knappe et al. // *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. – 2009. – Vol. 364. – No. 1526. – P. 2027–2045.

The European Commission's science and knowledge service // Режим доступа свободный [сайт]. – URL: <https://ec.europa.eu/jrc/en/science-update/global-surface-water-explorer-virtual-time-machine-documenting-when-and-where-global-water-presence>.

The Geochemical Atlas of Europe Part 1 / R. Salminen (ed.). – Geological Survey of Finland. – 2005. – 526 p.

Thissen J.J. M. Automating surface water detection in river: The estimation of the geometry of river based on optical earth observation sensors / J.J. M. Thissen // University of Twente, dissertation master of science, 2019. – 84 p.

Toivonen H., Huttunen P. Aquatic macrophytes and ecological gradients in 57 small lakes in southern Finland / H. Toivonen, P. Huttunen // *Aquatic Botany*. – 1995. – Vol. 51. – P. 197–221.

Trukhanova I.S. The Ladoga ringed seal (*Pusa hispida ladogensis*) under changing climate conditions / I.S. Trukhanova // *Russian Journal of Theriology*. – 2013. – No. 12 (1) – P. 41–48.

Trukhanova I.S., Gurarie E., Sagitov R.A. Spring density and distribution of Ladoga ringed seals (*Pusa hispida ladogensis*) / I.S. Trukhanova, E. Gurarie, R.A. Sagitov // *Arctic* – 2013. – Vol. 66 – No. 4. – P. 417–428.

Ukonmaanaho L. et al. Litterfall production and nutrient return to the forest floor in Scots pine and Norway spruce stands in Finland / L. Ukonmaanaho, P. Merilä, P. Nöjd, M. Tiina, T.M. Nieminen // *Boreal Environment Research*. – 2008. – No. 13. – P. 67–91.

Ullman D. et al. Surface Temperature Fronts in the Great Lakes / D. Ullman et al. // *Journal of Great Lakes Research*. – 1998. – Vol. 24. – 4. – P. 753–775.

UNESCO / SCOR. Monographs on oceanographic methodology. Determination of photosynthetic pigments in sea water. UNESCO Paris. 1966. – P. 1–69.

Vanderkelen I. et al. Global heat uptake by inland waters / I. Vanderkelen et al. // *Geophysical Research Letters*. – 2020. – 47. – e2020GL087867. <https://doi.org/10.1029/2020GL087867>.

Vichi M. Link or sink: a modelling interpretation of the open Baltic biogeochemistry / M. Vichi, P. Ruudij, J.W. Baretta // *Biogeosciences*. – 2004. – Vol. 1. – P. 79–100.

Vichi M. The Biogeochemical Flux Model (BFM): Equation Description and User Manual. BFM version 5 (BFM-V5). Release 1.0; BFM Report series N. 1. March 2013 / M. Vichi, G. Cossarini, E. Gutierrez Mlot et al. // Bologna, Italy. – 2013. – Режим доступа свободный [Электронный ресурс]. – URL: <http://bfm-community.eu>.

Virtasalo J. J. Middle Holocene to present sedimentary environment in the easternmost Gulf of Finland (Baltic Sea) and the birth of the Neva River / J.J. Virtasalo, D. Ryabchuk, A. T. Kotilainen et al. // *Marine Geology*. – 2014. – Vol. 350. – P. 84–96.

Vollenweider R.A. Input-output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology / R.A. Vollenweider // *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*. – 1975. – Beih. 37. – P. 53–84.

Vollenweider R.A., Kerekes I. The loading concept as basis for controlling eutrophication philosophy and preliminary results of the OECD programme on eutrophication / R.A. Vollenweider, I. Kerekes // *Progr. Wat. Technol.* – 1980. – Vol. 12. – No. 2. – P. 5–38.

Walker D.B. et al. Surface Water Pollution / D.B. Walker, D.J. Baumgartner, C.P. Gerba, K. Fitzsimmons // *Environmental and Pollution Science* (Third Edition). – Elsevier Inc., 2019. – P. 261–292. DOI: 10.1016 / B978-0-12-814719-1.00016-1.

Wang G., Doyle M. Survival of enterohemorrhagic *Escherichia coli* 0157: H7 in Water / G. Wang, M. Doyle // *Journal of Food Protection*. – 1998. – Vol. 61. – No. 6. – P. 662–667.

Wetzel C.E. et al. On some common and new cavum – bearing *Planorhynchus* (Bacillariophyta) species from freshwater / C.E. Wetzel, B. van de Vijver, S. Blanco, L. Ector // *Fottea, Olomouc*. – 2019. – Vol. 19. – No. 1. – P. 50–89.

Wetzel R. G. *Limnology* / R. G. Wetzel. – Saunders Publishing. Philadelphia. 1982. – 860 p.

Weyhenmeyer G.A., Blenckner T., Pettersson K. Changes of the plankton spring outburst related to the North Atlantic oscillation / G.A. Weyhenmeyer, T. Blenckner, K. Pettersson // *Limnol. Oceanogr.* – 1999. – 44. – P. 1788–1792.

Willby N.J., Abernethy V.J., Demars B.O. L. Attribute-based classification of European hydrophytes and its relationship to habitat utilization / N.J. Willby, V.J. Abernethy, B.O. L. Demars // *Freshwater Biology*. – 2000. – Vol. 43. – P. 43–74.

Williamson Craig E. et al. Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change / Williamson Craig E. et al. // *Limnol. Oceanogr.* – 2009. – 54 (6, part 2). – P. 2273–2282.

Wokoma O.A. F. Impact of freshwater pollution on aquatic organisms / O.A. F. Wokoma // *Journal of Environment, Earth Sciences and Ecology*. – 2019. – Vol. 1. – No. 1. – P. 1–9.

Wolfram S.A. A new kind of science / S.A. Wolfram. – USA Wolframs Media. – 2002. – 1197 p.

Wüest A. et al. Cold intrusions in Lake Baikal: direct observational evidence for deep-water renewal / A. Wüest et al. // *Limnol. Oceanogr.* – 2005. – 50 (1). – P. 184–196.

Ye X. et al. Impact of Water Mixing and Ice Formation on the Warming of Lake Superior: A Model-guided Mechanism Study // *Limnol. Oceanogr.* – 2019. – 64. – P. 558–574. DOI: 10.1002 / lno. 11059.

Zavialov P.O. et al. Continuity preserving modified maximum cross-correlation technique / P.O. Zavialov, J. V. Grigorieva, Jr. O. Moeller, A. G. Kostianoy // *J. Geophys. Res.* – 2002. – Vol. 107. – No. 10. – P. 3160–3178.

Zeeb B.A., Smol J. P. Chrysophyte scales and cysts / B.A. Zeeb, J. P. Smol // *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments Vol. 3* / In: Smol, J. P., Birks, H. J. B., Last, W. M. (Eds.). – Terrestrial, Algal and Siliceous Indicators. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht – Boston – London, 2001. – P. 203–223.

Zhong Y. et al. Recent accelerated warming of the Laurentian Great Lakes: Physical drivers / Y. Zhong Y., M. Notaro, St. J. Vavrus, M. J. Foster // *Limnol. Oceanogr.* – 2016. – Vol. 61. – P. 1762–1786. DOI: 10.1002 / lno. 10331.

Zhu Z., Woodcock C.E. Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery / Z. Zhu, C.E. Woodcock // *Remote Sens. Environ.* – 2012. – Vol. 118. – P. 83–94.

Zobkov M., Esiukova E. Microplastics in Baltic bottom sediments: Quantification procedures and first results / M. Zobkov, E. Esiukova // *Marine Pollution Bulletin*. – 2017. – Vol. 114. – P. 724–732.

Zuo S. et al. Antialgal effects of five individual allelochemicals and their mixtures in low level pollution conditions / S. Zuo, S. Zhou, L. Ye, Y. Ding, X. Jiang // *Environ. Sci. Pollut. Res.* – 2016. – Vol. 23. – P. 15703–15711. DOI: 10.1007 / s11356-016-6770-6.

Zuo S. et al. Antialgal effects of five individual allelochemicals and their mixtures in low level pollution conditions / S. Zuo, S. Zhou, L. Ye, Y. Ding, X. Jiang // *Environ. Sci. Pollut. Res.* – 2016. – Vol. 23. – P. 15703–15711. DOI: 10.1007 / s11356-016-6770-6.

Абакумов В. А. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / В. А. Абакумов. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – 320 с.

Абрамова С. А. История Ладожского озера в голоцене по данным спорово-пыльцевого и диатомового анализов / С. А. Абрамова, Н. Н. Давыдова, Д. Д. Квасов // История озер Северо-Запада. – Л., 1967. – С. 113–132.

Абрамова С. А. К палеолимнологии Ладожского озера / С. А. Абрамова, Н. Н. Давыдова // Известия ВГО. – 1966. – Т. 98. – № 1. – С. 19–25.

Авинский В. А. Зоопланктон: современное состояние и многолетняя динамика / В. А. Авинский // Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее / Под ред. В. А. Румянцева, В. Г. Драбковой. – СПб.: Наука, 2002. – С. 191–202.

Агафонова Е. В., Соколовская М. В. Ладожская нерпа / Е. В. Агафонова, М. В. Соколовская // Ладожское озеро и достопримечательности Приладожья. Атлас. – СПб.: Нестор-История, 2015. – С. 130–131.

Айбулатов Н. А. Визу дно. К истории подводных исследований в России / Н. А. Айбулатов. – М.: Наука, 2006. – 172 с.

Алекин О. А. Руководство по химическому анализу вод суши / О. А. Алекин, А. Д. Семенов, Б. А. Скопинцев. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 269 с.

Александровский А. Л. Новые данные относительно трансгрессии Ладожского озера, образования реки Невы и земледельческого освоения Северо-Запада России / А. Л. Александровский, Х. А. Арсланов, Н. Н. Давыдова и др. // Доклады РАН. – 2009. – Т. 424. – № 5. – С. 1–5.

Алексанин А. И. и др. Автоматический расчет скоростей поверхностных течений океана по последовательности спутниковых изображений / А. И. Алексанин, М. Г. Алексанина, А. Ю. Карнацкий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10. – № 2. – С. 131–142.

Алимов А. Ф. Элементы теории функционирования водных экосистем / А. Ф. Алимов. – СПб.: Наука, 2000. – 147 с.

Алхименко А. П. Состояние и перспективы становления и развития рекреационной и туристской деятельности на побережье и акватории Ладожского озера / А. П. Алхименко // Проблемы биологии, экологии, географии, образования: история и современность. Материалы второй международной научно-практической конференции. – СПб.: ЛГУ имени А. С. Пушкина, 2008. – С. 312–331.

Алхименко А. П. Транспортно-экологические проблемы водной системы «Ладожское озеро – река Нева – Финский залив» / А. П. Алхименко // Региональная экология. – 2005. – № 1–2 (24). – С. 109–119.

Алхименко А. П., Цветков В. Ю. Рекреационные ресурсы Ладожского озера / А. П. Алхименко, В. Ю. Цветков // Сб. научных трудов «Геоэкологические проблемы Ладожского озера». – СПб.: ИПК Прикладная экология, 2010. – С. 15–45.

Альгофлора озер и рек Карелии. Таксономический состав и экология / С. Ф. Ко мулайнен, Т. А. Чекрыжева, И. Г. Вислянская. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2006. – 81 с.

Алябина Г. А., Сорокин И. Н. Бассейн Ладожского озера как источник воздействия на экологическое состояние озера / Г. А. Алябина, И. Н. Сорокин // Региональная экология. – 2010. – № 4 (30). – С. 27–35.

Амантов А. В. Геология дочетвертичных образований и тектоника Ладожского озера / А. В. Амантов // Региональная геология и металлогения. – № 58. – 2014. – С. 22–32.

Амантов А. В. Этапы геологического развития Ладожского озера / А. В. Амантов // Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера / Под ред. Н. Н. Давыдовой, Б. И. Кошечкина. – СПб.: Российская академия наук. РГО, 1993. – С. 5–13.

Амантов А. В., Амантова М. Г. Моделирование послеледникового развития района Ладожского озера и восточной части Финского залива // Региональная геология и металлогения. – 2017. – № 69. – С. 5–14.

Амантов А. В., Амантова М. Г. Развитие котловины Ладожского озера с позиций ледниковой теории / А. В. Амантов, М. Г. Амантова // Региональная геология и металлогения. – № 59. – 2014. – С. 5–14.

Андреев О. А., Воробьева Л. В. Ветровая и стоковая циркуляция Ладожского озера (численные эксперименты) / О. А. Андреев, Л. В. Воробьева // Моделирование и экспериментальные исследования гидрологических процессов в озерах. – Л.: Наука, 1986. – С. 17–21.

Андроникова И. Н. и др. Зоны экологического риска в прибрежных районах Ладожского озера, выявленные на основе гидробиологических и гидрохимических показателей / И. Н. Андроникова, И. М. Распопов, Е. А. Курашов // Литоральная зона Ладожского озера / Под ред. Е. А. Курашова. – СПб.: Нестор-История, 2011. – С. 366–381.

Андроникова И. Н. Основные результаты исследований зоопланктона литоральной зоны / И. Н. Андроникова // Литоральная зона Ладожского озера / Под ред. Е. А. Курашова. – СПб.: Нестор-История, 2011. – С. 197–218.

Андроникова И. Н. Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем разных трофических типов / И. Н. Андроникова. – СПб.: Наука, 1996. – 189 с.

Андроникова И. Н., Распопов И. М. Градиенты количественных показателей сообществ макрофитов и зоопланктона в условиях краевых структур (на примере литоральной зоны Ладожского озера) / И. Н. Андроникова, И. М. Распопов // Проблемы изучения краевых структур биоценозов. Материалы 2-й Всероссийской конф. с междунар. участием. – Саратов: Издательство Саратовского университета, 2008. – С. 10–14.

Андроникова И. Н., Распопов И. М. Зоны экологического риска в прибрежных районах Ладожского озера / И. Н. Андроникова, И. М. Распопов // Биология внутренних вод. – 2007. – № 2. – С. 3–10.

Андроникова И. Н., Распопов И. М. Литоральный зоопланктон доминирующих сообществ макрофитов в Ладожском озере / И. Н. Андроникова, И. М. Распопов // Ладожское озеро. Мониторинг, исследование современного состояния и проблемы управления Ладожским озером и другими большими озерами. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2000. – С. 207–215.

Анохин В. М. Геоморфология и типизация берегов Ладожского озера по данным съемки беспилотного летательного аппарата / В. М. Анохин, Д. С. Дудакова, М. О. Дудаков // Геоморфология. – 2019. – № 1. – С. 25–37.

Анохин В. М. Глобальная дизъюнктивная сеть Земли: строение, происхождение и геологическое значение / В. М. Анохин. – СПб.: Недра, 2006. – 161 с.

Анохин В. М. Рельеф дна Ладожского озера и его связь с дизъюнктивами / В. М. Анохин, М. А. Науменко, Н. А. Нестеров // Изв. РГО. – 2016. – Т. 148. – Вып. 2. – С. 44–52.

Антонов П. И. Эколого-физиологическая и эколого-морфологическая характеристика двустворчатого моллюска *Dreissena polymorpha* (Pallas) волжских водоемов: автореферат дис. ... кандидата биологических наук: 03.00.16 / П. И. Антонов // Ин-т экологии Волжского бассейна. – Нижний Новгород, 1997. – 23 с.

Антонюк А. А. Оценка общей численности популяции тюленя *Pusa hispida ladogensis* Ладожского озера / А. А. Антонюк // Зоологический журнал. – 1975. – Т. 54. – № 9. – С. 1371–1377.

Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера / Под ред. Петровой Н. А. – Л.: Наука, 1982. – 304 с.

Анциферова И. В. Источники поступления наночастиц и их влияние на окружающую среду и человека / И. В. Анциферова // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2012. – № 7. – С. 5–10.

Арзамасцев И. С. Атлас подводных ландшафтов Японского моря / И. С. Арзамасцев, Б. В. Преображенский. – М.: Наука, 1990. – 224 с.

Арсланов Х. А. Новые данные по позднеплейстоценовой и голоценовой истории Ладожского озера / Х. А. Арсланов, Н. А. Гей, Н. Н. Давыдова и др. // Известия РГО. – 1996. – Т. 128. – Вып. 2. – С. 12–21.

Архипцева Н. Т. Биология и состояние запасов корюшки в Ладожском озере / Н. Т. Архипцева // Биологические ресурсы Ладожского озера. – Л.-М.: Изд-во АН СССР, 1968. – С. 174–186.

Архипцева Н. Т. Особенности размножения корюшки Ладожского озера / Н. Т. Архипцева // Рыбохозяйственное изучение внутренних водоемов. – 1975. – № 16. – С. 20–23.

Архипцева Н. Т. Питание ладожской корюшки / Н. Т. Архипцева // Изв. ГосНИОРХ. – 1977. – Т. 125. – С. 80–90.

Аршаница Н. М. и др. Загрязнение металлами рыбохозяйственных водоемов / Н. М. Аршаница, Д. С. Беляев, О. А. Ляшенко, М. Р. Гребцов, А. А. Стекольников, Я. С. Волков // Международный вестник ветеринарии. – 2018а. – № 2. – С. 73–82.

Аршаница Н. М. и др. Токсикорезистентность рыб к основным типам загрязнения водоемов / Н. М. Аршаница, Д. С. Беляев, А. А. Стекольников, М. Р. Гребцов, Б. К. Каримов // Международный вестник ветеринарии. – 2018б. – № 3. – С. 110–123.

Аршаница Н. М. Материалы ихтиотоксикологических исследований в бассейне Ладожского озера / Н. М. Аршаница // Сб. научн. трудов ГосНИОРХ. – 1988. – Вып. 285. – С. 12–23.

Аршаница Н. М., Гребцов М. Р., Стекольников А. А. Рыбы как индикаторы качества вод / Н. М. Аршаница, М. Р. Гребцов, А. А. Стекольников // Международный вестник ветеринарии. – 2017. – № 3. – С. 66–72.

Аршаница Н. М., Лесников Л. А. Патоморфологический анализ рыб в полевых и экспериментальных условиях / Н. М. Аршаница, Л. А. Лесников // Методы ихтиотоксикологических исследований. – Л., 1987. – С. 7–9.

Аршаница Н. М., Ляшенко О. А. Влияние загрязнений на воспроизводство рыб. Воспроизводство естественных популяций ценных видов рыб / Н. М. Аршаница, О. А. Ляшенко // Материалы Международной конференции (Санкт-Петербург, 20–22 апреля 2010 г.). – СПб.: Нестор-История, 2010. – С. 12–14.

Аршаница Н. М., Ляшенко О. А., Попов А. В. Влияние загрязнения водоемов на воспроизводство промысловых рыб / Н. М. Аршаница, О. А. Ляшенко, А. В. Попов // Сборник научных трудов. – Минск, 2008. – Вып. 24. – С. 366–369.

Ассиновская Б. А. Сейсмические события на Ладоге в XX веке / Б. А. Ассиновская // Известия РГО. – 2005. – Т. 137. – Вып. 4. – С. 70–76.

Астраханцев Г. П. и др. Трехмерная нестационарная модель Ладожского озера / Г. П. Астраханцев, Н. Б. Егорова, Л. А. Оганесян, Л. А. Руховец // Труды ГГИ. – 1988. – № 321. – С. 32–40.

Астраханцев Г. П. Моделирование экосистем больших стратифицированных озер / Г. П. Астраханцев, В. В. Меншуткин, Н. А. Петрова, Л. А. Руховец. – СПб.: Наука, 2003. – 363 с.

Атлас. Ладожское озеро / Под ред. В. А. Румянцева. – Изд. «444 Военно-картографическая фабрика МО РФ». – СПб., 2002. – 129 с.

Атлас. Ладожское озеро и достопримечательности его побережья / Под ред. В. А. Румянцева. – СПб.: Нестор-История, 2015. – 200 с.

Афанасьев И. В. Клеточно-автоматная модель динамики численности организмов озера Байкал / И. В. Афанасьев // Прикладная дискретная математика. – 2014. – № 1. – С. 114–123.

Балаганский А. Ф. и др. Изменчивость элементов водного баланса Ладожского и Онежского озер / А. Ф. Балаганский, Н. И. Махальская, Н. Н. Филатов // Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России / Под ред. Н. Н. Филатова. – Петрозаводск: РИО ФИЦ КарНЦ РАН, 2020. – С. 67–78.

Балахонцев Е. Н. Ботанико-биологические исследования Ладожского озера / Е. Н. Балахонцев // Ладожское озеро как источник водоснабжения гор. Санкт-Петербурга. – СПб., 1909. – С. 171–585.

Балонов И. М. Подготовка водорослей к электронной микроскопии / И. М. Балонов // Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. – М.: Наука, 1975. – С. 87–90.

Балушкина Е. В. и др. Изменение характеристик зообентоса в системе Ладога – р. Нева – Невская губа – Восточная часть Финского залива / Е. В. Балушкина, Н. П. Финогонова, Т. Д. Слепухина // Экологическое состояние водоемов и водотоков бассейна реки Невы. – СПб.: Научный центр РАН, 1996. – С. 91–130.

Барбашова М. А. Макробентос Ладожского озера и его изменения под влиянием факторов среды: диссертация... кандидата биологических наук: 03.02.08 / Барбашова Марина Александровна; Институт озероведения РАН. – СПб., 2015. – 165 с.

Барбашова М. А. Многолетние изменения макробентоса центральной части Ладожского озера / М. А. Барбашова // Вода: химия и экология. – 2014. – № 8 (74). – С. 55–61.

Барбашова М. А., Слепухина Т. Д. Макробентос и его многолетняя изменчивость в открытых районах озера // Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее / Под ред. В. А. Румянцева, В. Г. Драбковой. – СПб.: Наука, 2002. – С. 202–210.

Бахарев С. А. Использование автономных необитаемых подводных аппаратов в процессе изучения Мирового океана / С. А. Бахарев, В. В. Карасев, А. В. Карасев // Научные труды Дальрыбвтуза. – Владивосток, 2015. – С. 47–49.

Бахмутов В. Г. История развития зал. Лехмалахти в поздне- и послеледниковье / В. Г. Бахмутов, Н. Н. Давыдова, И. В. Делюсина и др. // Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера / Под ред. Н. Н. Давыдовой, Б. И. Кошечкина. – СПб.: Российская академия наук. РГО, 1993. – С. 43–48.

Башкин В. Н. Экологические риски: расчет, управление, страхование / В. Н. Башкин. – М.: Высшая школа, 2007. – 358 с.

Белкина Н. А. Распределение форм фосфора в донных отложениях как показатель эвтрофирования экосистемы большого водоема (на примере Ладожского и Онежского озер) / Н. А. Белкина, О. Сандман, Н. В. Игнатьева // Экологическая химия. – 2006. – № 15 (3). – С. 174–185.

Белкина Н. А. Химический состав донных отложений северной части Ладожского озера как показатель многолетней изменчивости экосистемы водоема / Н. А. Белкина, Д. А. Субетто, Н. А. Ефременко и др. // Труды Карельского научного центра РАН. – 2015. – № 9. – С. 53–61.

Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов / Ред. Н. Н. Филатов, А. Ю. Тержевник. – Петрозаводск: Изд. КарНЦ РАН, 2007. – 335 с.

Берг Л. С. Рыбы пресных вод СССР и сопредельных стран / Н. Т. Архипцева. – М.-Л., 1948. – 1382 с.

Бергер В. Я. Продукционный потенциал Белого моря / В. Я. Бергер // Исследования фауны морей. – Т. 60 (68). – СПб.: ЗИН РАН, 2007. – 292 с.

Березина Н. А. Межвидовые взаимодействия амфипод *Gammarus lacustris* и *Gmelinoides fasciatus* / Н. А. Березина // Экология. – 2009. – № 2. – С. 91–95.

Биологические инвазии в водных и наземных экосистемах / Под ред. А. Ф. Алимова, Н. Г. Богуцкой. – М.-СПб.: Товарищество научных изданий КМК, 2004. – 436 с.

Биота северных озер в условиях антропогенного воздействия / Ред. Н. Н. Немова, Н. В. Ильмаст, Е. П. Иешко, О. В. Мещерякова. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2012. – 230 с.

Биркан В. П. Питание ерша Ладожского озера / В. П. Биркан // Сб. научн. тр. ГосНИОРХ. – 1980. – Т. 159. – С. 41–49.

Блохина Н. С. Влияние длительности ветрового воздействия на формирование течений и термобара в пресном водоеме в период таяния ледового покрова / Н. С. Блохина // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. – 2018. – № 4. – С. 87–93.

Блохина Н. С., Селин Д. И. Формирование весеннего термобара в водоеме со сложным рельефом дна (на примере Ладожского озера) / Н. С. Блохина, Д. И. Селин // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. – 2019. – № 1. – С. 58–63.

Богословский Б. Б. Озероведение / Б. Б. Богословский. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1960. – 335 с.

Болотова Т. Т. О плодovitости и нересте сига – лудогы Ладожского озера / Т. Т. Болотова // Рыбохоз. изучение внутрен. водоемов. – 1976. – № 19. – С. 40–45.

Боуден К. Физическая океанография прибрежных вод / К. Боуден. – М.: Мир, 1988. – 324 с.

Бояринов П. М., Петров М. П. Процессы формирования термического режима глубоких пресноводных водоемов / П. М. Бояринов, М. П. Петров. – Л.: Наука, 1991. – 178 с.

Бреховских В. Ф., Казмирук Т. Н., Казмирук В. Д. Донные отложения Иваньковского водохранилища / В. Ф. Бреховских, Т. Н. Казмирук, В. Д. Казмирук. – М.: Наука, 2006. – 175 с.

Брюханов А. Ю. и др. Методика определения биогенной нагрузки сельскохозяйственного производства на водные объекты / А. Ю. Брюханов, С. А. Кондратьев, Н. С. Обломкова и др. // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2016. – № 89. – С. 175–183.

Брюханов А. Ю. и др. Оценка сельскохозяйственной биогенной нагрузки, сформированной на речных водосборах бассейна Куйбышевского водохранилища / А. Ю. Брюханов, С. А. Кондратьев, Э. В. Васильев, Е. А. Минакова и др. // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2018. – № 96. – С. 175–186.

Брюханов А. Ю., Шалавина Е. В., Васильев Э. В. Методика укрупненной оценки суточного и годового выхода навоза / помета / А. Ю. Брюханов, Е. В. Шалавина, Э. В. Васильев // Молочнохозяйственный вестник. – 2014. – № 1 (13). – С. 78–85.

Бузин В. А., Горошкова Н. И. Прогноз внутриводного ледообразования в реках и нижних бьефах ГЭС / В. А. Бузин, Н. И. Горошкова // Ученые записки РГГМУ. – 2013. – Вып. 27. – С. 29–35.

Бузин В. А., Дьяченко Н. Ю. Прогноз внутриводного ледообразования и зажоров льда на реке Неве / В. А. Бузин, Н. Ю. Дьяченко // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 11. – С. 94–101.

Буйволов Ю. А. и др. Современное состояние и перспективы развития мониторинга качества вод по гидробиологическим показателям в России / Ю. А. Буйволов, И. В. Быкова, Г. А. Лазарева, О. М. Потютко, А. Г. Уваров // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2016. – 27 (2). – С. 42–58.

Буторина Л. Г., Иванова М. Б. Стайное поведение *Polyphemus pediculus* (L.) / Л. Г. Буторина, М. Б. Иванова // Поведение водных беспозвоночных: Материалы II Всесоюзного симпозиума. – Борок: ИБВВ АН СССР, 1975. – С. 11–13.

Великанов М. А. Динамика русловых потоков. Т. 2 / М. А. Великанов. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955. – 324 с.

Великородная Ю. И., Почепцов А. Я. Наночастицы как потенциальный источник неблагоприятного воздействия на окружающую среду / Ю. И. Великородная, А. Я. Почепцов // Медицина экстремальных ситуаций. – 2015. – № 3 (53). – С. 73–77.

Вережкин М. В. Результаты авиаучета кольчатой нерпы на Ладожском озере / М. В. Вережкин // Материалы III международного симпозиума / Динамика популяций охотничьих животных северной Европы. – Сортавала, 2002. – С. 202–204.

Вивенцова Е. А. Характеристика подземного стока в Ладожское озеро / Е. А. Вивенцова // Вестник Санкт-Петербургского Университета. Серия 7: Геология, География. – 2004. – С. 82–83.

Вилкова О. Ю. Рельеф подводного берегового склона как индикатор ландшафта и распределения биоресурсов: автореферат дис. ... кандидата географических наук: 25.00.25 / Вилкова Ольга Юрьевна; Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. – М., 2005. – 24 с.

Виноградов Ю. Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. Опыт критического анализа / Ю. Б. Виноградов. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 312 с.

Владимирова О. М. Моделирование растворенного органического вещества в Финском заливе / О. М. Владимирова, Т. Р. Еремина, А. В. Исаев и др. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2018. – Т. 11 – № 4. – С. 90–101.

Влияние загрязнений на экосистему Ладожского озера // Сб. науч. тр. ГосНИОРХ. – 1988. – № 285. – 138 с.

Влияние изменений климата и опасных природных явлений на природопользование европейского севера / Ред. Н. С. Касимов, Л. Н. Карлин. – СПб.: РГГМУ, 2013. – 124 с.

Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И. А. Шикломанова. – СПб.: ГГИ, 2008. – 600 с.

Володин Е. М. и др. Воспроизведение и прогноз климатических изменений в XIX–XXI веках с помощью модели земной климатической системы ИВМ РАН / Е. М. Володин, Н. А. Дианский, А. В. Гусев // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 49. – № 4. – С. 379–400.

Володин Е. М. Представление потоков тепла, влаги и импульса в климатических моделях. Потоки с поверхности / Е. М. Володин // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2016. – Т. 1. – С. 28–42.

Володин Е. М., Дианский Н. А. Моделирование изменений климата в XX–XXII столетиях с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана / Е. М. Володин, Н. А. Дианский // Изв. РАН. ФАО. – 2006. – Т. 42. – № 3. – С. 291–306.

Воронцов Ф. Ф. Волнение на Ладожском озере / Ф. Ф. Воронцов // Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. – Л.: Изд. Ленинградского университета, 1966. – С. 247–264.

Воронюк Г. Ю. Водообмен в краевых частях Балтийского щита и прилегающих артезианских бассейнах по изотопным и химическим данным (научные

и прикладные аспекты) / Г.Ю. Воронюк, Г.С. Бородулина, И.А. Крайнюкова, И.В. Токарев // Карельский перешеек. «Труды Карельского научного центра», серия «Лимнология». – 2016. – № 9. – С. 46–56.

Ворошилова И.С. Происхождение и популяционная структура периферических поселений *Dreissena polymorpha* (pallas, 1771) северо-восточной границы ареала вида: автореферат дис. ... кандидата биологических наук: 03.00.16 / Ворошилова Ирина Сергеевна; Ин-т биологии внутр. вод им. И.Д. Папанина РАН. – Борок, 2008. – 24 с.

Ворошилова И.С., Артамонова В.С. Пути расселения *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) в северо-восточной части ареала // Дрейссениды: Эволюция, систематика, экология. Лекции и материалы докладов I Международной школы-конференции. – Борок, 2008. – С. 65–67.

Воякина Е.Ю. Видовой состав фитопланктона водной системы Валаамского архипелага / Е.Ю. Воякина // Рыбохозяйственное исследование больших озер северо-запада европейской части России. Труды ФГНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» («ГосНИОРХ» им. Л.С. Берга). – 2009. – № 334. – С. 33–61.

Воякина Е.Ю. Изменения структуры и биоразнообразия фитопланктона как индикаторы acidification / Е.Ю. Воякина // Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем (Санкт-Петербург, 23–27 октября). – СПб., 2017. – С. 68–72.

Воякина Е.Ю. Межгодовая динамика структурных показателей фитопланктона различных участков прибрежной зоны Ладожского озера в районе Валаамского архипелага / Е.Ю. Воякина // Рыбохозяйственное исследование больших озер северо-запада европейской части России. Труды ФГНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» («ГосНИОРХ» им. Л.С. Берга). – 2009. – № 334. – С. 62–74.

Воякина Е.Ю. Особенности продукционных процессов в озерах о. Валаам / Е.Ю. Воякина // Труды Зоологического института РАН. – 2017. – Т. 321. – № 1. – С. 10–18.

Воякина Е.Ю. Особенности пространственно-временного и вертикального распределения структурно-функциональных характеристик фитопланктона в озерах Валаамского архипелага / Е.Ю. Воякина // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды (Минск-Нарочь, 12–17 сентября 2016 г.). – Минск, 2016. – С. 130–131.

Воякина Е.Ю. Пространственно-временная неоднородность распределения фито- и зоопланктона в оз. Сисяярви в 1997–2005 гг. (Валаамский архипелаг) / Е.Ю. Воякина // Съезд Гидробиологического общества РАН (Тольятти, 18–22 сентября 2006). – Тольятти, 2006. – С. 89.

Воякина Е.Ю. Сезонная динамика таксономической структуры и количественных показателей фитопланктона двух участков прибрежной зоны Валаамского архипелага (Ладожское озеро) 1997–1998 гг. / Е.Ю. Воякина // Международный симпозиум по Ладожскому озеру (Великий Новгород, 2–6 сентября 2002). – СПб., 2003. – С. 69–72.

Воякина Е.Ю. Фитопланктон внутренних водоемов Валаамского архипелага и прилегающей акватории Ладожского озера: автореферат дис. ... кандидата биологических наук: 03.00.18 / Воякина Екатерина Юрьевна; Гос. науч.-исслед. ин-т озера и речного рыб. хоз-ва. – СПб., 2007. – 22 с.

Выручалкина Т.Ю. О прогнозе многолетних изменений уровня воды крупных озер / Т.Ю. Выручалкина, Н.Н. Филатов, Н.А. Дианский, А.В. Гусев // Труды Карельского научного центра РАН. – 2016. – № 9. – С. 3–16.

Гагарина О. В. Оценка и нормирование качества природных вод: критерии, методы, существующие проблемы / О. В. Гагарина. – Ижевск: Изд. Удмуртский университет, 2012. – 199 с.

Гак Д. З. Бактериопланктон и его роль в биологической продуктивности водохранилищ / Д. З. Гак. – М.: Наука, 1975. – 251 с.

Гарибова Л. В. Основы микологии: Морфология и систематика грибов и грибоподобных организмов / Л. В. Гарибова. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2005. – 202 с.

Гарлов П. Е. Система управления биотехникой искусственного воспроизводства популяций ценных видов рыб в Северо-Западном регионе / П. Е. Гарлов, Н. М. Аршаница, А. А. Стекольников и др. // Вопросы нормативно-правового регулирования в ветеринарии. – 2020. – № 1. – С. 266–273.

Гарлов П. Е., Аршаница Н. М. Состояние аквакультуры в связи с загрязнением водоемов в Северо-Западном регионе / П. Е. Гарлов, Н. М. Аршаница // Материалы XX Международного форума «День Балтийского моря». – 2019. – С. 270–275.

Генкал С. И. О морфологической изменчивости диатомовой водоросли *Aulacoseira subarctica* (O. Müller) Haworth / С. И. Генкал // Эколого-физиологические исследования водорослей и их значение для оценки состояния природных вод. – Ярославль, 1996. – С. 19–20.

Геоэкология Ладожского озера / В. Л. Иванов, В. И. Гуревич. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 1995. – 209 с.

Герд С. В. Биоценозы бентоса больших озер Карелии / С. В. Герд. – Петрозаводск: Изд-во Карело-Финского госуниверситета, 1949. – 198 с.

Герд С. В. Обзор гидробиологических исследований озер Карелии / С. В. Герд // Труды Карело-финского отделения ВНИОРХ. – 1946. – Т. 2. – С. 26–139.

Гигиенические требования к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов. Санитарные правила и нормы. СанПиН 2.3.2.1078–01. – М., 2001. – 180 с.

Гидрохимия и гидрооптика Ладожского озера / Отв. редактор чл.-корр. АН СССР. О. А. Алекин. – Л.: Наука, 1967. – 216 с.

Глазов Д. М. Использование ладожской кольчатой нерпой (*Pusa hispida ladogensis*) акватории Ладожского озера в осенне-зимний период по данным спутниковой телеметрии / Д. М. Глазов, Д. М. Кузнецова, М. А. Соловьева и др. // Зоологический журнал. – 2019. – Т. 98. – № 6. – С. 706–713.

Голиков А. Н. Эволюция экосистем Баренцева моря в плейстоцене. Четвертичная палеоэкология и палеогеография Северных морей / А. Н. Голиков А. Н., О. А. Скарлато. – М., 1988. – 231 с.

Голицын Г. С. Анализ составляющих водного и теплового балансов на водосборе Ладожского озера, рассчитанных по моделям общей циркуляции атмосферы / Г. С. Голицын, В. П. Мелешко, Л. К. Ефимова и др. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2000. – Т. 36. – № 4. – С. 435–445.

Голицын Г. С. и др. Изменения температуры и осадков в бассейне Ладожского озера по расчетам климатической модели общей циркуляции в XIX–XXI вв. / Г. С. Голицын, Л. К. Ефимова, И. И. Мохов, В. В. Семёнов, В. Ч. Хон // Известия РГО. – 2002. – Т. 134. – Вып. 6. – С. 34–45.

Голосов С. Д. Моделирование термогидродинамических процессов и экосистем Ладожского и Онежского озер на основе 3D-модели гидродинамики Внутреннего моря (МГВМ) / С. Д. Голосов, И. С. Зверев, Е. А. Шипунова // Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России / Под ред. Н. Н. Филатова. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. – С. 166–196.

Голосов С.Д., Зверев И.С., Шипунова Е.А. Моделирование термогидродинамических процессов и экосистем Ладожского и Онежского озер на основе 3D-модели гидродинамики Внутреннего моря (МГВМ) / С.Д. Голосов, И.С. Зверев, Е.А. Шипунова // Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России / Ред. Н. Н. Филатов. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. – С. 166–196.

Гончаров В.Н. Основы динамики русловых потоков / В.Н. Гончаров. – Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1954. – 452 с.

Гордеева С.М., Малинин В.Н. О долгосрочном прогнозе годового стока Невы и колебаний уровня Ладожского озера / С.М. Гордеева, В.Н. Малинин // Современные проблемы в гидрометеорологии. – СПб., 2006. – С. 222–228.

ГОС. 17.1.3.07–82. Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков. – М.: Издательство стандартов, 1982. – 10 с.

ГОС. 5180–2015 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик [Текст] взамен ГОС. 5180–84. Введ. 2016-04-01. – М.: Стандартинформ, 2015.

Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2018 году». – М.: Минприроды России; НИА-Природа, 2019. – 844 с.

Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2016 году». – М.: Минприроды России; НИА-Природа, 2017. – 650 с.

Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году». – М.: Минприроды России; НИА-Природа, 2018. – 660 с.

Гребцов М.Р. Эколого-токсикологическая характеристика Волховской губы Ладожского озера / М.Р. Гребцов // Вопросы нормативно-правового регулирования в ветеринарии. – 2014. – № 3. – С. 66–71.

Гребцов М.Р., Стекольников А.А. К вопросу аэрогенного поступления металлов в Волховскую губу Ладожского озера / М.Р. Гребцов, А.А. Стекольников // Вопросы нормативно-правового регулирования в ветеринарии. – 2015. – № 2. – С. 374–376.

Григорьев С.В., Грицевская Г.Л. Каталог озер Карелии / С.В. Григорьев, Г.Л. Грицевская. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1959. – 240 с.

Гричук В.П. Методика обработки осадочных пород, бедных органическими остатками, для целей пылецевого анализа / В.П. Гричук // Проблемы физической географии. – 1940. – Вып. 8. – С. 53–58.

Гузиватый В.В., Каретников С.Г., Наumenко М.А. Опыт создания и использования банка термических данных Ладожского озера / В.В. Гузиватый, С.Г. Каретников, М.А. Наumenко // География и природные ресурсы. – 1998. – № 3. – С. 89–96.

Гузиватый В.В., Наumenко М.А., Румянцев В.А. Оценка поверхностных течений Ладожского озера методом максимальной кросс-корреляции / В.В. Гузиватый, М.А. Наumenко, В.А. Румянцев // Исследование Земли из космоса. – 2020. – № 1. – С. 20–30.

Гуревич В.И. Районирование донных ландшафтов // Геоэкология Ладожского озера / Под ред. В.Л. Иванова и В.И. Гуревича. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 1995. – С. 121–125.

Гуревич Ф.А. Роль фитонцидов во внутренних водоемах / Ф.А. Гуревич // Водные ресурсы. – 1978. – № 2. – С. 133–142.

Гурьева З.И. Аэрометоды геолого-геоморфологического исследования внутреннего шельфа и берегов морей. Атлас аннотированных аэрофотоснимков / З.И. Гурьева, К.М. Петров, В.В. Шарков. – Л.: Недра, 1976. – 228 с.

Гурьянова Е. Ф. Теоретические основы составления карт подводных ландшафтов / Е. Ф. Гурьянова // Вопросы биостратиграфии континентальных толщ. – М., 1959. – С. 52–61.

Гусаков Б. Л. Распределение общего фосфора и общего азота по акватории озера / Б. Л. Гусаков, Е. Б. Мурашева, Г. Ф. Расплетина, А. Ю. Тержевик // Современное состояние экосистемы Ладожского озера / Под ред. Н. А. Петровой, Г. Ф. Расплетинной. – Л.: Наука, 1987. – С. 68–75.

Гусаков Б. Л., Петрова Н. А. Антропогенное эвтрофирование и состояние озерных экосистем / Б. Л. Гусаков, Н. А. Петрова // Пути совершенствования природопользования в бассейнах больших озер / Под ред. Г. М. Воропаевой. – Л.: Наука, 1990. – С. 16–29.

Гусаков Б. Л., Тержевик А. Ю. Лимническое районирование и особенности озерных процессов в лимнических зонах / Б. Л. Гусаков, А. Ю. Тержевик // Ладожское озеро – критерии состояния экосистемы / Под ред. Н. А. Петровой, А. Ю. Тержевика. – СПб.: Наука, 1992. – С. 21–26.

Гусева Д. О. Сезонная динамика численности личинок и оседание молоди дрейссены (*Dreissena polymorpha* Pallas) в карьере Прибрежный (Калининградская область) / Д. О. Гусева // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. – 2009. – Вып. 7. – С. 23–29.

Гусева К. А. К методике учета фитопланктона / К. А. Гусева // Тр. Ин-та биологии водохранилищ. – 1959. – Т. 2. – С. 44–51.

Гусева М. А. Кислородный режим / М. А. Гусева // Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас / Ред. В. А. Румянцев. – СПб.: Нестор-История, 2015. – С. 95.

Гусева М. А. Распределение рН в поверхностном слое / М. А. Гусева // Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас / Ред. В. А. Румянцев. – СПб.: Нестор-История, 2015. – С. 96.

Гусева М. А., Петрова Т. Н. Межгодовая и сезонная динамика основных гидрохимических показателей в устье реки Вуоксы / М. А. Гусева, Т. Н. Петрова // Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Материалы 1-й Международной конференции (11–15 сентября 2017 г.). – Петрозаводск, 2017. – С. 341–347.

Давыдова Н. Н. Антропогенное воздействие на геосистему Ладожского озера по материалам многолетнего мониторинга донных отложений / Н. Н. Давыдова, Д. А. Субетто, М. Кукконен, Х. Симола // Известия РГО. – 1997. – Т. 129. – № 6. – С. 48–58.

Давыдова Н. Н. Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоемов голоцена / Давыдова Н. Н. – Л., 1985. – 224 с.

Давыдова Н. Н. Донные отложения Ладожского озера и его эволюция в позднем плейстоцене – голоцене / Н. Н. Давыдова, И. В. Делюсина, А. Е. Рыбалко и др. // Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера / Под ред. Н. Н. Давыдовой, Б. И. Кошечкина. – СПб.: Российская академия наук. РГО, 1993. – С. 14–24.

Давыдова Н. Н. Опыт районирования поверхностных донных осадков Ладожского озера по составу диатомового комплекса / Н. Н. Давыдова // Известия Всероссийского географического общества. – 1961. – Т. 93. – Вып. 3. – С. 221–228.

Давыдова Н. Н. Развитие экосистемы озера в поздние и послеледниковые по составу диатомовых комплексов донных отложений / Н. Н. Давыдова // Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее. – СПб.: Наука, 2002. – С. 157–164.

Давыдова Н. Н. Состав и условия формирования диатомовых комплексов в поверхностном слое донных отложений Ладожского озера / Н. Н. Давыдова // Растительные ресурсы Ладожского озера. – Л.: Изд. Ленинградского университета, 1968. – С. 131–174.

Давыдова Н. Н. Этапы развития Ладожского озера в поздне- и послеледниковье / Н. Н. Давыдова, Д. А. Субетто, В. И. Хомутова, Е. В. Сапелко // Палеоклиматы и эволюция палеогеографических обстановок в геологической истории Земли. – Петрозаводск, 1998. – С. 26–27.

Давыдова Н. Н., Субетто Д. А. Геоэкологический мониторинг Ладожского озера по палеолимнологическим данным – Ладожское озеро / Н. Н. Давыдова, Д. А. Субетто // Под ред. Н. Н. Филатова. – Петрозаводск, 2000. – С. 66–75.

Дармаева Б. В. Санитарно-экологическая оценка минеральных источников Прибайкалья по микробиологическим показателям: автореферат дис. ... кандидата биологических наук: 03.00.16, 03.00.07 / Дармаева Бальжима Витальевна. – Улан-Удэ, 2007. – 23 с.

Делюсина И. В. Спорово-пыльцевой анализ донных отложений Ладожского озера / И. В. Делюсина // Вестник ЛГУ. – 1988. – Вып. 3. – С. 106–108.

Дзюбан А. Н. и др. Комплексная оценка экологического состояния мелководий Рыбинского и Горьковского водохранилищ / А. Н. Дзюбан, Д. Б. Косолапов, Л. Г. Корнева, И. А. Кузнецова // Биология внутренних вод. – 2007. – № 4. – С. 3–8.

Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России / Под ред. Н. Н. Филатова. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. – 255 с.

Дианский Н. А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия / Н. А. Дианский. – М.: Физматлит, 2013. – 272 с.

Дмитриев В. В. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем / В. В. Дмитриев, Г. Т. Фрумин. – СПб.: Наука, 2004. – 294 с.

Догановский А. М. и др. Водный баланс и многолетние колебания уровня Ладожского озера / А. М. Догановский, Н. В. Мякишева, М. А. Науменко // Ладога / Под. ред. В. А. Румянцев, С. А. Кондратьева. – СПб.: Нестор-История, 2013. – С. 124–132.

Догановский А. М. Многолетние колебания уровня Ладожского озера // Современные проблемы гидрометеорологии. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2006. – С. 175–183.

Домбровская Ф. В. Атлас растительных остатков, встречаемых в торфе / Ф. В. Домбровская, М. М. Корнева, С. Н. Тюремнов. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 90 с.

Драбкова В. Г. Зональное изменение интенсивности микробиологических процессов в озерах / В. Г. Драбкова. – Л.: Наука, 1981. – 212 с.

Драбкова В. Г., Сорокин И. Н. Озеро и его водосбор – единая природная система / В. Г. Драбкова, И. Н. Сорокин. – Л.: Наука, 1979. – 196 с.

Драган Я. П. Методы вероятностного анализа ритмики океанологических процессов / Я. П. Драган, В. А. Рожков, И. Н. Яворский. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 319 с.

Дрегуло А. М. Риски образования метилированных форм ртути на объектах прошлого экологического ущерба / А. М. Дрегуло, В. М. Питугелько, В. В. Кулибаба // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2017. – № 2. – С. 26–39.

Дудакова Д. С. и др. Состав и динамика гидробионтов литорали бухты Петрокрепость Ладожского озера / Д. С. Дудакова, Н. В. Родионова, Е. В. Протопопова, Л. Л. Капустина, Д. С. Бардинский // Труды КарНЦ РАН. Сер. Экологические исследования. – 2015. – № 2. – С. 53–70.

Дудакова Д. С. Исследование донных ландшафтов Ладожского озера с помощью глубоководного телеуправляемого аппарата Limnoscout 230 / Д. С. Дудакова // География: развитие науки и образования. Том I. Коллективная монография

по материалам ежегодной Международной научно-практической конференции LXXI Герценовские чтения (РГПУ им. А.И. Герцена, 18–21 апреля 2018 г.). – СПб., 2018. – С. 295–299.

Дудакова Д.С. Исследование микроэлементного состава раковин пресноводных моллюсков Ладожского озера с помощью LA-ICP-MS метода / Д.С. Дудакова, С.А. Светов // *Вода: химия и экология*. – 2017. – № 11–12. – С. 146–153.

Дудакова Д.С. Метод полигонного исследования распределения мейобентоса в литорали Ладожского озера (на примере северного шхерного района) / Д.С. Дудакова // *Биология внутренних вод*. – 2016. – Т. 9. – № 2. – С. 104–112.

Дудакова Д.С. Опыт применения глубоководного телеуправляемого аппарата для изучения подводных ландшафтов Ладожского озера / Д.С. Дудакова, М.О. Дудаков, В.М. Анохин // *Российский журнал прикладной экологии*. – 2018. – № 4 (16). – С. 51–55.

Дудакова Д.С. Особенности горизонтального распределения мейобентоса скальной литорали Ладожского озера / Д.С. Дудакова // *Региональная экология*. – 2019. – № 3 (57). – С. 26–32.

Дудакова Д.С., Анохин В.М., Дудаков С.М. Использование необитаемого подводного аппарата для исследования бентофауны sublittoral и profundali Ладожского озера / Д.С. Дудакова, В.М. Анохин, С.М. Дудаков // *Труды VIII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2019)»*. Том II (III). – Тверь: ООО ПолиПРЕСС. 2020. – С. 420–423.

Дудакова Д.С., Дудаков М.О. Исследования биогеоценозов шхерного района Ладожского озера (на примере залива Лехмалахти) с применением метода совместного использования аэровидеосъемки и подводных исследований / Д.С. Дудакова, М.О. Дудаков // *География: развитие науки и образования. Коллективная монография по материалам ежегодной международной научно-практической конференции LXVIII Герценовские чтения (РГПУ им. А.И. Герцена, 20–25 апреля 2015 г.)*. – СПб., 2015. – С. 179–183.

Дудакова Д.С., Родионова Н.В. Суточные изменения озерного планктона и бентоса в литоральной зоне Ладожского озера перед штормом / Д.С. Дудакова, Н.В. Родионова // *География: проблемы науки и образования / Материалы ежегодной международной научно-практической конференции LXV Герценовские чтения*. (Санкт-Петербург, РГПУ им. А.И. Герцена, 19–21 апреля 2012 г.). – СПб.: Астерион, 2012. – С. 228–231.

Дудка И.А. Грибы как компоненты пресноводных биоценозов / И.А. Дудка // *Ми-кол. и. фитопатол.* – 1974. – Т. 8. – № 5. – С. 444–449.

Дуленин А.А. Использование легкого телеуправляемого необитаемого подводного аппарата для морских прибрежных гидробиологических исследований / А.А. Дуленин, О.А. Кудревский // *Вестник КамчатГТУ*. – 2019. – № 48. – С. 6–16.

Дятлов М.А. К характеристике нерестового стада ряпушки Ладожского озера / М.А. Дятлов // *Вопр. ихтиологии*. – 1980. – Т. 20. – Вып. 2 (121). – С. 350–354.

Дятлов М.А. О популяционной неоднородности ряпушки Ладожского озера / М.А. Дятлов // *Вопр. ихтиологии*. – 1978. – Т. 18. – Вып. 4 (3). – С. 615–623.

Дятлов М.А. Перспективы рыбохозяйственного использования ситовых Ладожского озера / М.А. Дятлов // *Тез. докл. 2-й республ. конф. по проблемам рыбхоз. исслед. внутр. водоемов Карелии*. – Петрозаводск, 1981. – С. 39–40.

Дятлов М.А. Рыбохозяйственное значение ряпушки Ладожского озера / М.А. Дятлов // *Тез. докл. республ. конф. по проблеме «Рыбохоз. исследования внутр. водоемов Карелии»*. – Петрозаводск, 1979. – С. 34.

Дятлов М. А. Характеристика нерестилищ и условий нереста ряпушки *Coregonus albus* L. Ладожского озера / М. А. Дятлов // Тез. докл. 9 СУСПБР, посвящ. 250-летию АН СССР. – Петрозаводск, 1974. – С. 179–181.

Дятлов М. А., Стерлигов А. В. О биологии ямного сига Ладожского озера в нерестовый период / М. А. Дятлов, А. В. Стерлигов // Докл. Отчетной сессии Ученого Совета СевНИОРХ по итогам научно-исследовательских работ за 1971 год. – Петрозаводск, 1972. – Т. 2. – С. 89–90.

Дятлов М. А., Федорова Г. В. Ямный сиг как экологическая форма ладожских сигов / М. А. Дятлов, Г. В. Федорова // Изв. ГосНИОРХ. – 1977. – Т. 125. – С. 17–22.

Егоров Ю. С. Оптические показатели и взвеси в воде озера / Ю. С. Егоров, В. Б. Румянцев, Е. А. Юдин // Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера / Под ред. Н. А. Петровой. – Л.: Наука, 1982. – С. 61–69.

Ежегодник качества поверхностных вод суши по гидробиологическим показателям на территории деятельности СЗУГКС в 1986 году. – Л., 1987. – 90 с.

Ежегодник качества поверхностных вод суши по гидробиологическим показателям на территории деятельности СЗУГКС в 1987 году. – Л., 1988. – 130 с.

Елина Г. А. Позднеледниковье и голоцен Восточной Фенноскандии (палеорастительность и палеогеография) / Г. А. Елина, А. Д. Лукашов, Т. К. Юрковская. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. – 242 с.

Елина Г. А., Юрковская Т. Г. Методы определения палеогидрологического режима как основа объективизации причин сукцессий растительности болот / Г. А. Елина, Т. Г. Юрковская // Ботанический журнал. – 1992. – Т. 77. – № 7. – С. 120–123.

Жданова С. М. и др. Распространение и пути расселения американской коловратки *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) (Rotifera: Brachionidae) в водоемах европейской России / С. М. Жданова, В. И. Лазарева, Н. Г. Баянов, Е. В. Лобуничева, Н. В. Родионова, Г. В. Шурганова, Д. В. Кулаков, М. Ю. Ильин // Российский журнал биологических инвазий. – 2016. – № 3. – С. 8–22.

Жеглов В. А. Чапский К. К. Опыт авиаучета кольчатой нерпы, серого тюленя и их лунок в заливах Балтийского моря и на Ладожском озере / В. А. Жеглов, К. К. Чапский // Исследования морских млекопитающих. – 1971. – Вып. 39. – С. 323–342.

Жуков Л. А. Общая океанология / Л. А. Жуков. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 376 с.

Жукова Т. В. Донные отложения в экосистеме Нарочанских озер. 1. Внутренняя биогенная нагрузка / Т. В. Жукова, М. В. Мартынова, Э. П. Жуков // Водные ресурсы. – 1990. – № 2. – С. 130–138.

Жукова Т. В. Роль дрейсены (*Dreissena polymorpha* Pallas) в функционировании Нарочанских озер (обзор) // Дрейссениды: эволюция, систематика, экология. Лекции и матер. докл. II Международной школы-конференции (11–15 ноября 2013 г.). – Ярославль: Канцлер, 2013. – С. 55–59.

Журавлев С. А. Трансформация речного стока р. Невы вследствие его регулирования Ладожским озером / С. А. Журавлев // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – № 4. – URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=4720> (дата обращения: 27.07.2020).

Зверев И. С. Оценка влияния основных притоков Ладожского озера на формирование водной массы бухты Петрокрепость (исток р. Невы) по результатам математического моделирования / И. С. Зверев, К. В. Ушаков, Е. А. Шипунова и др. // Материалы I Международной конференции «Озера Евразии: проблемы и пути решения» (Петрозаводск, 11–15 сентября 2017 г.). – Петрозаводск, 2017. – С. 228–233.

Зекцер И. С. и др. Подземный сток в бассейне Ладожского озера / И. С. Зекцер, Л. Б. Ковальский, Б. И. Куделин, Н. П. Небожева // Гидрологический режим

и водный баланс Ладожского озера. (Труды Лаборатории озераведения, Т. 20). – Л.: Изд-во ЛГУ, 1966. – С. 133–150.

Зилов Е. А. Математическое моделирование экосистемы озера Байкал: вчера, сегодня, завтра / Е. А. Зилов // Изв. Самарского НЦ РАН. – 2006. – Т. 8. – С. 58–64.

Знаменская О. М., Ананова Е. Н. Новые данные по истории западного побережья Ладожского озера / О. М. Знаменская, Е. Н. Ананова // История озер Северо-Запада. – Л., 1967. – С. 132–140.

Зуев Ю. А. Опыт водолазного осмотра форелевого хозяйства / Ю. А. Зуев, Н. В. Зуева // Рыбоводство и рыбное хозяйство. – 2013. – № 10. – С. 17–25.

Зуев Ю. А., Зуева Н. В. Опыт исследования макрозообентоса каменистой литорали Ладожского озера / Ю. А. Зуев, Н. В. Зуева // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2013. – № 30. – С. 134–147.

Зуева Н. В. Видовой состав макрофитов заливов Валаамского архипелага // Гидробиотаника (Борок, 16–20 октября 2015 г.). – Борок, 2015. – С. 123–125.

Ибраев Р. А. Математическое моделирование термогидродинамических процессов в Каспийском море / Р. А. Ибраев. – М.: Геос, 2008. – 127 с.

Иванова З. М., Кириллова В. А. Расчет речного притока в Ладожское озеро и сток реки Невы / З. М. Иванова, В. А. Кириллова // Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1966. – С. 119–132.

Игнатов Е. И. Методика исследований донных комплексов мелководной части шельфа / Е. И. Игнатов, Н. П. Митина, В. Г. Папунов // Подводные гидробиологические исследования. – Владивосток, 1982. – С. 80–83.

Игнатьева Н. В. Оценка потоков фосфора в пограничной зоне осадок – вода в Псковско-Чудском озере / Н. В. Игнатьева // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2014. – № 34. – С. 71–78.

Игнатьева Н. В. Роль донных отложений в круговороте фосфора в озерной экосистеме / Н. В. Игнатьева // Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее / Под ред. В. А. Румянцева. – СПб.: Наука, 2002. – С. 148–157.

Игнатьева Н. В. Фосфор в донных отложениях и фосфорный обмен на границе раздела вода – дно в Ладожском озере: автореферат дис. ... кандидата географических наук: 11.00.11 / Игнатьева Наталья Викторовна; Ин-т озераведения. – СПб., 1997. – 24 с.

Игнатьева Н. В., Петрова Т. Н., Гусева М. А. Оценка загрязненности поверхностных вод на территории водосборного бассейна Ладожского озера по гидрохимическим показателям / Н. В. Игнатьева, Т. Н. Петрова, М. А. Гусева // Известия Самарского научного центра РАН. – 2015. – Т. 17. – № 6. – С. 91–96.

Измайлова А. В. Закономерности распределения озер по территории Евразии и оценка их водных ресурсов / А. В. Измайлова // Отчет о научно-исследовательской работе. – СПб., 2019. Номер проекта в ИСГЗ Минобрнауки: № 0154-2019-0004.

Измайлова А. В., Корнеенкова Н. Ю. Озерность территории Российской Федерации и определяющие ее факторы / А. В. Измайлова, Н. Ю. Корнеенкова // Водные ресурсы. – 2020. – Т. 47. – № 1. – С. 16–25.

Изотова А. Ф. Испарение с Ладожского озера / А. Ф. Изотова // Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. – Л.: Изд. Ленинградского гос. университета, 1966. – С. 151–181.

Илюшин Д. Г. Современные методы исследования донных сообществ / Д. Г. Илюшин, А. И. Исаченко, Н. В. Шабалин, В. О. Мокиевский // Инженерные изыскания. – 2014. – № 9–10. – С. 95–101.

Иностранцев А. А. Доисторический человек каменного века побережья Ладожского озера / А. А. Иностранцев. – СПб.: Изд. на средства М-ва нар. прос., 1882. – 241 с.

Иофина И.В. Структура и функциональные характеристики водной микрофлоры / И.В. Иофина // Ладожское озеро – критерии состояния экосистемы / Под ред. Н.А. Петровой, А.Ю. Тержевика. – СПб.: Наука, 1992. – С. 176–186.

Иоффе Ц.И. Донная фауна крупных озер Балтийского бассейна и ее рыбохозяйственное значение / Ц.И. Иоффе // Известия ВНИОРХ. – 1948. – Т. XXVI. – Вып. 2. – С. 89–143.

Ипатов С.В. Результаты мониторинга качества вод водных объектов системы Ладога – Нева – Невская губа / С.В. Ипатов // Улучшение экологического состояния Невско-Ладожской водной системы – залог устойчивого развития Северо-Западного региона России: конф. (Санкт-Петербург, 25 апреля 2017 г.). – СПб., 2017. – С. 17.

Исаев А.В., Савчук О.П. Диагноз состояния экосистемы Ладожского озера и прогноз изменений при возможном изменении климата на основе математического моделирования биогеохимических потоков вещества / А.В. Исаев, О.П. Савчук // Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России / Под ред. Н.Н. Филатова. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. – С. 197–208.

Исаченко А.Г. Физико-географическое картирование / А.Г. Исаченко. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1961. – 268 с.

Исаченко А.Г., Шляпников А.А. Ландшафты / А.Г. Исаченко, А.А. Шляпников. – М.: Мысль, 1989. – 504 с.

Исаченко Г.А. Многолетняя динамика ландшафтов северо-западного Приладожья по данным стационарных наблюдений / Г.А. Исаченко // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2018. – Т. 63. – № 1. – С. 3–21.

Истомина А.М. и др. Первая находка *Dreissena bugensis* (Andrusov, 1897) (*Bivalvia: Dreissenidae*) в Среднекамских водохранилищах / А.М. Истомина, И.В. Поздеев, Г.Х. Щербина // Биология внутренних вод. – 2012. – № 1. – С. 107–108.

Истомина Э.Г., Яковлев З.М. Голубое диво (историко-географический справочник о реках, озерах и болотах Новгородской области) / Э.Г. Истомина, З.М. Яковлев. – Л.: Лениздат, 1989. – 222 с.

История озер СССР. История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки / Д.Д. Квасов, Г.Г. Мартинсон, А.В. Раукас. – Л.: Наука, 1990. – 280 с.

Калесник С.В. Ладожское озеро / С.В. Калесник. – Л.: Изд. Ленинградского гос. университета, 1968. – 160 с.

Калинкина Н.М. Многолетняя динамика стока железа и фосфора в Онежское озеро с водами р. Шуя в условиях климатических изменений / Н.М. Калинкина, Н.Н. Филатов, Теканова Е.В. и др. // Региональная экология. – 2018. – № 2 (52). – С. 7–15.

Капустина Л.Л. Бактериопланктон Ладожского озера / Л.Л. Капустина // Ладога / Под ред. В.А. Румянцева, С.А. Кондратьева. – СПб.: Наука, 2013. – С. 289–298.

Капустина Л.Л. Пространственно-временное распределение и функциональные характеристики бактериопланктона / Л.Л. Капустина // Ладожское озеро. Критерии устойчивости экосистемы / Под ред. Н.А. Петровой, А.Ю. Тержевика. – СПб.: Наука, 1992. – С. 146–179.

Карабанов Е.Б. Подводные каньоны Байкала / Е.Б. Карабанов, В.А. Фиалков. – Новосибирск: Наука, 1987. – 102 с.

Караушев А.В. Теория и методы расчета речных наносов / А.В. Караушев. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 272 с.

Каретников С.Г., Науменко М.А. Ледовый режим // Ладога / Под ред. В.А. Румянцева, С.А. Кондратьева. – СПб.: Нестор-История, 2013. – С. 152–163.

Карпечко Ю.В. и др. Баланс химических элементов в сосняке и ельнике Карелии / Ю.В. Карпечко, П.А. Лозовик, Н.Г. Федорец // Лесоведение. – 2018. – № 2. – С. 107–118.

Карпечко Ю.В. и др. Особенности формирования испарения в различных по возрасту, условиям произрастания и продуктивности лесах / Ю.В. Карпечко, С.А. Кондратьев, В.З. Родионов, М.В. Шмакова // Гидрометеорология и экология (Ученые записки РГГМУ). – 2020. – № 1 (58). – С. 49–67.

Карпечко Ю.В., Мясникова Н.А. Особенности формирования листового аппарата и транспирации хвойного древостоя / Ю.В. Карпечко, Н.А. Мясникова // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия «Естественные и технические науки». – 2014. – № 4 (141). – С. 78–84.

Карпечко Ю.В., Мясникова Н.А. Расчет фитомассы древостоя / Ю.В. Карпечко, Н.А. Мясникова // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия «Естественные и технические науки». – 2012. – № 4 (125). – С. 77–81.

Катаев М.Ю., Бекеров А.А. Методика обнаружения водных объектов по много-спектральным спутниковым измерениям / М.Ю. Катаев, А.А. Бекеров // Доклады ТУСУРа. – 2017. – Т. 20. – № 4. – С. 105–108.

Каталог озер и рек Карелии / Под ред. Н.Н. Филатова, А.В. Литвиненко. – Петрозаводск: Изд. Карельского НЦ РАН, 2001. – 290 с.

Катанская В.М. Высшая водная растительность континентальных водоемов СССР. Методы изучения / В.М. Катанская. – Л.: Наука, 1981. – 187 с.

Катков А.Е. Введение в региональную радиологию моря / А.Е. Катков. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 160 с.

Кац Н.Я. Атлас растительных остатков в торфах / Н.Я. Кац, С.В. Кац, Е.И. Скобеева. – М.: Недра, 1977. – 376 с.

Квасов Д.Д. История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки / Д.Д. Квасов, Г.Г. Мартинсон, А.В. Раукас. – Л.: Наука, 1990. – 280 с.

Квасов Д.Д. Позднечетвертичная история крупных озер и внутренних морей восточной Европы / Д.Д. Квасов. – Л., 1975. – 278 с.

Киреева И.Ю. Морфобиологические и структурные показатели бактериопланктона как биоиндикаторы / И.Ю. Киреева // Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем. Сб. материалов междунар. конф. – СПб.: Изд-во Лема, 2007. – С. 191–193.

Кириллова В.А. Водный приток / В.А. Кириллова // Современное состояние экосистем Ладожского озера. – Л.: Наука, 1987. – С. 23–27.

Кириллова Т.В. Радиационный режим озер и водохранилищ / Т.В. Кириллова. – Л.: Гидрометеоздат, 1970. – 253 с.

Киселев И.А. Планктон морей и континентальных водоемов. Т. 2. Распределение, сезонная динамика, питание и значение / И.А. Киселев. – Л.: Наука, 1980. – 440 с.

Китаев С.П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон / С.П. Китаев – М.: Наука, 1984. – 207 с.

Клейменова Г.И. Реконструкция палеогеографических обстановок в голоцене на северо-западе России / Г.И. Клейменова // Вестник СПбГУ. – 2000. – сер. 7. – Вып. 4 (№ 31). – С. 48–59.

Ковалёва М.П. Рыбопромысловые зоны Ладожского озера / М.П. Ковалёва // Изв. ВНИОРХ. – 1956. – Т. 38. – С. 154–172.

Кожевникова Е.А. и др. Биоэкологическая оценка модельного водоема при экспериментальном загрязнении металлами в наноформе / Е.А. Кожевникова, С.А. Леднева, Е.А. Сизова, А.Е. Аринжанов // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2017. – № 5 (205). – С. 63–69.

Кожевникова Е. А. Оценка влияния железосодержащих наночастиц на гидробионтов в условиях модельного эксперимента / Е. А. Кожевникова // Нанотехнологии в сельском хозяйстве: перспективы и риски. Материалы международной научно-практической конференции. – 2018. – С. 205–208.

Кожова О. М., Дутова Н. В. Морфологическое разнообразие планктонных бактерий как показатель качества вод / О. М. Кожова, Н. В. Дутова // Гидробиологический журнал. – 1989. – Т. 25. – № 1. – С. 42–48.

Козловский В. В. и др. Пространственная структура сообществ макро- и мейобентоса в однородной среде (на примере Печорского моря) / В. В. Козловский, М. В. Чикина, Н. В. Шабалин, А. Б. Басин, В. О. Мокиевский, Н. В. Кучерук // Океанология. – 2019. – Т. 59, № 3. – С. 405–412.

Коколия Т. Г. О развитии водного гриба Лептомитуса и других компонентов биологических обрастаний в р. Неве / Т. Г. Коколия // Санитарное состояние реки Невы / Под ред. В. А. Попова. – Л.: Гидрометиздат, 1967. – С. 110–126.

Кольчугина О. А., Латыпова В. З., Аршаница Н. М. Антропогенная нагрузка на Волховское водохранилище / О. А. Кольчугина, В. З. Латыпова, Н. М. Аршаница // Промышленная экология и безопасность. Материалы VIII Международного форума «Нефть, газ, экология». – Казань, 2010. – С. 114–118.

Комолова С. А. Сфагновые мхи водосбора озера Германовского (природный парк «Валаамский архипелаг») / С. А. Комолова, А. Б. Степанова, Е. Ю. Кузьмина и др. // Новости систематики высших растений. – 2015. – № 49. – С. 328–344.

Комолова С. А. Экологические характеристики доминирующих видов сфагновых мхов водосбора оз. Германовское (о. Валаам) / С. А. Комолова // Международная бриологическая конференция (Санкт-Петербург, 12–16 октября 2015 г.). – СПб., 2015. – С. 71–75.

Комплексные исследования подводных ландшафтов в Белом море с применением дистанционных методов // Труды Беломорской биостанции МГУ, Том 11 / Под ред. М. О. Мокиевского. – М.: Тов-во науч. изданий КМК, 2012. – 173 с.

Кондакова Г. В. Биоиндикация. Микробиологические показатели: учебное пособие / Г. В. Кондакова. – Ярославль: ЯрГУ, 2007. – 136 с.

Кондратьев С. А. Влияние вырубок леса на сток и вынос биогенных элементов с лесных водосборов Карелии (по данным математического моделирования) / С. А. Кондратьев, Ю. В. Карпечко, М. В. Шмакова // Гидрометеорология и экология. – 2020. – 59. – С. 51–66.

Кондратьев С. А. Внешняя и внутренняя фосфорная нагрузка на водоем на примере водохранилища Сестрорецкий Разлив / С. А. Кондратьев, Н. В. Игнатьева, С. Г. Каретников // Региональная экология. – 2016. – № 4 (46). – С. 59–70.

Кондратьев С. А. и др. Биогенная нагрузка на Онежское озеро от рассеянных источников по результатам математического моделирования / С. А. Кондратьев, М. В. Шмакова, Е. Г. Маркова, П. А. Лозовик, А. Ю. Брюханов, Е. Ф. Чичкова // Изв. РГО. – 2016. – № 148. – Вып. 5. – С. 53–63.

Кондратьев С. А. и др. Выбор возможного расположения водозабора на акватории Ладожского озера для обеспечения Санкт-Петербурга питьевой водой / С. А. Кондратьев, Ш. Р. Поздняков, А. М. Крючков, С. Г. Каретников, В. В. Гузиватый // Материалы конференции «Настоящее и будущее урбанизации: экологические вызовы» – СПб., 2012. – С. 35–40.

Кондратьев С. А. и др. Метод оценки выноса биогенных веществ с водосборов и биогенной нагрузки на водные объекты Северо-Западного региона Российской Федерации / С. А. Кондратьев, М. В. Казмина, М. В. Шмакова. – СПб.: Изд-во Лема, 2011. – 20 с.

Кондратьев С. А. и др. Моделирование абиотических процессов в системе водосбор – водоем (на примере Чудско-Псковского озера) / С. А. Кондратьев, С. Д. Голосов, И. С. Зверев, В. А. Рябченко, А. Ю. Дворников. – СПб.: Нестор-История, 2010. – 116 с.

Кондратьев С. А. и др. Опыт экспериментальных исследований и математического моделирования воздействий вырубки леса и последующего лесовосстановления на сток и вынос химических веществ с лесных водосборов / С. А. Кондратьев, Ю. В. Карпечко, М. В. Шмакова, А. М. Расулова, В. З. Родионов // Региональная экология. – 2019. – № 1 (55). – С. 25–53. DOI: 10.30694 / 1026-5600-2019-1-25-53.

Кондратьев С. А. и др. Оценка стока воды, выноса фосфора и органического вещества с малых водосборов северо-запада России и Финляндии (по данным математического моделирования) / С. А. Кондратьев, Л. Арвола, И. Хакала и др. // Известия РГО. – 2003. – Т. 135. – Вып. 6. – С. 29–36.

Кондратьев С. А. и др. Характеристика подстилающей поверхности / С. А. Кондратьев, Г. А. Алябина, И. Н. Сорокин // Ладога / Под ред. В. А. Румянцев, С. А. Кондратьева. – СПб.: Нестор-История, 2013. – С. 28–35.

Кондратьев С. А. Метод оценки природной составляющей внешней нагрузки органическим веществом и биогенными элементами на водоемы северо-запада России / С. А. Кондратьев, Г. А. Алябина, И. Н. Сорокин // География и природные ресурсы. – 2010. – № 4. – С. 130–136.

Кондратьев С. А. Опыт моделирования Ладожского озера / С. А. Кондратьев, С. Д. Голосов, А. В. Толмачев // Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее / Под ред. В. А. Румянцев, В. Г. Драбковой. – СПб.: Наука, 2002. – С. 269–283.

Кондратьев С. А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования / С. А. Кондратьев. – СПб.: Наука, 2007. – 253 с.

Кондратьев С. А., Поздняков Ш. Р. Гидрофизическое обоснование выбора расположения водозабора на акватории крупного водоема (на примере Ладожского озера) / С. А. Кондратьев, Ш. Р. Поздняков // Чистая вода. Проблемы и решения. – 2012. – № 1–2. – С. 84–87.

Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Детерминированно-стохастическая оценка воздействия климатических изменений на сток с водосбора реки Невы // Труды IV Конференции «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов». – М., 2015. – С. 302–304.

Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Детерминированно-стохастическое моделирование массопереноса в системе водосбор – водоем / С. А. Кондратьев, М. В. Шмакова // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2018. – Т. 11. – № 4. – С. 55–65.

Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор – водоток – водоем / С. А. Кондратьев, М. В. Шмакова. – СПб.: Нестор-История, 2019. – 246 с.

Копылов А. И., Косолапов Д. Б. Микробиологические индикаторы эвтрофирования пресных водоемов / А. И. Копылов, Д. Б. Косолапов // Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем. Сб. материалов междунар. конф. – СПб.: Изд-во Лема, 2007. – С. 176–181.

Коркишко Н. Н. и др. Органическое вещество воды Ладожского озера / Н. Н. Коркишко, Т. П. Кулиш, Т. Н. Петрова, О. А. Черных // Ладожское озеро. Мониторинг исследования современного состояния и проблемы управления Ладожским озером и другими большими озерами. – Петрозаводск, 2000. – С. 105–110.

Коркишко Н. Н. Применение высокоэффективной газожидкостной хроматографии для изучения органических соединений различной природы в воде Ладожского озера и других водоемов его бассейна / Н. Н. Коркишко, Ю. В. Крылова, Е. А. Курашов и др. // Экологическая химия. – 2001. – Т. 10. – № 2. – С. 89–108.

Коркишко Н.Н. Трансформация органического вещества воды Ладожского озера в условиях антропогенного эвтрофирования / Н.Н. Коркишко, Т.П. Кулиш, Ю.В. Крылова и др. // Экологическая химия. – 1995. – Т. 10. – № 4. – С. 288–295.

Коркишко Н.Н., Крылова Ю.В. Исследование воды озера методом высокоэффективной газожидкостной хроматографии / Н.Н. Коркишко, Ю.В. Крылова // Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее / Под ред. В.А. Румянцева. – СПб.: Наука, 2002. – С. 117–121.

Корш Л.Е., Артемова Т.З. Ускоренные методы санитарно-бактериологического исследования воды / Л.Е. Корш, Т.З. Артемова. – М.: Медицина, 1978. – 265 с.

Красная книга природы Ленинградской области. Том 2. Растения и грибы / Ред. Н.Н. Цвелев. – СПб.: АНО НПО Мир и Семья, 2000. – 672 с.

Краснова Е.Д. Мейобентос в планктоне: случайность или закономерность? / Е.Д. Краснова // Материалы X научной конференции Беломорской биологической станции МГУ: Сборник статей. – М.: Изд. «Гриф и К», 2006. – С. 63–67.

Крестовский О.И. Влияние вырубок и восстановления лесов на водность рек / О.И. Крестовский. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 118 с.

Крупнейшие озера-водохранилища северо-запада европейской части России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Отв. ред. Н.Н. Филатов. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. – 375 с.

Крылова Ю.В. Оценка современного экологического состояния Ладожского озера по токсикологическим и гидрохимическим показателям / Ю.В. Крылова, Е.С. Светашова, С.Б. Екимова, и др. // Материалы VII Всероссийской конференции по водной экотоксикологии, посвященной памяти Б.А. Флерова. «Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы» (16–18 сентября 2020 г.). – Борок, 2020. – С. 106–109.

Крылова Ю.В. Трансформация природных метаболитов и проблема загрязнения Ладоги хлороорганическими ксенобиотиками / Ю.В. Крылова, Н.Н. Коркишко, Е.А. Курашов и др. // Государственный доклад. О состоянии окружающей среды в Санкт-Петербурге и Ленинградской области в 1998 году. – СПб., 2000. – С. 31–42.

Крылова Ю.В., Коркишко Н.Н. Закономерности процессов трансформации природных метаболитов в Ладожском озере, определяемых методами газожидкостной хроматографии / Ю.В. Крылова, Н.Н. Коркишко // Ладожское озеро. Мониторинг, исследование современного состояния и проблемы управления Ладожским озером и другими большими озерами. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2000. – С. 116–123.

Крышнякова О.С., Малинин В.Н. К анализу трендов в колебаниях температуры воздуха и осадков на европейской территории России / О.С. Крышнякова, В.Н. Малинин // Известия РГО. – 2009. – Т. 141. – Вып. 2. – С. 23–30.

Кудерский Л.А. Биоресурсы и рыболовство / Л.А. Кудерский // Ладога / Под ред. В.А. Румянцев и С.А. Кондратьева. – СПб.: Нестор-История, 2013. – С. 485–504.

Кудерский Л.А. Изменения рыбного населения Ладожского озера за последние 50 лет / Л.А. Кудерский // Ладожское озеро (мониторинг, исследование современного состояния и проблемы управления Ладожским озером и другими большими озерами) / Под ред. Н.Н. Филатова. – Петрозаводск, 2000. – С. 298–311.

Кудерский Л.А. Изменения состояния рыбных ресурсов в Ладожском озере в связи с естественными и антропогенными факторами / Л.А. Кудерский // Сб. Научных трудов. – СПб.: ИПК Прикладная экология, 2011. – С. 89–107.

Кудерский Л.А. История формирования ихтиофауны больших озер бассейна Финского залива / Л.А. Кудерский // Охрана и рациональное использование водных

ресурсов Ладожского озера и других больших озер. – СПб.: ИНОЗ РАН, 2003. – С. 468–474.

Кудерский Л. А. О необходимой численности хищных рыб при использовании их в качестве биологического мелиоратора / Л. А. Кудерский // Рыбное хозяйство внутренних водоемов Латвийской ССР. – 1963. – Т. 7. – С. 317–325.

Кудерский Л. А. Позднеплейстоценовая и голоценовая история озера / Л. А. Кудерский, Т. В. Сапелко, Д. А. Субетто // Ладога / Под ред. В. А. Румянцев, С. А. Кондрашева. – СПб.: Нестор-История, 2013. – С. 14–22.

Кудерский Л. А. Пути формирования ихтиофауны Ладожского озера / Л. А. Кудерский // Общество, среда, развитие. – 2007. – № 3 (4). – С. 102–110.

Кудерский Л. А. Состав и промысловое значение рыбного населения Ладожского озера / Л. А. Кудерский // Сборник научных трудов ГосНИОРХ. 2009. – Вып. 334. – С. 138–212.

Кудерский Л. А. Экологическое состояние водной системы Онежское озеро – Ладожское озеро – река Нева / Л. А. Кудерский, В. А. Румянцев, В. Г. Дробкова // Финский залив в канун XXI века. – СПб.: ИНОЗ РАН, 2000. – 79 с.

Кузнецов С. И. Микрофлора озер и ее геохимическая деятельность / С. И. Кузнецов. – М.: Наука, 1970. – 440 с.

Кузнецов С. И., Дубинина Г. А. Методы изучения водных микроорганизмов / С. И. Кузнецов, Г. А. Дубинина. – М.: Наука, 1989. – 285 с.

Кулибаба В. В. Рекультивированные карьеры Приневской низменности – специфическая разновидность объектов накопленного экологического ущерба / В. В. Кулибаба, В. В. Петухов, Е. И. Зинатулина, Е. С. Меринова // Региональная экология. – 2016. – № 1. – С. 48–54.

Куликова Т. П. Зоопланктон водных объектов бассейна Белого моря / Т. П. Куликова. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. – 325 с.

Куличенко А. Ю. Влияние особенностей лимнологического режима на макрозообентос озер Валаамского архипелага / А. Ю. Куличенко // VI Всероссийский Гидрологический съезд. Секция 4. Экологическое состояние водных объектов. Качество вод и научные основы их охраны (Санкт-Петербург, 28 сентября – 1 октября 2004). – СПб., 2004. – С. 241–243.

Куличенко А. Ю. Динамика *ASELLUS AQUATICUS* L. в разнотипных озерах Валаамского архипелага / А. Ю. Куличенко // IX Съезд Гидробиологического общества РАН (Тольятти, 18–22 сентября 2006). – Тольятти, 2006. – Т. 1. – С. 255.

Кулиш Т. П. Гидрохимические исследования системы органического углерода озерной воды / Т. П. Кулиш // Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее / Под ред. В. А. Румянцев, В. Г. Дробковой. – СПб.: Наука, 2002. – С. 107–111.

Курашов Е. А. Бентос озера / Е. А. Курашов, М. А. Барбашова, Д. С. Дудакова // Ладога. – СПб.: Нестор-История, 2013. – С. 309–319.

Курашов Е. А. и др. Перспективы использования низкомолекулярного метаболизма водных макрофитов для индикации экологического состояния водных экосистем / Е. А. Курашов, Ю. В. Крылова, А. А. Егорова и др. // Вода: химия и экология. – 2018б. – № 1–3. – С. 68–79.

Курашов Е. А. и др. Экосистема Ладожского озера: современное состояние и тенденции ее изменения в конце XX – начале XXI в. / Е. А. Курашов, М. А. Барбашова, Д. С. Дудакова и др. // Биосфера. – 2018а. – Т. 10. – № 2. – С. 65–121. DOI: <http://dx.doi.org/10.24855/biosfera.v10i2.439>.

Курашов Е. А. Инвазивные амфиподы как фактор трансформации экосистемы Ладожского озера / Е. А. Курашов, М. А. Барбашова, Д. В. Барков, А. Г. Русанов, М. С. Лаврова // Российский журнал биологических инвазий. – 2012. – № 2. – С. 87–104.

Курашов Е. А. Использование сообщества мейобентоса для индикации экологического состояния среды в Ладожском озере / Е. А. Курашов // Сборник научных трудов ГосНИОРХ. – Л., 1989. – Вып. 291. – С. 73–80.

Курашов Е. А. Мейобентос в пресноводных экосистемах. Его роль и перспективы исследования / Е. А. Курашов // Актуальные вопросы изучения микро-, мейозобентоса и фауны зарослей пресноводных водоемов / Тематические лекции и материалы I Международной школы-конференции. – Нижний Новгород: Вектор ТиС. 2007а. – С. 36–71.

Курашов Е. А. Мейобентос как компонент озерной экосистемы / Е. А. Курашов. – СПб.: Алга-Фонд, 1994. – 224 с.

Курашов Е. А. Мейобентоспрофундали и закономерности его изменения / Е. А. Курашов // Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее / Под ред. В. А. Румянцева, В. Г. Драбковой. – СПб.: Наука, 2002. – С. 211–223.

Курашов Е. А. Методы и подходы для количественного изучения пресноводного мейобентоса / Е. А. Курашов // Актуальные вопросы изучения микро-, мейозобентоса и фауны зарослей пресноводных водоемов / Тематические лекции и материалы I Международной школы-конференции. – Нижний Новгород: Вектор ТиС. 2007б. – С. 5–35.

Курашов Е. А. О соотношении биомасс мейо- и макробентоса и доле мейобентоса в общей биомассе зообентоса в озерных экосистемах при различной продуктивности бентосных сообществ / Е. А. Курашов // Исследования пресноводных и морских беспозвоночных животных. – Л., 1986. – С. 162–171.

Курашов Е. А. Перспективы использования низкомолекулярного метаболома водных макрофитов для индикации экологического состояния водных экосистем / Е. А. Курашов, Ю. В. Крылова, А. А. Егорова, А. С. Сущенко, В. В. Ходонович, Е. Я. Явид // Вода: химия и экология. – 2018. – № 1. – С. 68–79.

Курашов Е. А. Экосистема Ладожского озера: современное состояние и тенденции ее изменения в конце XX – начале XXI в. / Е. А. Курашов, М. А. Барбашова, Д. С. Дудакова и др. // Биосфера. – 2018. – Т. 10. – № 2. – С. 65–121.

Курашов Е. А., Барбашова М. А., Дудакова Д. С. Бентос озера / Е. А. Курашов, М. А. Барбашова, Д. С. Дудакова // Ладога / Ред. В. А. Румянцев, С. А. Кондратьев. – СПб.: Нестор-История, 2013. – С. 392–406.

Курашов Е. А., Барков Д. В., Анисимов А. А. Роль байкальского вселенца *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing) в формировании литоральных биоценозов о. Валаам (Ладожское озеро) / Е. А. Курашов, Д. В. Барков, А. А. Анисимов // Биология внутренних вод. – 2006. – № 1. – С. 74–84.

Курашов Е. А., Дудакова Д. С. Мейобентос литоральной зоны Ладожского озера / Курашов Е. А., Д. С. Дудакова // Литоральная зона Ладожского озера / СПб.: Нестор-История, 2011. – С. 252–278.

Курашов Е. А., Дудакова Д. С. Мейобентос литоральной зоны Ладожского озера и его использование для диагностики состояния среды / Е. А. Курашов, Д. С. Дудакова // Российский журнал прикладной экологии. – 2018. – № 4 (16). – С. 22–29.

Кутикова Л. А. Коловратки фауны СССР. (Rotatoria). Подкласс Eurotatoria (отряды Ploimida, Monimotrochida, Paedotrochida) / Л. А. Кутикова. – Л.: Наука, 1970. – 744 с.

Ладога / Под ред. В. А. Румянцева, С. А. Кондратьева. – СПб.: Нестор-История, 2013. – 468с.

Ладожское озеро – критерии состояния экосистемы / Под ред. Н. А. Петровой, А. Ю. Тержевика. – СПб.: Наука, 1992. – 328 с.

Ладожское озеро (развитие рельефа и условия формирования четвертичного покрова котловины) / Отв. ред. Г. С. Бискэ. – Петрозаводск: Карелия, 1978. – 208 с.

Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас / В. А. Румянцев, А. И. Сорокин, Н. А. Нестеров. – СПб.: Нестор-История, 2015. – 199 с.

Ладожское озеро. Атлас / В. А. Румянцев, А. И. Сорокин. – СПб.: ИНОЗ РАН, 2002. – 128 с.

Ладожское озеро. Мониторинг, исследование современного состояния и проблемы управления Ладожским озером и другими большими озерами / Под ред. Н. Н. Филатова. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2000. – 490 с.

Ладожское озеро. Прошлое, настоящее, будущее / Под ред. В. А. Румянцева, В. Г. Драбковой. – СПб.: Наука, 2002. – 327 с.

Ладожское озеро. Современное состояние. Мониторинг. Проблемы управления Ладожским и другими озерами / Под ред. Н. Филатова. – Петрозаводск: Изд. КНЦ, 2000. – 508 с.

Ладожское озеро: критерии состояния экосистемы / Под ред. Н. А. Петровой, А. Ю. Тержевика. – СПб.: Наука, 1992. – 326 с.

Ладожское озеро: теория и реальность / В. В. Меншуткин, Н. А. Петрова, И. В. Иофина и др. // Российская академия наук, Санкт-Петербургский экономико-математический институт, Институт озероведения. – СПб.: Нестор-История, 2015. – 75 с.

Лак Г. Ц. О морских надморенных отложениях на северо-восточном побережье Ладожского озера / Г. Ц. Лак // Стратиграфия и палеогеография четвертичного периода Севера европейской части СССР. – Петрозаводск, 1977. – С. 83–87.

Левич А. П., Терехин А. Т. Метод расчета экологически допустимых уровней воздействия на экосистемы (метод ЭДУ) / А. П. Левич, А. Т. Терехин // Водные ресурсы. – 1997. – Т. 24 (3). – С. 328–335.

Лепихин А. П., Головачева С. И. К проблеме регламентации отведения взвешенных веществ в естественные водотоки / А. П. Лепихин, С. И. Головачева // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2015. – № 1. – С. 4–13.

Лесненко В. К. Природа озер Полистовского болотного ландшафта и перспективы их рыбохозяйственного использования / В. К. Лесненко, А. А. Слинчак, В. Е. Аброзов и др. // Ленинград: Пед. инст. им. А. И. Герцена, 1988. – 56 с.

Лесохозяйственные регламенты Пудожского и Пряжинского лесничеств Республики Карелия на 2012–2021 гг. – Петрозаводск, 2011. – 149 с.

Летанская Г. И. Закономерности пространственно-временного распределения фитопланктона Ладожского озера / Г. И. Летанская // Охрана и рациональное использование водных ресурсов Ладожского озера и других больших озер. Труды IV Международного симпозиума по Ладожскому озеру. Великий Новгород, Россия. 2–6 сентября 2002. – СПб., 2003. – С. 134–137.

Летанская Г. И. Мониторинг фитопланктона Ладожского озера / Г. И. Летанская // Ладожское озеро. Мониторинг исследования современного состояния и проблемы управления Ладожским озером и другими большими озерами. – Петрозаводск, 2000. – С. 168–178.

Летанская Г. И., Протопопова Е. В. Современное состояние фитопланктона Ладожского озера (2005–2009 гг.) / Г. И. Летанская, Е. В. Протопопова // Биология внутренних вод. – 2012. – № 4. – С. 17–24.

Лисицын С. Н., Герасимов Д. В. Окружающая среда и человек в раннем голоцене Юго-Восточной Фенноскандии / С. Н. Лисицын, Д. В. Герасимов // Путь на Север: Окружающая среда и самые ранние обитатели Арктики и Субарктики / Под ред. А. А. Величко, С. А. Васильева. – М.: Ин-т географии РАН, 2008. – С. 134–151.

Литвинов М. А., Дудка И. А. Методы исследования микроскопических грибов пресных и соленых (морских) водоемов / М. А. Литвинов, И. А. Дудка. – Л.: Наука, 1977. – 151 с.

Литоральная зона Ладожского озера / Под ред. Е.А. Курашова. – СПб.: Нестор-История, 2011. – 416 с.

Лозовик П., Филатов Н. Качество поверхностных вод / П. Лозовик, Н. Филатов // Водные ресурсы Республики Карелия и пути их использования для питьевого водоснабжения. – Петрозаводск: Куопио, 2006. – С. 75–87.

Лозовик П.А., Ефременко Н.А. Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / П.А. Лозовик, Н.А. Ефременко. – СПб.: Нестор-История, 2017. – 271 с.

Локк С.И. Бактериопланктон Чудско-Псковского озера / С.И. Локк // Структура и функционирование сообществ водных микроорганизмов / Под ред. М.И. Новожилова, В.В. Дрюккер. – Новосибирск: Наука, 1986. – С. 37–40.

Лудикова А.В. Диатомовые водоросли позднеледниковых отложений Ладожского озера / А.В. Лудикова // Актуальные проблемы современной палинологии. – М., 2017. – С. 163–165.

Лудикова А.В. Диатомовые водоросли позднеледниковых отложений Ладожского озера / А.В. Лудикова // География: развитие науки и образования (Санкт-Петербург, 18–21 апреля 2018 г.) – СПб., 2018. – С. 407–412.

Лудикова А.В. Колебания уровня Ладожского озера в голоцене (на основе палеолимнологических исследований оз. Святого Сергия на о. Путсаари) / А.В. Лудикова, Д.А. Субетто, Н.Н. Давыдова и др. // Известия РГО. – 2005. – Т. 137. – Вып. 6. – С. 34–41.

Лудикова А.В. Субфоссильные диатомовые комплексы в оценке состояния водной среды Ладожского озера / А.В. Лудикова // Региональная экология. – 2017а. – № 4. – С. 53–61.

Лудикова А.В. Цисты Chrysophyceae в донных отложениях Ладожского озера – потенциальная индикаторная группа для палеореконструкций / А.В. Лудикова // Динамика экосистем в голоцене. – М., 2019. – С. 202–203.

Лукашов А.Д. Морфоструктура Северного Приладожья / А.Д. Лукашов // Геоморфология и геология четвертичного периода европейской части СССР. – Петрозаводск: Изд-во АН СССР, Карельский филиал, 1976. – С. 50–59.

Лукин А.А. Состояние запасов основных промысловых видов рыб Ладожского озера / А.А. Лукин, Ю.Н. Лукина, И.А. Тыркин // Вопросы рыболовства. – 2017. – Т. 18. – № 3. – С. 304–312.

Ляпунов А.А. О математическом подходе к изучению жизненных явлений / А.А. Ляпунов // Математическое моделирование жизненных явлений. – М.: Мысль, 1968. – С. 65–100.

Ляхнович В.П. и др. Условия обитания / В.П. Ляхнович, А.Ю. Каратаев, С.М. Ляхов и др. // Дрейссена: Систематика, экология, практическое значение. – М.: Наука, 1994. – С. 109–119.

Ляхов Д.Г. Применение телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов для изучения донных гидробионтов / Д.Г. Ляхов, А.А. Яковлев // Повышение эффективности использования водных биологических ресурсов. Первая Международная научно-практическая конференция: Материалы конференции. – М.: Изд-во ВНИРО, 2006. – С. 153–154.

Макрушин А.В. Проявления глобального экологического кризиса на организменном уровне (на примере ветвистоусых ракообразных и двусторчатых моллюсков Unionidae) / А.В. Макрушин, С.М. Голубков, Т.А. Асанова и др. // Труды Зоологического института РАН. – 2013. – Т. 317. – № 3. – С. 33–40.

Макрушин А.В., Беляков В.П., Родионова Н.В. Патоморфологическое обследование гидробионтов из озер Ленинградской области / А.В. Макрушин, В.П. Беляков, Н.В. Родионова // Вода: химия и экология. – 2016. – № 5 (95). – С. 41–45.

Малаховский Д. Б. Мгинская морская межледниковая толща северо-запада РСФСР. / Д. Б. Малаховский, О. М. Знаменская, Е. В. Рухина // Палеогеография озерных и морских бассейнов северо-запада СССР в плейстоцене. – Л.: Изд-во географического общества, 1989. – С. 44–60.

Малаховский Д. Б. Новые данные по истории возникновения Невы / Д. Б. Малаховский, Х. А. Арсланов, Н. А. Гей, Р. Н. Джиноридзе // Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера. – СПб., 1993. – С. 74–84.

Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации / В. Н. Малинин. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2008. – 408 с.

Малинин В. Н., Гурьянов Д. А. Межгодовая изменчивость климатических сезонов в Санкт-Петербурге / В. Н. Малинин, Д. А. Гурьянов // Известия РГО. – 2015. – Т. 147 – Вып. 5. – С. 17–27.

Малинина Т. И. Водный баланс Ладожского озера / Т. И. Малинина // Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. – Л.: ЛГУ, 1966. – С. 182–203.

Малинина Т. И. и др. Закономерности изменчивости внешнего и внутреннего водообмена [на примере Байкала и других озер] / Т. И. Малинина, Н. Н. Филатов, М. Д. Масанова, И. В. Филатова // Тез. докл. V Всесоюз. гидрол. съезда (Ленинград, 1986 г.). Секция вод. ресурсов и вод. баланса. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – С. 23–25.

Малявин С. А., Березина Н. А., Хванг Дж.-Ш. О находке *Chelicorophium curvispinum* (Amphipoda, Crustacea) в Финском заливе Балтийского моря / С. А. Малявин, Н. А. Березина, Дж.-Ш. Хванг // Зоологический журнал. – 2008. – Т. 87. – № 6. – С. 643–649.

Мануйлов В. А. Изучение донных природных комплексов верхнего шельфа залива Петра Великого (для обоснования размещения хозяйств марикультуры) / В. А. Мануйлов // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 1982. – № 1. – С. 48–52.

Марков К. К. Послеледниковая история юго-восточного побережья Ладожского озера / К. К. Марков // Вопросы географии. – 1949. – № 12. – С. 213–220.

Маркун М. И. Весенний лов корюшки в устье р. Волхова / М. И. Маркун // Изв. отд. прикл. ихтиологии. – 1926. – Т. 4. – Вып. 1. – С. 104–113.

Мартемьянов В. И. Пороговые концентрации катионов во внешней среде, определяющие границы распространения *Dreissena polymorpha* и *Dreissena bugensis* в пресных водоемах / В. И. Мартемьянов // Дрейссениды: эволюция, систематика, экология. Лекции и матер. докл. II Международной школы-конференции. (11–15 ноября 2013 г.). – Ярославль: Канцлер, 2013. – С. 80–83.

Мартынова М. В. Азот и фосфор в донных отложениях озер и водохранилищ / М. В. Мартынова. – М.: Наука, 1984. – 160 с.

Мартынова М. В. Донные отложения как составляющая лимнических экосистем / М. В. Мартынова. – М.: Наука, 2010. – 243 с.

Мартынова М. В. Закономерности процессов накопления, трансформации и выделения со дна водоемов соединений азота и фосфора: автореф. дис...доктора географических наук: 11.00.10 / Мартынова Муза Владимировна; Гидрохим. ин-т. – Ростов-на-Дону, 1988. – 47 с.

Мартынова М. В. О методах определения различных форм фосфора в донных наносах / М. В. Мартынова, Н. А. Шмидеберг // Гидрохим. Материалы. – 1983. – Т. LXXXV. – С. 49–55.

Марчук Н. Ю., Ежов В. Н. Влияние антропогенного загрязнения среды на содержание и состав эфирного масла *Cupressus sempervirens* L. / Н. Ю. Марчук, В. Н. Ежов // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Серия «Биология, химия». – 2011. – Т. 24. – № 4. – С. 151–155.

Матинян Н. Н. Почвы острова Валаам / Н. Н. Матинян, И. С. Урусевская. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 1999. – 32 с.

Медведев и др. Особенности поведения ладожской нерпы во время ее учета с использованием беспилотного летательного аппарата (БПЛА) / Н. В. Медведев, Д. С. Дудакова, М. О. Дудаков, Т. Сипиля // Биоразнообразие экосистем Крайнего Севера: инвентаризация, мониторинг, охрана: Тезисы докладов III Всероссийской научной конференции: 20–24 ноября 2017 г., Сыктывкар, Республика Коми, Россия. – Сыктывкар: Издательство ИБ Коми НЦ УрО РАН, 2017а. – С. 238–240.

Медведев и др. Специфика учета ладожской нерпы в залежках с использованием беспилотного летательного аппарата (БПЛА) / Н. В. Медведев, Д. С. Дудакова, М. О. Дудаков, Т. Сипиля // Биоразнообразие экосистем Крайнего Севера: инвентаризация, мониторинг, охрана: Тезисы докладов III Всероссийской научной конференции: 20–24 ноября 2017 г., Сыктывкар, Республика Коми, Россия. – Сыктывкар: Издательство ИБ Коми НЦ УрО РАН, 2017б. – С. 235–238.

Медведев Н. В., Сипиля Т., Вережкин М. В. Характер распределения ладожской нерпы *Pusa hispida ladogensis* по акватории озера в ледовый сезон / Н. В. Медведев, Т. Сипиля, М. В. Вережкин // Морские млекопитающие Голарктики. Тезисы докладов Четвертой международной конференции. – СПб., 2006. – С. 358–360.

Медицинская микробиология / Под ред. В. И. Покровского, О. К. Позднеева. – М.: Медицина, 1999. – 1200 с.

Мелентьев В. В. Термобар как управляющий фактор «экологией поведения» ледовых форм морских млекопитающих, обитающих в пресных и солоноватых водоемах (кольчатая нерпа как пример) / В. В. Мелентьев, К. В. Мелентьев, Л. Х. Петтерссон // Региональная экология. – 2010. – № 3 (29). – С. 84–89.

Мелентьев В. В., Тихомиров А. И., Мелентьев К. В. Опыт спутниковой РСА-диагностики начальных ниласовых видов озерного льда и их валидация по данным самолетного зондирования / В. В. Мелентьев, А. И. Тихомиров, К. В. Мелентьев // Современные проблемы гидрометеорологии / Под ред. А. М. Догановского. – СПб.: Астерион, 2006. – С. 73–95.

Мелешко В. П. Расчет составляющих водного баланса на водосборе Каспийского моря с помощью ансамбля моделей общей циркуляции атмосферы / В. П. Мелешко, Г. С. Голицын, Е. М. Володин и др. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 1998. – Т. 34. – № 4. – С. 591–599.

Менжулин Г. В. Климат водосбора Ладожского озера / Г. В. Менжулин // Ладога / Под ред. В. А. Румянцев, С. А. Кондратьева. – СПб.: Нестор-История, 2013. – С. 96–121.

Меншуткин В. В. и др. Пространственная неоднородность распределения макрозообентоса / В. В. Меншуткин, Т. Д. Слепухина, М. В. Меншуткина, Т. П. Суворова // Современное состояние экосистемы Ладожского озера. – Л., 1987. – С. 126–136.

Меншуткин В. В. Искусство моделирования (экология, физиология, эволюция) / В. В. Меншуткин. – Петрозаводск-СПб., 2010. – 419 с.

Меншуткин В. В. Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор) 1. Гидродинамика озер / В. В. Меншуткин, Л. А. Руховец, Н. Н. Филатов // Водные ресурсы. – 2013. – Т. 40. – № 6. – С. 1–17.

Меншуткин В. В. Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор) 2. Модели экосистем пресноводных озер / В. В. Меншуткин, Л. А. Руховец, Н. Н. Филатов // Водные ресурсы. – 2014. – Т. 41. – № 1. – С. 24–38.

Меншуткин В. В., Воробьева О. Н. Модель экосистемы Ладожского озера / В. В. Меншуткин, О. Н. Воробьева // Современное состояние экосистемы Ладожского озера. – Л.: Наука, 1987. – С. 187–200.

Меншуткин В. В., Руховец Л. А., Филатов Н. Н. Состояние и перспективы развития моделирования экосистем пресноводных озер. Использование моделей для решения задач сохранения их водных ресурсов / В. В. Меншуткин, Л. А. Руховец, Н. Н. Филатов. – СПб.: Нестро-История, 2014. – 118 с.

Меншуткин В. В., Слепухина Т. Д., Меншуткина М. В., Суворова Т. П. Пространственная неоднородность распределения макрозообентоса // Современное состояние экосистемы Ладожского озера. – Л., 1987. – С. 126–136.

Меншуткин В. В., Филатов Н. Н. Модель подледной экологической системы озера, основанная на применении клеточных автоматов / В. В. Меншуткин, Н. Н. Филатов // Труды Карельского научного центра РАН. Сер. «Лимнология». – 2016. – № 5. – С. 76–87.

Методика количественного химического анализа М 02-1009-08. – Определение металлов в пробах пищевых продуктов и пищевого сырья атомно-абсорбционным методом с электротермической атомизацией. – СПб., 2009. – 21 с.

Методические рекомендации по сбору и обработке зообентоса / Ред. Г. Г. Винберга. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – С. 35–48.

Методические указания по организации и проведению наблюдений и контроля за загрязнением поверхностных вод суши в системе Общегосударственной службы наблюдений и контроля за загрязнением объектов окружающей среды (ОГСНК). – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 59 с.

Методические указания по принципам организации системы наблюдений и контроля за качеством воды водоемов и водотоков на сети Госкомгидромета в рамках ОГСНК. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 40 с.

Методические указания по разработке нормативов допустимого воздействия на водные объекты – Утверждены приказом МПР России от 12 декабря 2007 года N 328 // Режим доступа свободный [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/902083847> (дата обращения: 03.12.2020).

Методы изучения двустворчатых моллюсков. – Под ред. Г. Л. Шкорбатова, Я. И. Старобогатова. – Тр. АН СССР. – Л., 1990. – Т. 219. – 208 с.

Мизандронцев И. Б. Химические процессы в донных отложениях водоемов / И. Б. Мизандронцев. – Новосибирск: Наука, 1990. – 176 с.

Мирвис В. М. Закономерности изменения режима температуры воздуха на территории России в последнее столетие / В. М. Мирвис // Изменения климата и их последствия / Отв. ред. Г. В. Менжулин. – СПб.: Наука, 2002. – 269 с.

Мирвис В. М., Гусева И. П. Оценки изменения продолжительности безморозного периода вегетации на территории России и сопредельных государств в XX веке / В. М. Мирвис, И. П. Гусева // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 1. – С. 106–113.

Митина Н. Н. Геоэкологические исследования ландшафтов морских мелководий / Н. Н. Митина. – М.: Наука, 2005. – 197 с.

Митина Н. Н. Оценка устойчивости донных ландшафтов морских мелководий юга Дальнего Востока к антропогенным нагрузкам / Н. Н. Митина // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2008. – № 3. – С. 106–115.

Михайлов Р. А. Распространение моллюсков рода *Dreissena* в водоемах и водотоках среднего и нижнего Поволжья / Р. А. Михайлов // Российский журнал биологических инвазий. – 2015. – № 1. – С. 64–78.

Мозжерин В. И., Мозжерин В. В. Мировой сток взвешенных наносов: его геоморфологическая и геоэкологическая интерпретация / В. И. Мозжерин, В. В. Мозжерин // Геоморфология. – 2011. – № 1. – С. 13–24.

Мокиевский В. О. Использование телеуправляемого аппарата ГНОМ в гидробиологических исследованиях / В. О. Мокиевский, Б. Я. Розман, А. Б. Цетлин //

IX Международная научно-техническая конференция. «Современные методы и средства океанологических исследований». Материалы конференции. Часть 1. – М., 2005. – С. 140–144.

Молчанов И. В. Ладожское озеро / И. В. Молчанов. – М.-Л.: Гидрометеиздат, 1945. – 558 с.

Монин А. С., Сонечкин Д. М. Колебания климата / А. С. Монин, Д. М. Сонечкин. – М.: Наука, 2005. – 192 с.

Мохов Г. М. Питание щуки *Esox lucius* (L.) Ладожского озера / Г. М. Мохов // Сб. научн. тр. ГосНИОРХ. – 1982. – Т. 179. – С. 69–89.

Мохов Г. М. Суточный ритм питания щуки Ладожского озера / Г. М. Мохов // Сб. научн. тр. ГосНИОРХ. – 1980. – Т. 159. – С. 20–31.

Мохов И. И. и др. Блокинги в Северном полушарии и Евро-Атлантическом регионе: оценки изменений по данным реанализа и модельным расчетам / И. И. Мохов, М. Г. Акперов, М. А. Прокофьева, А. В. Тимажев, А. Р. Лупо, Э. Ле Трет // Доклады Академии наук. – 2013. – Т. 449. – № 5. – С. 582–585.

Мохов И. И. и др. Оценки связи изменений глобальной приповерхностной температуры с разными естественными и антропогенными факторами на основе данных наблюдений / И. И. Мохов, Д. А. Смирнов, А. А. Карпенко // Доклады Академии наук. – 2012. – Т. 443. – № 2. – С. 225–231.

Музылев С. В. и др. Стохастические модели в инженерной гидрологии / С. В. Музылев, В. Е. Привальский, Д. Я. Раткович. – М.: Наука, 1982. – 184 с.

МУК 4.2.1018–01. Санитарно-микробиологический анализ питьевой воды. Методические указания. – М.: Издательство стандартов, 2001. – 32 с.

МУК 4.2.1884-04-2004. Санитарно-микробиологический и санитарно-паразитологический анализ воды поверхностных водных объектов. Методические указания. – М.: Издательство стандартов, 2004. – 28 с.

Мякишева Н. В., Дьяченко Н. Ю. Оценка возможности вероятностного прогнозирования уровня воды больших озер / Н. В. Мякишева, Н. Ю. Дьяченко // Ученые записки РГТМУ. – № 6. – С. 71–77.

Науменко М. А. и др. Изменчивость горизонтальных градиентов температуры поверхности воды и воздуха в весенней фронтальной зоне Ладожского озера / М. А. Науменко, В. В. Гузиватый, С. Г. Каретников // Океанология. – 2012. – Вып. 52. – № 6. – С. 798–803.

Науменко М. А. Анализ морфометрических характеристик подводного рельефа Ладожского озера на основе цифровой модели / М. А. Науменко // Известия РАН. Серия географическая. – 2013. – № 1. – С. 62–72.

Науменко М. А. Глубины и подводный рельеф / М. А. Науменко // Ладога / Ред. В. А. Румянцев, С. А. Кондратьев. – СПб.: Нестор-История, 2013. – С. 84–90.

Науменко М. А. Горизонтальные градиенты температуры в термической фронтальной зоне крупного пресноводного озера / М. А. Науменко // Метеорология и гидрология. – 1989. – № 6. – С. 89–92.

Науменко М. А. Динамика вод Ладожского озера / М. А. Науменко // Ладога / Под ред. В. А. Румянцева, С. А. Кондратьева. – СПб.: Нестор-История, 2013. – С. 180–185.

Науменко М. А. и др. Межгодовые вариации ледового режима Ладожского озера и их связь с атмосферной циркуляцией / М. А. Науменко, С. Г. Каретников, В. В. Гузиватый // Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей. Труды VIII Международной научно-практической конференции: в 2 томах. – М.: Российский университет дружбы народов, 2014. – С. 508–517.

Науменко М. А. и др. Нелинейные взаимодействия индексов атмосферной циркуляции и их влияние на ледовый режим Ладожского озера / М. А. Науменко,

С.Г. Каретников, В.В. Гузиватый // Ледовые и термические процессы на водных объектах России. Труды V Всероссийской конференции. – М.: Институт водных проблем РАН, 2016. – С. 329–335.

Науменко М.А. и др. О климатических трендах температуры поверхности воды Ладожского озера в безледный период / М.А. Науменко, В.В. Гузиватый, С.Г. Каретников // Доклады Академии наук. – 2006. – Т. 408. – № 5. – С. 675–678.

Науменко М.А. и др. Озеро Ильмень: определение морфометрических характеристик на основе цифровой модели / М.А. Науменко, С.Г. Каретников, В.В. Гузиватый, А.М. Крючков, Ш.Р. Поздняков // Водные ресурсы. – 2015. – Т. 42. – № 5. – С. 467–475.

Науменко М.А. и др. Пространственно-временная термическая дифференциация вод Ладожского озера / М.А. Науменко, С.Г. Каретников, В.В. Гузиватый // Доклады академии наук. – 2000. – Т. 373. – № 2. – С. 247–250.

Науменко М.А. и др. Термический и ледовый режим Ладожского озера: климатическая характеристика и современные изменения / М.А. Науменко, В.В. Гузиватый, С.Г. Каретников // Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития. Труды III всероссийской конференции. – 2019. – С. 639–641.

Науменко М.А. и др. Термический режим Ладожского озера / М.А. Науменко, В.А. Гузиватый, С.Г. Каретников // Ладога / Под ред. В.А. Румянцев и С.А. Кондратьева. – СПб.: Нестор-История, 2013. – С. 137–151.

Науменко М.А. Изменчивость горизонтальных градиентов температуры поверхности воды и воздуха в весенней фронтальной зоне Ладожского озера / М.А. Науменко, В.В. Гузиватый, С.Г. Каретников // Океанология. – 2012. – Вып. 52. – № 6. – С. 798–803.

Науменко М.А., Каретников С.Г. Морфометрия и особенности гидрологического режима Ладожского озера / М.А. Науменко, С.Г. Каретников // Ладожское озеро: прошлое, настоящее и будущее / Под ред. В.А. Румянцева, В.Г. Драбковой. – СПб.: Наука, 2002. – С. 16–49.

Науменко М.А. Морфометрическая характеристика и гидрофизические особенности литоральной зоны Ладожского озера / М.А. Науменко // Литоральная зона Ладожского озера / Под ред. Е.А. Курашова. – СПб.: Нестор-История, 2011. – С. 28–44.

Науменко М.А. Новое определение морфометрических характеристик Ладожского озера / М.А. Науменко // Доклады Академии наук. – 1995. – Т. 345. – № 4. – С. 514–517.

Науменко М.А. Сравнительный анализ морфометрических характеристик Ладожского и Онежского озер / М.А. Науменко // Ладожское озеро / Под ред. Н.Н. Филатова. – Петрозаводск, 2000. – С. 319–324.

Науменко М.А., Гузиватый В.В. Климатические вариации температурного режима Ладожского озера для периода открытой воды / М.А. Науменко, В.В. Гузиватый // Региональная экология. – 2010. – № 3 (29). – С. 104–108.

Науменко М.А., Каретников С.Г. Ладожское озеро и его водосбор: цифровая модель и новые результаты / М.А. Науменко, С.Г. Каретников // Труды XII съезда РГО. – 2005. – Т. 6. – С. 82–86.

Науменко М.А., Каретников С.Г. Морфометрия и районирование глубин озера / М.А. Науменко, С.Г. Каретников // Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее / Под ред. В.А. Румянцева, В.Г. Драбковой. – СПб.: Наука, 2002. – С. 16–22.

Науменко М.А., Каретников С.Г. О скорости движения весенней термической фронтальной зоны в Ладожском озере / М.А. Науменко, С.Г. Каретников // Метеорология и гидрология. – 1998. – № 4. – С. 107–115.

Науменко М. А., Каретников С. Г. Особенности многолетних изменений температуры воздуха в северной части Ладожского озера / М. А. Науменко, С. Г. Каретников // Успехи современного естествознания. – 2017. – № 5. – С. 114–122.

Науменко М. А., Каретников С. Г. Сезонная эволюция пространственного распределения температуры поверхности воды Ладожского озера в связи с его морфометрией / М. А. Науменко, С. Г. Каретников // Доклады Академии наук. – 2002. – Т. 386. – № 2. – С. 250–253.

Научно-практический справочник по климату СССР. Серия 3. Части 1–6. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 692 с.

Нежиховский Р. А. Изменения гидрометеорологического режима Ладожского озера, р. Невы и Невской губы / Р. А. Нежиховский // Межзональное перераспределение водных ресурсов. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – С. 133–151.

Никулина В. Н. и др. Фитопланктон / В. Н. Никулина, И. С. Трифонова, Г. И. Лестанская, О. А. Павлова // Финский залив в условиях антропогенного воздействия. – СПб., 1999. – С. 108–137.

Нордквист К. Продолжительность неолитизации: взгляд с севера / К. Нордквист // Самарский научный вестник. – 2014. – № 3 (8). – С. 148–155.

Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. Приложение к приказу Минсельхоза России от № 552 (с изменениями на 12 октября 2018 года) // Режим доступа свободный [Электронный ресурс]. – URL: <https://rulaws.ru/acts/Prikaz-Minselhoza-Rossii-ot-13.12.2016-N-552> / – 153 с. (дата обращения: 03.12.2020).

Нормы и критерии оценки загрязненности донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга. Региональный норматив. – СПб., 1996. – 20 с.

Об экологической ситуации в Ленинградской области в 2015 году // Режим доступа свободный [Электронный ресурс (а)]. – URL: <http://форносово-адм.рф/tinybrowser/files/e-kologiya/2016/eko.stuaciya-2015-god.pdf> (дата обращения: 08.12.2020).

Об экологической ситуации в Ленинградской области в 2018 году // Режим доступа свободный [Электронный ресурс (б)]. – URL: https://nature.lenobl.ru/media/uploads/userfiles/2019/07/02/ДОКЛАД_ОБ_ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ_СИТУАЦИИ_В_ЛЕНОБЛАСТИ_В_2018.pdf (дата обращения: 23.07.2020).

Огородникова В. А. Характеристика видовой структуры и функционирование сообществ зоопланктона южной части Ладожского озера в многолетнем аспекте / В. А. Огородникова // Сб. науч. тр. ГосНИОРХ. – 1995. – № 314. – С. 192–230.

Огородникова В. А., Суслопарова О. Н. Распределение и численность ранней молоди массовых видов рыб в южной части Ладожского озера / В. А. Огородникова, О. Н. Суслопарова // Сб. науч. трудов ГосНИОРХ. – 1995. – № 314. – С. 234–240.

Озера Карелии. Справочник / Ред. Н. Н. Филатов, В. И. Кухарев. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2013. – 464 с.

Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н. Н. Филатов. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. – 151 с.

Опекунов А. Ю. Экологическое нормирование / А. Ю. Опекунов. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 2001. – 216 с.

Опекунова М. Г. и др. Изменение качества лекарственных растений *Thymus marschallianus* Willd. и *Salvia stepposa* Schost. под воздействием загрязнения тяжелыми металлами на Южном Урале / М. Г. Опекунова, Ю. В. Крылова, Е. А. Курашов, А. Ю. Чихачева // Бюллетень Брянского отделения Русского ботанического общества. – 2013. – № 2. – С. 97–112.

Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 2. Зообентос. – М.-СПб.: Тов-во науч. изд. КМК. – 2016. – 457 с.

Орлова М.И. Биологические инвазии моллюсков в континентальных водах Голарктики: автореферат дис.... доктора биологических наук: 03.02.10 / Орлова Марина Ивановна; Зоол. ин-т РАН. – СПб., 2010. – 47 с.

Остроумов С.А. Токсичность наночастиц золота для растений в экспериментальной водной системе / С.А. Остроумов, В.А. Поклонов, С.В. Котелевцев, С.Н. Орлов // Вестник Московского университета. Серия 16: Биология. – 2014. – № 3. – С. 19–23.

Отчет о научно-исследовательской работе «Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов». Книга 1. № проекта в ИСГЗ Минобрнауки: 0154-2019-0001. – ФГБУ ИНОЗ РАН. – 2019. – 549 с.

Охлопкова А.Н. Течения Ладожского озера / А.Н. Охлопкова // Труды Лаб. озерадения ЛГУ, 1966. – Т. 20. – С. 265–278.

Павлова В.В. Эколого-географическая изменчивость морфологических признаков *Dreissena polymorpha* и *dreissena bugensis*: mollusca, bivalvia: автореферат дис. ... кандидата биологических наук: 03.02.08 / Павлова Вера Валерьевна; Ин-т биологии внутр. вод им. И.Д. Папанина РАН. – Борок, 2010. – 26 с.

Панин Г.Н. Воздействие Северной Атлантики на гидрологический режим бассейна Каспийского моря / Г.Н. Панин, Т.Ю. Выручалкина, И.В. Соломонова // Водные ресурсы. – 2015. – Т. 42. – № 4. – С. 442–452.

Панин Г.Н. и др. Климатические тенденции в средних и высоких широтах Северного полушария / Г.Н. Панин, И.В. Соломонова, Т.Ю. Выручалкина // Водные ресурсы. – 2009. – Т. 36. – № 6. – С. 743–756.

Панов В.Е. Методика количественного учета водных беспозвоночных в зарослях камыша и тростника / В.Е. Панов, А.М. Павлов // Гидробиологический журнал. – 1986. – Т. 22. – № 6. – С. 87–88.

Панова Е.Г. Геохимическая оценка локальных загрязнений донных осадков бухт Валаамского архипелага / Е.Г. Панова, А.А. Болотова // Геоэкология. – 2000. – № 1. – С. 28–34.

Пенно М.В. Развитие научных представлений о морских ландшафтах / М.В. Пенно // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2014. – Т. 10. – № 1. – С. 166–172.

Перевозников М.А., Богданова Е.А. Тяжелые металлы в пресноводных экосистемах / М.А. Перевозников, Е.А. Богданова. – СПб.: ГосНИОРХ, 1999. – 228 с.

Перевозников М.А., Лашевская Т.И. Рыбы-биоиндикаторы ионов тяжелых металлов / М.А. Перевозников, Т.И. Лашевская // Эколого-ихтиологические аспекты мониторинга пресноводных объектов. – Сборник научных трудов. – СПб.: ГосНИОРХ, 2000. – С. 41–45.

Петров К.М. Ландшафтно-экологический метод исследования бентоса береговой зоны арктических морей: Карское море, Байдарацкая губа / К.М. Петров // Вестник СПбГУ. Сер. 7. – 2009. – Вып. 4 – С. 87–92.

Петров К.М. Методика ландшафтного исследования береговой зоны моря / К.М. Петров. – М.: Наука, 1969. – 198 с.

Петров К.М. Подводные ландшафты: теория, методы исследования / К.М. Петров. – Л.: Наука, 1989. – 124 с.

Петров К.М. Развитие комплексных исследований подводных ландшафтов / К.М. Петров // Известия РАН. Серия географическая. – 2014. – № 1. – С. 100–108.

Петрова Н.А. и др. Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера (этапы трансформации экосистемы, 1975–2004 гг.) / Н.А. Петрова, И.В. Иофина, Л.Л. Капустина и др. // Экологическая химия. – 2005. – Т. 14. – № 4. – С. 209–234.

Петрова Н.А. и др. Основные этапы изменения озерной экосистемы под влиянием антропогенного эвтрофирования / Н.А. Петрова, Г.Ф. Расплетина, Т.М. Трегубова и др. // Ладожское озеро – критерии состояния экосистемы. – СПб., 1992. – С. 240–250.

Петрова Н.А. и др. Особенности эволюции экосистемы Ладожского озера под влиянием антропогенного эвтрофирования / Н.А. Петрова, Т.Н. Петрова, О.М. Сусарева, И.В. Иофина // Водные ресурсы. – 2010. – Т. 37. – № 5. – С. 580–590.

Петрова Н.А. и др. Структурные и функциональные характеристики фитопланктона / Н.А. Петрова, С.Е. Антонов, Е.В. Протопопова // Ладожское озеро – критерии состояния экосистемы. – СПб., 1992. – С. 119–145.

Петрова Н.А. Сукцессии фитопланктона при антропогенном эвтрофировании больших озер. – Л.: Наука, 1990. – 198 с.

Петрова Н.А. Уровень количественного развития и флористический состав / Н.А. Петрова // Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера. – Л.: Наука, 1982. – С. 124–130.

Петрова Н.А. Фитопланктон Ладожского озера / Н.А. Петрова // Растительные ресурсы Ладожского озера. – Л., 1968. – С. 73–130.

Петрова Т.Н., Гусева М.А. Динамика содержания и распределения органического вещества в воде Ладожского озера в течение многолетнего периода / Т.Н. Петрова, М.А. Гусева // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах. Тр. VI Всероссийского симпозиума с международным участием (28 августа – 1 сентября 2017 г., Барнаул). – Барнаул, 2017. – С. 181–187.

Петрова Т.Н., Игнатьева Н.В. Биогенные элементы / Т.Н. Петрова, Н.В. Игнатьева // Ладога. – СПб., 2013. – С. 187–201.

Петрова Т.Н. Распределение фосфора в воде Ладожского озера по результатам многолетнего мониторинга / Т.Н. Петрова // География: развитие науки и образования. – СПб., 2019. – Т. I. – С. 386–390.

Петрова Т.Н., Игнатьева Н.В. Биогенные элементы / Т.Н. Петрова, Н.В. Игнатьева // Ладога. – СПб.: Нестор-История, 2013. – С. 187–202.

Петрова Т.Н., Игнатьева Н.В. Органическое вещество / Т.Н. Петрова, Н.В. Игнатьева // Ладога / Под ред. В.А. Румянцева, С.А. Кондратьева. – СПб.: Нестор-История, 2013. – С. 202–211.

Петрова Т.Н., Поздняков Ш.Р. Взвешенные вещества / Т.Н. Петрова, Ш.Р. Поздняков // Ладога / Под ред. В.А. Румянцева, С.А. Кондратьева – СПб.: Нестор-История, 2013. – С. 211–222.

Петухов С.И. и др. Первый опыт морфотектонического моделирования района Ладожского озера / С.И. Петухов, В.М. Анохин, М.А. Науменко // В сборнике: География: развитие науки и образования. Коллективная монография по материалам ежегодной международной научно-практической конференции / Отв. редакторы С.И. Богданов, Д.А. Субетто, А.Н. Паранина. – СПб.: Издательство РГПУ им. А.И. Герцена, 2020. – С. 147–151.

Печников А.С. Изменение структуры стада сигов Ладожского озера под влиянием антропогенных факторов / А.С. Печников // Тез. докл. конф.: Экологическое состояние рыбного хозяйства водоемов бассейна Балтийского моря (в пределах Финского залива). – СПб., 1993. – С. 44–45.

Печников А.С. Структура стада сигов *Coregonus lavaretus* Ладожского озера / А.С. Печников // Тез. докл. Первого конгресса ихтиологов. – Астрахань, 1997. – С. 49.

Пидопличко Н.М. Грибы – паразиты культурных растений / Н.М. Пидопличко. – Киев: Наукова думка, 1977. – 295 с.

Пидопличко Н. М., Милько А. А. Атлас мукообразных грибов / Н. М. Пидопличко, А. А. Милько. – Киев: Наукова думка, 1975. – 187 с.

Пилипенко А. Эмпирические зависимости между параметрами теплообмена поверхности Ладожского озера и приводного слоя воздуха для периода открытой воды / А. Пилипенко // Ученые записки РГГМУ. – 2019. – Вып. 55. – С. 99–107.

Питулько В. М. Загрязнение тяжелыми металлами агроценозов от объектов прошлого экологического ущерба / В. М. Питулько, В. В. Кулибаба, А. М. Дрегуло, В. В. Петухов // Безопасность в техносфере. – 2016. – Т. 5. – № 2. – С. 18–24.

Питулько В. М., Кулибаба В. В. Реновация природных систем и ликвидация объектов прошлого экологического ущерба / В. М. Питулько, В. В. Кулибаба. – М.: Сер. «Научная мысль», 2017. – 123 с.

Питулько В. М., Кулибаба В. В. Экологический риск-анализ исходной фондовой информации по типам объектов накопленного ущерба на региональном и муниципальном уровне / В. М. Питулько, В. В. Кулибаба // Региональная экология. – 2019. – № 1 (55). – С. 90–107.

Плетнев С. П. Геология гайотов Магеллановых гор (Тихий океан) / С. П. Плетнев, М. Е. Мельников, В. Т. Съедин и др. – Владивосток: Наука, 2020. – 199 с.

Поздеев И. В. Границы ареала *Dreissena polymorpha* (Pallas) в бассейне реки Камы / И. В. Поздеев // Биология внутренних вод. – 2011. – № 1. – С. 106–109.

Поздняков Ш. Р. Проблемы расчета и измерения характеристик наносов в водных объектах / Ш. Р. Поздняков. – СПб.: Изд-во Лема, 2012. – 227 с.

Поздняков Ш. Р., Иванова Е. В. Оценка концентраций частиц микропластика в воде и донных отложениях Ладожского озера / Ш. Р. Поздняков, Е. В. Иванова // Региональная экология. – 2018. – № 4 (54). – С. 48–52.

Поздняков Ш. Р., Кондратьев С. А. Проблемы мониторинга Ладожского озера / Ш. Р. Поздняков, С. А. Кондратьев // Труды Всероссийской конференции по крупным внутренним водоемам «V Ладожский симпозиум» / Под ред. В. А. Румянцев, Ш. Р. Позднякова. – СПб., 2016. – С. 10–17.

Поздняков Д. В., Филатов Н. Н. Вариации качества воды в Ладожском озере в весенний период в 2016 и 2017 гг.: спутниковые наблюдения / Д. В. Поздняков, Н. Н. Филатов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2021. – Т. 14. – № 1. – С. 79–85.

Покровский В. В. Ряпушка озер Карельской АССР / В. В. Покровский. – Петрозаводск, 1953. – С. 3–107.

Полонский В. И., Асанова А. А. Оценка воздействия наночастиц диоксида титана на живые организмы / В. И. Полонский, А. А. Асанова // Теоретическая и прикладная экология. – 2018. – № 3. – С. 5–11.

Полякова Т. Н. Донные ценозы в условиях антропогенного эвтрофирования // Онежское озеро. Экологические проблемы / Под ред. Н. Н. Филатова. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. – С. 211–227.

Попов П. А. Оценка экологического состояния водоемов методами ихтиоиндикации / П. А. Попов. – Новосибирск: НГУ, 2002. – 267 с.

Построение моделей пространственных переменных (с применением пакета Surfer): Учебное пособие // Под ред. К. А. Мальцева, С. С. Мухарамова. – Казань: Казанский университет. – 2014. – 103 с.

Потапская Н. В. Оценка накопления отходов потребления в прибрежной зоне озера Байкал и дельте реки Селенги / Н. В. Потапская, Н. Н. Куликова, О. А. Тимошкин, Е. П. Зайцева, А. В. Непокрытых, В. В. Мальник // География и природные ресурсы. – 2016. – № 1 – С. 62–69.

Поярков Б. В. Принципы картирования экосистем шельфа / Б. В. Поярков, Б. В. Преображенский // Методы комплексного картирования экосистем шельфа. – Владивосток, 1980. – С. 7–22.

Правдин И. Ф. Видовой состав ихтиофауны Ладожского озера / И. Ф. Правдин // Изв. ВНИОРХ Л., 1956. – Т. 38. – С. 3–11.

Правдин И. Ф. Очерк рыбного хозяйства в Волховской губе Ладожского озера и в р. Сяси / И. Ф. Правдин // Изв. Ленингр. научно-исслед. ихтиол. ин-та. – 1931. – Т. 12. – Вып. 2. – С. 1–77.

Правдин И. Ф. Сиги водоемов Карело-Финской ССР / И. Ф. Правдин. – М.-Л., 1954. – 324 с.

Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования Дополнения и изменения 1 к ГН 2.1.5.1315–03 Гигиенические нормативы ГН 2.1.5.2280-07-2007. // Режим доступа свободный [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/901862249> (дата обращения: 03.12.2020).

Преображенский Б. В. Основы подводного ландшафтоведения / Б. В. Преображенский, В. В. Жариков, Л. В. Дубейковский. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 352 с.

Приймак Л. Я. Изменение структуры популяции сига – лудогы Ладожского озера под влиянием антропогенного фактора / Л. Я. Приймак // Сб. научн. тр. ГосНИОРХ. – 1988. – Т. 285. – С. 44–50.

Приймак Л. Я. Уловы сигов в Ладожском озере (1979–1984 гг.) / Л. Я. Приймак // Сб. научн. тр. ГосНИОРХ. – 1985. – Т. 237. – С. 13–19.

Природные ресурсы больших озер СССР и вероятные их изменения / Под ред. О. А. Алекина. – Л.: Наука, 1984. – 286 с.

Протокол заседания Северо-Западного бассейнового научно-промыслового совета Западного рыбохозяйственного бассейна // Режим доступа свободный [Электронный ресурс]. – URL: http://www.fish.gov.ru/files/documents/otraslevaya_deyatelnost/organizaciya_rybolovstva/protokoly_komissij_советов/protokol_sznp_210619.pdf (дата обращения: 21.07.2020).

Пырина И. Л., Трифонова И. С. Исследования продуктивности фитопланктона Ладожского озера / И. Л. Пырина, И. С. Трифонова // Гидробиол. журн. – 1979. – № 4. – С. 26–31.

Р 52.24.755–2011 Методы прогнозирования содержания загрязняющих веществ в водных объектах во времени по результатам систематических гидрохимических наблюдений. – Ростов-на-Дону: ГХИ, 2011. – 98 с.

Р 52.24.763–2012 Оценка состояния пресноводных экосистем по комплексу химико-биологических показателей. – Ростов-на-Дону: ГХИ, 2012. – 26 с.

Развитие и реализация интегрированной программы природоохранного мониторинга Ладожского озера для охраны и устойчивого использования водных ресурсов (DIMPLA). Малый проект по приграничному сотрудничеству ТАСИС TSP 40 / 97. Промежуточный отчет. – Йозенсуу, 1999. – 111 с.

Разлуцкий В. И. и др. Сравнение экологического статуса и качества воды озёр, заселённых и незаселённых *Dreissena polymorpha* (Pallas) / В. И. Разлуцкий, Е. А. Сысова, Ж. Ф. Бусева, И. Ю. Фенева // Российский журнал биологических инвазий. – 2015. – № 2. – С. 75–93.

Размышления на берегу Ладоги о состоянии запасов промысловых рыб // Режим доступа свободный [Электронный ресурс]. – URL: <http://fisher.spb.ru/blogs/view.php?postId=830>. (дата обращения: 12.12.2020).

Разработка и совершенствование научных, технических, методических и правовых основ с целью сохранения Ладожского озера как геостратегического объекта питьевого водоснабжения федерального значения на основе комплексных исследований: Отчет о НИР по теме Плана НИР ИНОЗ РАН на 2013–2019 гг. № 0154-2014-0003 (закл.) / ИНОЗ РАН; рук. В. А. Румянцев, Ш. Р. Поздняков. – СПб., 2018. – Часть 1. – 199 с. – № ГР 01201363379.

Ранцман Е. Я., Гласко М. П. Морфоструктурные узлы – места экстремальных природных явлений / Е. Я. Ранцман, М. П. Гласко. – М.: Медиа-Пресс, 2004. – 223 с.

Расплетина Г. Ф. Гидрохимическая характеристика рек – притоков Ладожского озера и р. Невы / Г. Ф. Расплетина, Т. П. Кулиш, Т. Н. Петрова // Оценка экологического состояния рек бассейна Ладожского озера по гидрохимическим показателям и структуре гидробиоценозов / Под ред. И. С. Трифионовой – СПб.: Изд-во Лема, 2006. – С. 11–35.

Расплетина Г. Ф. Гидрохимия Ладожского озера / Г. Ф. Расплетина, Д. С. Ульянова, Э. Э. Шерман // Гидрохимия и гидрооптика Ладожского озера / Отв. редактор чл.-корр. АН СССР О. А. Алекин. – Л., 1967. – С. 60–122.

Расплетина Г. Ф. Обеспеченность озерной экосистемы фосфором / Г. Ф. Расплетина // Ладожское озеро – критерии состояния экосистемы / Под ред. Н. А. Петровой, А. Ю. Тержевика. – СПб.: Наука, 1992. – С. 74–87.

Расплетина Г. Ф. Особенности гидрохимии Ладожского озера в условиях антропогенного воздействия: дис... канд. геогр. наук: 25.00.36 / Рогозина Татьяна Анатольевна; науч. рук. Кондратьев С. А.; Рос. гос. гидрометеорол. ун-т (РГГМУ). – Ленинград, 1984. – 254 с.

Расплетина Г. Ф. Режим биогенных элементов / Г. Ф. Расплетина // Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера / Под ред. Н. А. Петровой. – Л.: Наука, 1982. – С. 79–101.

Расплетина Г. Ф., Гусаков Б. Л. Режим биогенных элементов Ладожского озера в условиях антропогенного эвтрофирования / Г. Ф. Расплетина, Б. Л. Гусаков // Тр. ГГИ. – 1988. – Вып. 321. – С. 66–73.

Расплетина Г. Ф., Сусарева О. М. Биогенные элементы / Г. Ф. Расплетина, О. М. Сусарева // Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее / Под ред. В. А. Румянцева, В. Г. Драбковой. – СПб.: Наука, 2002. – С. 77–86.

Расплетина Г. Ф., Сусарева О. М. Физико-географическая и экономико-географическая характеристика водосборного бассейна Ладожского озера / Г. Ф. Расплетина, О. М. Сусарева // Оценка экологического состояния рек бассейна Ладожского озера по гидрохимическим показателям и структуре гидробиоценозов / Под ред. И. С. Трифионовой. – СПб.: Изд-во Лема, 2006. – С. 6–8.

Распопов И. М. Видовое и ценотическое разнообразие высших водных и прибрежно-водных растений в литоральной зоне Ладожского озера / И. М. Распопов // Литоральная зона Ладожского озера. – СПб., 2011. – С. 52–64.

Распопов И. М. Высшая водная растительность Ладожского озера / И. М. Распопов // Растительные ресурсы Ладожского озера. – Л., 1968. – С. 16–72.

Распопов И. М. Высшая водная растительность шхерного района Ладожского озера / И. М. Распопов // Комплексные исследования шхерной части Ладожского озера. – М.-Л., 1961. – С. 193–210.

Распопов И. М. и др. Прибрежно-водные экотоны больших озер / И. М. Распопов, И. Н. Андронникова, Т. Д. Слепухина и др. – СПб., 1998. – 54 с.

Рахуба А. В., Шмакова М. В. Численное моделирование заиления приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища речными наносами / А. В. Рахуба, М. В. Шмакова // Метеорология и гидрология. – 2018. – № 1. – С. 68–75.

РД 52.24.309–2016 Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши. – Ростов-на-Дону: ГХИ, 2016. – 100 с.

РД 52.24.609–2013 Организация и проведение наблюдений за содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях водных объектов. – Ростов-на-Дону: ГХИ, 2013. – 43 с.

РД 52.24.620–2000 Методические указания. Охрана природы. Гидросфера. Организация и функционирование подсистемы мониторинга антропогенного эвтрофирования пресноводных экосистем. – Ростов-на-Дону: ГХИ, 2000. – 48 с.

РД 52.24.635–2002 Методические указания. Проведение наблюдений за токсическим загрязнением донных отложений в пресноводных экосистемах на основе биотестирования. – Ростов-на-Дону: ГХИ, 2002. – 38 с.

РД 52.24.643–2002 Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. – Ростов-на-Дону: ГХИ, 2002. – 55 с.

Реакции гидробионтов на загрязнение / АН СССР. Науч. совет по пробл. гидробиол., ихтиол. и использ. биол. ресурсов водоемов, Ин-т эволюц. морфологии и экологии животных им. А. Н. Северцова. – М.: Наука, 1983. – 247 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Карелия и Северо-Запад, том 2, часть 1. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 528 с.

Решетников Ю. С. Экология и систематика сиговых рыб / Ю. С. Решетников. – М.: Наука, 1980. – 300 с.

Ризванов Р. А. Обеспеченность судака *Lucioperca lucioperca* (L.) Ладожского озера кормом и нерестилищами / Р. А. Ризванов // Вопр. ихтиологии. – 1971. – Т. 11. – Вып. 4 (69). – С. 735–739.

Родионова Н. В. О видовом составе зоопланктона литорали Ладожского озера / Н. В. Родионова // Литоральная зона Ладожского озера / Под ред. Е. А. Курашова. – СПб.: Нестор-История, 2011. – С. 156–170.

Родионова Н. В., Дудакова Д. С. Суточные миграции планктонных и мейобентосных ракообразных на литорали Ладожского озера / Н. В. Родионова, Д. С. Дудакова // Актуальные проблемы изучения ракообразных континентальных вод. Сборник лекций и докладов Международной школы-конференции. Ин-т биологии внутр. вод им. И. Д. Папанина РАН, Борок, 5–9 ноября 2012 г. – Кострома: ООО «Костромской печатный дом», 2012. – С. 265–267.

Романенко В. И. Микробиологические показатели качества воды и методы их определения / В. И. Романенко // Водные ресурсы. – 1979. – № 6. – С. 140–153.

Романенко В. И. Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества во внутренних водоемах / В. И. Романенко. – Л.: Наука. Ленингр. отд., 1985. – 295 с.

Россолимо Л. Л. Антропогенное эвтрофирование водоемов. Общая экология. Биоценология. Гидробиология. 2 / Л. Л. Россолимо. – М.: Наука. – 1975. – 860 с.

Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений / Под ред. В. А. Абакумова. – М.: Гидрометеиздат, 1982. – 56 с.

Румянцев В. А. и др. Великие озера мира / В. А. Румянцев, В. Г. Драбкова, А. В. Измайлова. – СПб.: Изд-во Лема, 2012. – 372 с.

Румянцев В. А. и др. Озера европейской части России / В. А. Румянцев, В. Г. Драбкова, А. В. Измайлова. – СПб.: Изд-во Лема, 2015. – 390 с.

Румянцев В. А. и др. Распространение вод притоков и подземных вод в Ладожском озере по данным изотопных индикаторов / В. А. Румянцев, В. Н. Рыбакин, И. В. Токарев // СПб.: РГГМУ. Ученые записки. – 2017. – № 48. – С. 94–109.

Румянцев В. А. и др. Стохастические модели влияния климата на гидрологию озера / В. А. Румянцев, Ю. А. Трапезников, А. С. Григорьев – СПб.: НИИ Химии. СПбГУ, 2001. – 156 с.

Румянцев В. А. Моделирование температурно-влажностного режима водосбора Ладожского озера / В. А. Румянцев, Л. К. Ефимова, Г. С. Голицын, В. Ч. Хон, У. С. Лыскова // Известия РАН. Сер. «Географическая». – 2007. – № 1. – С. 130–135.

Румянцев В.А. Основные факторы, определяющие функционирование водной системы Ладожское озеро – река Нева – Невская губа – восточная часть Финского залива в современных условиях / В.А. Румянцев, С.А. Кондратьев, Ш.Р. Поздняков и др. // Известия РГО. – СПб.: Наука, 2012. – Т. 144. – Вып. 2. – С. 55–69.

Румянцев В.А., Драбкова В.Г. Формирование качества воды Ладожского озера в современных условиях как основа его природных ресурсов / В.А. Румянцев, В.Г. Драбкова // Исследования по ихтиологии и смежным дисциплинам на внутренних водоемах в начале XXI века (к 80-летию проф. Л.А. Кудерского). – СПб.-М.: КМК, 2007. – Сборник научных трудов ГосНИОРХ. – Вып. 337. – С. 472–482.

Румянцев В.А., Кондратьев С.А. Использование радиолокационных данных в гидродинамической модели дождевого стока с распределенными параметрами / В.А. Румянцев, С.А. Кондратьев // Метеорология и гидрология. – 1981. – № 3. – С. 8692.

Румянцев В.А., Крюков Л.Н. Актуальность оптимизации государственного мониторинга крупнейших водоемов России на примере Ладожского озера / В.А. Румянцев, Л.Н. Крюков // Ученые записки РГГМУ. – 2017. – 48. – С. 110–119.

Румянцев В.А., Крюков Л.Н. Новая парадигма государственного мониторинга крупнейших водоемов России на примере Ладожского озера / В.А. Румянцев, Л.Н. Крюков // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: Тр. Четвертой всерос. конф. с междунар. участием (Москва, 15–18 сентября 2015 г.). – М.: ИВП РАН, 2015. – С. 20–23.

Румянцев В.А., Рыбакин В.Н., Токарев И.В. Распространение вод притоков и подземных вод в Ладожском озере по данным изотопных индикаторов / В.А. Румянцев, В.Н. Рыбакин, И.В. Токарев // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. Научно-теоретический журнал. – СПб.: РГГМУ, 2017. – Вып. 48. – С. 94–109. ISSN 2074–2762.

Румянцев В.А., Трапезников Ю.А. Стохастические модели гидрологических процессов / В.А. Румянцев, Ю.А. Трапезников. – СПб.: Наука, 2008. – 152 с.

Румянцев В.А. Вариации температурного и гидрологического режимов региона водосборного бассейна Ладожского озера в XX и XXI вв. по данным современных моделей климата / В.А. Румянцев, Л.К. Ефимова, Г.С. Голицын, В.Ч. Хон // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 46. – № 1. – С. 26–34.

Румянцев В.Я. Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее / В.Я. Румянцев. – СПб.: Наука, 2002. – 327 с.

Русанов А.Г. Пространственное распределение высшей водной растительности Ладожского озера в зависимости от природных и антропогенных факторов / А.Г. Русанов // Литоральная зона Ладожского озера / Ред. Е.А. Курашов. – СПб.: Нестор-История, 2011. – С. 68–101.

Русанов А.Г., Станиславская Е.В. Загрязнение рек Ладожского бассейна: оценка на основе диатомового индекса / А.Г. Русанов, Е.В. Станиславская // Водные ресурсы. – 2011. – Т. 38. – № 1. – С. 1–12.

Руховец Л.А. Великие озера Европы и глобальное потепление / Л.А. Руховец, Г.П. Астраханцев, Т.Р. Минина и др. // Обзор прикладной и промышленной математики. – 2011. – Т. 18. – Вып. 5. – С. 712–728.

Руховец Л.А. Исследование реакции экосистемы Ладожского озера на снижение фосфорной нагрузки / Л.А. Руховец, Н.А. Петрова, В.В. Меншуткин и др. // Водные ресурсы. – 2011. – Т. 38. – № 6. – С. 740–752.

Руховец Л.А. Исследование трансформации Ладожского озера методами математического моделирования / Л.А. Руховец, Г.П. Астраханцев, Т.Р. Минина и др. //

Ладога / Под ред. В.А. Румянцева, С.А. Кондратьева. – СПб.: Нестор-История, 2013. – С. 363–393.

Руховец Л.А., Филатов Н.Н. Озера и климат: модели и методы. / Л.А. Руховец, Н.Н. Филатов // Модели и методы в проблеме взаимодействия атмосферы и гидросферы: учебное пособие / Под ред. В.П. Дымникова, В.Н. Лыкосова, Е.П. Гордова. – Томск: Издательский Дом ТГУ, 2014. – С. 256–326.

Рычкова М.А. Перифитон литоральной зоны Ладожского озера / М.А. Рычкова // Литоральная зона Ладожского озера / Под ред. Е.А. Курашова. – СПб.: Нестор-История, 2011. – С. 128–138.

Рябченко В.А. Модельные оценки эвтрофикации Балтийского моря в современном и будущем климате / В.А. Рябченко, Л.Н. Карлин, А.В. Исаев и др. // Океанология. – 2016. – Т. 56 (1). – С. 41–50.

Рябченко В.А. Прогноз погоды и состояние водных объектов Северо-Западного региона России на базе комплексных гидродинамических моделей / В.А. Рябченко, Ю.М. Либерман, Л.А. Руховец и др. – СПб.: Нестор-История, 2008. – 60 с.

Саарнисто М. Древние жители Куппалы – свидетели этапов истории Ладоги / М. Саарнисто, А. Сакса, Ю.-П. Таавитсайнен // Вопросы геологии и археологии: Тезисы докладов международного симпозиума, посвященного 150-летию А.А. Иностранцева. – СПб., 1994. – С. 75–77.

Савельева Л.А. Биостратиграфия позднеледниковых и голоценовых осадков Ладожского озера / Л.А. Савельева, А.А. Андреев, Р. Громиг и др. // Актуальные проблемы современной палинологии: Материалы XIV Всероссийской палинологической конференции. – М., 2017. – С. 299–302.

Сагалевиц А.М. Глубоководные обитаемые аппараты в научных исследованиях Байкала / А.М. Сагалевиц // Вестник ИРГСХА. – 2013. – Т. 1. – № 57. – С. 141–153.

Сакса А.И. Древняя Карелия в конце I – начале II тысячелетия н. э. Происхождение, история и культура населения летописной Карельской земли / А.И. Сакса. – СПб.: Нестор-История, 2010. – 398 с.

Сало Ю.А. и др. Расчет испаряемости и суммарного испарения с водосборов северо-запада России / Ю.А. Сало, Л.Е. Назарова, А.Ф. Балаганский // Труды КарНЦ РАН. № 9. Сер. Лимнология. – 2016. – С. 95–101. DOI: 10.17076 / lim389.

Сальдау М.П. О пищевом значении бентоса и планктона для рыб Ладожского озера / М.П. Сальдау // Изв. ВНИОРХ. – 1956. – Т. 38. – С. 66–74.

СанПиН 2.1.4.1074–01 Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 64 с.

СанПиН 2.1.5.980–00. Водоотведение населенных мест, санитарная охрана водных объектов. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 18 с.

СанПиН 2.3.2.1078–01 – Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов // Режим доступа свободный [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru / document / 901806306> (дата обращения: 20.12.2020).

СанПиН 2.3.2.560–96 – Гигиенические требования к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов. Санитарные правила и нормы // Режим доступа свободный [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru / document / 9052436> (дата обращения: 20.12.2020).

Сапелко Т.В. Антропогенные и природные факторы развития Ладожского озера в позднем голоцене по данным комплексного анализа донных отложений /

Т.В. Сапелко, Н.В. Игнатьева, Д.Д. Кузнецов // Сохраним природное и культурное наследие Ладожского озера. – Сборник научных трудов. – СПб., 2011. – С. 170–181.

Сапелко Т.В. Индикация изменений природной среды и уровня антропогенной нагрузки на водные экосистемы по донным отложениям озер: новый методический подход / Т.В. Сапелко, Н.В. Игнатьева, Д.Д. Кузнецов и др. // Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.»: Сб. науч. тр. – Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. – 2015. – Т. I. – С. 473–479.

Сапелко Т.В. Индикация изменений природной среды и уровня антропогенной нагрузки на озерные ландшафты по донным отложениям озер: новый методический подход / Т.В. Сапелко // Новые методы и результаты исследований ландшафта в Европе, Центральной Азии и Сибири. Монография. В 5 томах / Под ред. В.Г. Сычева, Л. Мюллера. – Т. 2. – М., 2018. – С. 420–424.

Сапелко Т.В. Новые подходы комплексных палеолимнологических исследований голоценовой истории озер / Т.В. Сапелко, А.Н. Цыганов, Ю.А. Мазей и др. // Труды Палеонтологического общества. – Т. 1. – М.: ПИН РАН, 2018. – С. 118–123.

Сапелко Т.В. Палеолимнология внутренних озер острова Путсаари (Ладожское озеро) / Т.В. Сапелко, Д.Д. Кузнецов, Н.Ю. Корнеевкова и др. // Известия РГО. – 2014. – Т. 146. – Вып. 3. – С. 29–40.

Сапелко Т.В. Радиоуглеродное датирование в междисциплинарных археологических и палеолимнологических исследованиях на р. Россонь, Нарвско-Лужская низменность / Т.В. Сапелко, Д.В. Герасимов, А. Крийска и др. // Радиоуглерод в археологии и палеоэкологии: прошлое, настоящее, будущее / Под ред. Н.Д. Буровой, А.А. Выборнова, М.А. Кульковой – СПб.: ИИМК РАН; РГПУ, Самара: СГСПУ; ООО Порто-принт, 2020. – С. 79–80.

Сапелко Т.В., Корнеевкова Н.Ю. Реконструкция истории островных озер по данным палинологического и ботанического анализов / Т.В. Сапелко, Н.Ю. Корнеевкова // Актуальные проблемы современной палинологии: Материалы XIV Всероссийской палинологической конференции. – М., 2017. – С. 311–315.

Сапелко Т.В. Реконструкция среды обитания человека на территории Карельского перешейка (по материалам исследования многослойного поселения Озерное-3) / Т.В. Сапелко, А.В. Лудикова, М.А. Кулькова и др. // Хронология, периодизация и кросс-культурные связи в каменном веке. Замятинский сборник / Под ред. Г.А. Хлопачева. – 2008. – Вып. 1. – С. 118–144.

Сапелко Т.В., Терехов А.В., Амантов А.В. Ладожская трансгрессия: реконструкция финальной стадии и последующего спада в северной части озера / Т.В. Сапелко, А.В. Терехов, А.В. Амантов // Региональная геология и металлогения. – 2018а. – № 75. – С. 23–34.

Сараев А.К. Инвентаризация и оценка погребенных объектов прошлого экологического ущерба в почвах и грунтовых водах с использованием новой технологии радиоманнителлурических зондирований / А.К. Сараев, А.Е. Симаков, В.М. Питулько и др. // Региональная экология. – 2015. – № 1 (36). – С. 7–21.

Сафонов М.А. Стратегии адаптации грибных сообществ к изменениям условий среды / М.А. Сафонов // Журнал фундаментальных исследований. – 2013. – № 6 (5). – С. 1160–1163.

Сафьянов Г.А. Геоморфология морских берегов / Г.А. Сафьянов. – М.: МГУ им. Ломоносова, 1996. – 400 с.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614210 «Расчет формирования стока на водосборе на основе модели ILHM» /

Кондратьев С. А., Шмакова М. В.; заявитель и правообладатель ФГБУН Институт озерадения Российской академии наук (ИНОЗ РАН) // Зарегистрировано Федеральной службой по интеллектуальной собственности 09.04.2015, заявка № 2014664208.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614228 «Стохастическая модель погоды» / Шмакова М. В.; заявитель и правообладатель ФГБУН Институт озерадения Российской академии наук (ИНОЗ РАН) // Зарегистрировано Федеральной службой по интеллектуальной собственности 09.04.2015, заявка № 2014664021.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019662377 «Модель испарения с лесных массивов» / Карпечко Ю. В., Шмакова М. В., Кондратьев С. А.; заявитель и правообладатель ФГБУН Институт озерадения Российской академии наук (ИНОЗ РАН) // Зарегистрировано Федеральной службой по интеллектуальной собственности 23.09.2019, заявка № 2019661175.

Семенова Т. А. Антропогенная изменчивость микроскопических грибов в водных экосистемах (на примере водоемов Среднего Поволжья) / Т. А. Семенова. – Тольятти: ИЭВБ РАН, 1994а. – 36 с.

Семенович Н. И. Донные отложения Ладожского озера / Семенович Н. И. – М.-Л.: Издательство АН СССР. – 1966. – 124 с.

Сергеева В. А. Состояние и распределение зоопланктона в очагах загрязнения Ладожского бассейна / В. А. Сергеева // Сб. науч. тр. ГосНИОРХ. – 1988. – № 285. – С. 114–128.

Сергин С. Я. Кибернетическое моделирование физико-географических систем / С. Я. Сергин // Изв. АН СССР. Сер. геогр. – 1972. – № 1. – С. 130–136.

Сигарева Л. Е. Признаки естественного эвтрофирования мелководного озера Неро по осадочным пигментам / Л. Е. Сигарева, Н. А. Тимофеева, В. В. Законнов и др. // Биология внутренних вод. – 2019. – № 4–2. – С. 27–35.

Синюкович В. Н., Чернышов М. С. Современные проблемы регулирования уровня озера Байкал / В. Н. Синюкович, М. С. Чернышов // Известия ИГУ. Серия «Науки о Земле». – 2018. – Т. 24. – С. 99–110.

Скаридова М. А. Правовое регулирование защиты морских ландшафтов. Учебное пособие / М. А. Скаридова. – СПб.: Academus, 2017. – 32 с.

СКИОВО Волхов. Схема комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО) бассейна реки Волхов. Книга 1. Общая характеристика бассейна реки Волхов. Невско-Ладожское бассейновое водное управление Федерального агентства водных ресурсов. – СПб., 2015. – 87 с.

СКИОВО Карелия. Схема комплексного использования и охраны водных объектов Карелии бассейна Балтийского моря (российская часть бассейнов, код 01.05.00). Книга 1. Общая характеристика бассейнов рек Карелии бассейна Балтийского моря (российская часть бассейнов). Невско-Ладожское бассейновое водное управление Федерального агентства водных ресурсов. – СПб., 2014. – 67 с.

Скориков А. С. Зоологические исследования ладожской воды как питьевой / А. С. Скориков // Ладожское озеро как источник водоснабжения Санкт-Петербурга. – СПб., 1909. – С. 1–123.

Слепухина Т. Д., Алексеева Н. А. Донные беспозвоночные / Т. Д. Слепухина, Н. А. Алексеева // Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера / Ред. Н. А. Петрова. – Л.: Наука, 1982. – С. 181–90.

Словарь по географии // Режим доступа свободный [Электронный ресурс]. – URL: https://geography_ru.academic.ru/ (дата обращения: 03.12.2020).

Смирнова Т. С. Зоопланктон западного района Ладожского озера и губы Петрокрепость как кормовая база рыб / Т. С. Смирнова // Сб. науч. тр. ГосНИОРХ. – 1986а. – № 248. – С. 61–75.

Смирнова Т.С. Изменение структуры сообществ водных беспозвоночных под влиянием антропогенного эвтрофирования. Зоопланктон / Т.С. Смирнова // Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера. – Л.: Наука. – 1982. – С. 173–180.

Смирнова Т.С. Локализация продуктивных зон пелагиали больших озер в связи с неоднородностью вод / Т.С. Смирнова // Тр. ЗИН АН СССР. – 1986b. – № 152. – С. 172–182.

Смирнова Т.С. Продукция зоопланктона Ладожского озера в 1981–1983 годах / Т.С. Смирнова // Биологические ресурсы внутренних водоемов и их использование / Под ред. Л.П. Рыжкова. – Петрозаводск: Петрозаводский государственный университет. – 1990. – С. 19–27.

Снижение биогенной нагрузки от крупных животноводческих ферм в России. Отчет по международному проекту BALTHAZAR «Сельское хозяйство». Комиссия по защите морской среды Балтийского моря. Хельсинкская комиссия. 2010. – 68 р. URL: [http://www.helcom.ru / media / agriculture_rus. pdf](http://www.helcom.ru/media/agriculture_rus.pdf) (дата обращения: 26.11.2020).

Совершенствование мониторинга состояния экосистемы и качества воды Ладожского озера и реки Невы: Отчет по Государственному контракту № 24-НИОКР / 4–5–2012 Федеральной целевой программы «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах». – СПб., 2013. – 170 с.

Современное состояние водных объектов Республики Карелия / Отв. ред. Н.Н. Филатов, Т.П. Куликова, П.А. Лозовик. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. – 188 с.

Современное состояние экосистемы Ладожского озера / Под ред. Н.А. Петровой, Г.Ф. Расплетинной. – Л.: Наука. – 1987. – 213 с.

Соколова М.Ф. Зоопланктон Ладожского озера / М.Ф. Соколова // Известия ВНИОРХ. – 1956. – Т. 38. – С. 53–65.

Соколова М.Ф. К зоопланктону Ладожского озера / М.Ф. Соколова // Исследования реки Невы и ее бассейна. – Л.: Издательство ГГИ, 1930. – С. 53–67.

Соловьева Н.Ф. Гидрохимия притоков Ладожского озера и Невы / Н.Ф. Соловьева // Гидрохимия и гидрооптика Ладожского озера / Под ред. О.А. Алекина. – Л.: Наука. 1967. – С. 5–59.

Сорокин Ю.И. Бактериальная продукция в водоемах. Итоги науки и техники. Общая экология, биоценология, гидробиология / Ю.И. Сорокин. – 1973. – Т. 1. – С. 47–101.

Сотникова О.В., Степень Р.А. Эфирные масла сосны как индикатор загрязнения среды / О.В. Сотникова, Р.А. Степень // Химия растительного сырья. – 2001. – № 3. – С. 79–84.

Справочник агрохимика / Д.А. Кореньков. – М.: Россельхозиздат, 1976. – 350 с.

Стальмакова Г.А. Зообентос Ладожского озера / Г.А. Стальмакова // Биологические ресурсы Ладожского озера (зоология) / Под ред. С.В. Калесника. – Л.: Наука, 1968. – С. 4–70.

Станиславская Е.В., Трифонова И.С. Продукционная характеристика растительного перифитона / Е.В. Станиславская, И.С. Трифонова // Особенности формирования качества воды в разнотипных озерах Карельского перешейка. – Л.: Наука, 1984. – С. 192–206.

Старобогатов Я.И. Раки и моллюски / Я.И. Старобогатов. – Л.: Лениздат, 1988. – 147 с.

Стекольников А.А. Особенности сезонного эколого-токсикологического состояния реки Волхов / А.А. Стекольников // Вопросы нормативно-правового регулирования в ветеринарии. – 2014a. – № 3. – С. 236–241.

Стекольников А. А. Особенности весеннего распределения металлов в рыбах и среде их обитания реки Волхов / А. А. Стекольников // Вопросы нормативно-правового регулирования в ветеринарии. – 2014б. – № 2. – С. 113–115.

Стекольников А. А. Особенности сезонного распределения металлов в абиотических компонентах и ихтиофауне реки Волхов / А. А. Стекольников // Ветеринария. – 2013. – № 9. – С. 43–47.

Степанова А. Б. Анализ антропогенного воздействия на водную систему Валаамского архипелага / А. Б. Степанова, А. В. Бабин, Н. В. Зуева и др. // Экосистемы Валаамского архипелага (Ладожское озеро) на рубеже 20-го и 21-го веков. Черты уникальности и современное состояние: Атлас. – СПб.: РГГМУ, 2016 – С. 32–41.

Степанова А. Б. Влияние развития литорали на разнообразие и количественное развитие планктона в малых озерах северо-запада России / А. Б. Степанова // 4-я международная научная конференция «Современные проблемы гидроэкологии» (Санкт-Петербург, 01–15 октября 2015 г.). – СПб., 2015. – С. 170.

Степанова А. Б. Гидрохимические особенности малых озер о. Валаам / А. Б. Степанова, Г. Ф. Шарафутдинова, Е. Ю. Воякина // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2010. – № 12. – С. 97–109.

Степанова А. Б. Зоопланктон внутренних водоемов Валаамского архипелага и прилегающей акватории Ладожского озера: автореф. дисс. канд. биол. наук: 03.00.16 / Степанова Анастасия Борисовна; Институт озероведения РАН. – СПб., 1998. – 19 с.

Степанова А. Б. Межгодовая изменчивость основных лимнологических параметров оз. Лещевое (Природный парк «Валаамский архипелаг», Ладожское озеро), 1998–2018 гг. / А. Б. Степанова // Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития (Санкт-Петербург, 18–19 декабря 2019) – СПб., 2019. – С. 950–953.

Степанова А. Б. Результаты исследований прибрежной зоны Ладожского озера в районе Валаамского архипелага (1998–2019 гг.) в РГГМУ / А. Б. Степанова, Е. Ю. Воякина, А. В. Бабин, Н. В. Зуева, Ю. А. Зув // Гидрометеорология и экология. – 2020. – № 60. – С. 325–350.

Степанова А. Б. Результаты исследования зоопланктона двух озер Валаамского архипелага (оз. Сисъярви и оз. Лещевого) / А. Б. Степанова // Вопросы прикладной экологии (Санкт-Петербург, 2002) – СПб., 2002. – С. 75–83.

Степанова А. Б. Сравнительный анализ динамики температуры поверхностных горизонтов ряда малых озер о. Валаам и открытого участка прибрежной зоны Валаамского архипелага в теплый период 2016 г. / А. Б. Степанова, А. Р. Гарифуллина // Метеорологический вестник. – 2017 – Т. 9. – № 2. – С. 199–202.

Степанова А. Б. Экологическое состояние небольшой бухты Ладожского озера в условиях направленной антропогенной нагрузки / А. Б. Степанова // Экология Санкт-Петербурга и его окрестностей (Санкт-Петербург, 5–7 января) – СПб., 2005. – С. 365–368.

Степень Р. А., Есякова О. А. Влияние антропогенного загрязнения среды на содержание и состав эфирного масла хвои ели / Р. А. Степень, О. А. Есякова // Хвойные бореальной зоны. – 2007. – Т. 24. – № 1. – С. 122–127.

Сток наносов, его изучение и географическое распределение / Под ред. А. В. Караушева. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 240 с.

Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации – Утверждена Указом Президента Российской Федерации № 642 от 1 декабря 2016 г.

Субетто Д. А. Донные отложения и их роль в оценке эволюции Ладожского озера / Д. А. Субетто // Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее. – СПб., 2002. – С. 122–164.

Субетто Д. А. История формирования стока из Ладожского озера: новые палеолимнологические данные / Д. А. Субетто, Т. В. Сапелко, Д. Д. Кузнецов и др. // «Радиоуглерод в археологических и палеоклиматических исследованиях». Материалы конференции к 50-летию радиоуглеродной лаборатории Института истории материальной культуры РАН. – СПб., 2007. – С. 381–403.

Субетто Д. А. Формирование позднелейстоценовых и голоценовых отложений Ладожского озера / Д. А. Субетто // Актуальные проблемы современной лимнологии. – Л., 1988. – С. 61–62.

Субетто Д. А. Палеолимнологические и палеогидрологические реконструкции развития Ладожско-Балтийского водного соединения / Д. А. Субетто, Т. В. Сапелко, Д. Д. Кузнецов // Отечественная геоморфология: прошлое, настоящее, будущее. Материалы XXX пленума Геоморфологической комиссии РАН. – СПб., 2008. – С. 332–333.

Субетто Д. А., Поздняков Ш. Р., Рыбалко А. Е. Донные отложения Ладожского озера / Д. А. Субетто, Ш. Р. Поздняков, А. Е. Рыбалко // Ладога / Под ред. В. А. Румянцев и С. А. Кондратьева. – СПб.: Нестор-История, 2013. – С. 202–211.

Субетто Д. А. Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции озера / Д. А. Субетто. – СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2009. – 343 с.

Суровцев В. Н., Никулина Ю. Н. Концентрация поголовья в молочном скотоводстве и проблемы ее оптимизации / В. Н. Суровцев, Ю. Н. Никулина // Молочное и мясное скотоводство. – 2015. – № 6. – С. 2–6.

Сусарева О. М. Общая минерализация и ионный состав / О. М. Сусарева // Ладога / Под ред. В. А. Румянцев и С. А. Кондратьева. – СПб.: Нестор-История, 2013. – С. 176–182.

Сусарева О. М., Игнатьева Н. В. Кислород и водородный показатель / О. М. Сусарева, Н. В. Игнатьева // Ладога / Под ред. В. А. Румянцев и С. А. Кондратьева. – СПб.: Нестор-История, 2013. – С. 182–187.

Сусарева О. М., Петрова Т. Н. Металлы / О. М. Сусарева, Т. Н. Петрова // Ладога / Под ред. В. А. Румянцев и С. А. Кондратьева. – СПб.: Нестор-История, 2013. – С. 222–226.

Суслопарова О. Н. Изменение летних гидробиоценозов южной Ладоги по материалам многолетних исследований ГосНИОРХ / О. Н. Суслопарова, Т. В. Терешенкова, В. А. Огородникова и др. // Рыбохозяйственные исследования на водных объектах европейской части России. Сборник научных работ, посвященный 100-летию ГосНИОРХ. – СПб.: ФГБНУ ГосНИОРХ, 2014. – С. 238–258.

Суслопарова О. Н. Межгодовые изменения основных компонентов экосистемы (фитопланктон, зоопланктон, макрозообентос) южной Ладоги в период 2000–2016 гг. / О. Н. Суслопарова, О. А. Ляшенко, В. А. Огородникова и др. // Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Материалы 1-й Международной конференции. Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН. – Петрозаводск: Петрозаводский государственный университет, 2017. – С. 557–563.

Тарасов О. Черная быль Ладоги / О. Тарасов // Газета «Ленинградская правда». – 1991. – 10–12 апреля.

Тепловой режим Ладожского озера // Под ред. С. В. Калесник и Н. П. Смирновой. – Л.: Изд. ЛГУ, 1968. – 243 с.

Терехов А. В. Внешняя и внутренняя фосфорная нагрузка на Дудергофские озера / Терехов А. В., Н. С. Обломкова, М. В. Шмакова и др. // Ученые записки РГТМУ. – 2019. – № 54. – С. 58–72.

Терехова В. А. Микромицеты в экологической оценке водных и наземных экосистем / В. А. Терехова. – М.: Наука, 2007. – 215 с.

Тержевик А. Ю., Крючков А. М., Гусаков Б. Л. Основные особенности формирования гидрофизических полей Ладожского озера / А. Ю. Тержевик, А. М. Крючков,

Б.Л. Гусаков // Современное состояние экосистемы Ладожского озера / Под ред. Н.А. Петрова, Г.Ф. Расплетина. – Л.: Наука: Ленингр. отд., 1987. – С. 42–67.

Титенков И.С. Промысел и биология ладожского ерша / И.С. Титенков // Изв. ВНИОРХ. – 1956. – Т. 38. – С. 150–153.

Титенков И.С. Рыбы и рыбный промысел Ладожского озера / И.С. Титенков // Биологические ресурсы Ладожского озера. – Л.: Наука, 1968. – С. 130–173.

Тифенбах О.И. Динамика численности бактериопланктона озера Севан / О.И. Тифенбах // Структура и функционирование сообществ водных микроорганизмов / Под ред. М.И. Новожилова, В.В. Дрюккера. – Новосибирск: Наука, 1986. – С. 62–67.

Тиффоли Е., Морголис Н. Машины клеточных автоматов / Е. Тиффоли, Н. Морголис. – М.: Мир, 1991. – 280 с.

Тихомиров А.И. Температурный режим и запасы тепла Ладожского озера / А.И. Тихомиров // Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. – Л., 1968. – С. 114–218.

Тихомиров А.И. Термика крупных озер / А.И. Тихомиров. – Л.: Наука, 1982. – 232 с.

Тихомирова Л.П. Питание ладожских сигов / Л.П. Тихомирова // Рыбохоз. изуч. внутрен. водоемов. – 1975. – Т. 16. – С. 14–19.

Тихомирова Л.П., Болотова Т.Т. Питание сига – лудог Ладожского озера / Л.П. Тихомирова, Т.Т. Болотова // Изв. ГосНИОРХ. – 1977. – Т. 116. – С. 91–96.

Тихонова И.В. и др. Индивидуальная изменчивость состава летучих выделений хвои сосны обыкновенной в популяциях Хакасии и Тувы / И.В. Тихонова, А.А. Анискина, Л.В. Мухортова, С.Р. Лоскутов // Сибирский экологический журнал. – 2012. – Т. 19. – № 3. – С. 397–405.

Токарев И.В. Гидрогеологический режим Карельского перешейка и разгрузка подземных вод в Ладожское озеро / И.В. Токарев, В.Н. Рыбакин, В.А. Румянцев, Г.Ю. Воронюк // Всероссийская конференция по крупным водоемам (V Ладожский симпозиум). Санкт-Петербург, 9–11 ноября 2016 г. Сборник научных трудов. СПб.: Ин-т озераведения РАН; Изд-во Лема, 2016. – С. 426–430. ISBN 978-5-00105-077-3.

Трегубова Т.М. Особенности режима органического вещества в современный период / Т.М. Трегубова, Т.П. Кулиш, Л.Л. Капустина // Современное состояние экосистемы Ладожского озера / Под ред. Н.А. Петровой, Г.Ф. Расплетина. – Л.: Наука, 1987. – С. 149–166.

Трегубова Т.М., Кулиш Т.П. Кинетика биохимического потребления кислорода в воде озера / Т.М. Трегубова, Т.П. Кулиш // Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера / Под ред. Н.А. Петровой. – Л.: Наука, 1982. – С. 106–116.

Трифорова М.С. Биологическое загрязнение донных сообществ литоральной зоны Ладожского озера / М.С. Трифорова, Е.А. Курашов, М.А. Барбашова // Российский журнал прикладной экологии. – 2018. – № 4 (16). – С. 37–41.

Тюремнов С.Н. Торфяные месторождения / С.Н. Тюремнов. – М.: Недра, 1976. – 488 с.

Уличев В.И. Возможное применение технических средств дистанционного зондирования для изучения ладожской кольчатой нерпы *Pusa hispida ladogensis* / В.И. Уличев, Д.С. Дудакова, М.О. Дудаков, И.С. Труханова // Морские млекопитающие Голарктики. Сборник научных трудов IX международной конференции (Астрахань, 31 октября – 5 ноября 2016 г.). – М.: СММ, 2018. – С. 198–203.

Уличев В.И., Дудакова Д.С. Изменение численности ладожской нерпы *Pusa hispida ladogensis* на ледных залежках в зависимости от гидрологических факто-

ров / В.И. Уличев, Д.С. Дудакова // Морские млекопитающие Голарктики. Сборник научных трудов X международной конференции (Архангельск, 29 октября – 2 ноября 2018 г.). – М.: СММ, 2019. – С. 353–357.

Уличев В.И., Труханова И.С. Кольчатая нерпа *Pusa hispida ladogensis* как индикатор состояния экосистемы Ладожского озера / В.И. Уличев, И.С. Труханова // Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем III. Сборник научных трудов III международной конференции. – СПб., 2017. – С. 336–339.

Ульянец Е.К. и др. Оценка сезонных особенностей изменения климата в Северо-Европейском регионе / Е.К. Ульянец, С.И. Мاستрюков, Н.В. Червякова, А.И. Угрюмов // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2010. – № 13. – С. 70–82.

Усачев П.И. Количественная методика сбора и обработки фитопланктона / П.И. Усачев // Труды Всесоюзного гидробиологического общества. – 1961. – № 11. – С. 411–415.

Федорец Н.Г., Бахмет О.Н. Экологические особенности трансформации соединений углерода и азота в лесных почвах / Н.Г. Федорец, О.Н. Бахмет. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. – 240 с.

Федоров С.Ф. Определение транспирации еловыми насаждениями по коэффициенту транспирационной активности / С.Ф. Федоров // Тр. ГГИ. – 1981. – Вып. 279. – С. 32–34.

Федоров С.Ф., Марунич С.В. Гидрологическая роль леса. Обзорная информация / С.Ф. Федоров, С.В. Марунич // Серия: Гидрология суши. – Вып. 2. – Обнинск. – 1985. – 43 с.

Федорова Г.В., Аршаница Н.М. Влияние токсических веществ на популяции сига / Г.В. Федорова, Н.М. Аршаница // Материалы докладов V Всесоюзной конференции по водной токсикологии. – Одесса, 1988. – С. 29–31.

Федорова Г.В., Болотова Т.Т. Уловы и динамика численности сига-лудогы Ладожского озера // Изв. ГосНИРОХ. – Л., 1977. – Вып. 116. – С. 46–52.

Физические величины. Справочник // А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

Филатов И.Е. Ладожская кольчатая нерпа / И.Е. Филатов // Редкие и исчезающие виды млекопитающих СССР. – М.: Наука, 1990. – С. 57–64.

Филатов И.Е. Питание ладожской нерпы / И.Е. Филатов // Морские млекопитающие. Тезисы докладов VII Всесоюзного совещания. – М., 1978а. – С. 343.

Филатов Н.Н. Влияние изменений климата на экосистемы озер / Н.Н. Филатов, Л.А. Руховец, Л.Е. Назарова, В.А. Баклагин, А.П. Георгиев, Т.В. Ефремова, Н.И. Пальшин, А.В. Толстиков, А.Н. Шаров // Вестник РФФИ. – 2013. – 2 (78). – С. 43–50.

Филатов Н.Н. Влияние изменений климата на экосистемы озер севера европейской территории России / Н.Н. Филатов, Л.А. Руховец, Л.Е. Назарова, А.П. Георгиев, Т.В. Ефремова, Н.И. Пальшин // Учёные записки РГМУ. – 2014. – 34. – С. 48–55.

Филатов Н.Н. Гидродинамика озер / Н.Н. Филатов. – СПб.: Наука, 1991. – 191 с.

Филатов Н.Н. Ладожское озеро. Мониторинг, исследование современного состояния и проблемы управления Ладожским озером и другими большими озерами / Н.Н. Филатов. – Петрозаводск: КНЦ РАН, 2000. – 490 с.

Филатов Н.Н. Оценка состояния и прогнозирование изменений гидрологического режима и экосистем крупных озер / Н.Н. Филатов, А.В. Исаев, О.П. Савчук // Труды Карельского научного центра РАН – № 3. – 2019. – С. 99–113.

Филатов Н. Н. Оценки возможных изменений климата и их воздействие на некоторые характеристики гидрологического режима Ладожского и Онежского озер / Н. Н. Филатов, Л. Е. Назарова, Ю. А. Сало, А. Ю. Тержевик // Водные ресурсы Европейского Севера России: итоги и перспективы исследований. – Петрозаводск, 2006. – С. 178–196.

Филатов Н. Н. Состояние и перспективы исследований гидрофизических процессов и экосистем внутренних водоемов (обзор) // Н. Н. Филатов / Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2019. – Т. 12. – № 1. – С. 3–14.

Филатов Н. Н. Термогидродинамика и экосистемы великих озер России: диагноз и прогноз / Н. Н. Филатов // Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России / Под ред. Н. Н. Филатова. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. – С. 8–20.

Филатов Н. Н., Исаев А. В., Савчук О. П. Оценка состояния и прогнозирование изменений гидрологического режима и экосистем крупных озер / Н. Н. Филатов, А. В. Исаев, О. П. Савчук // Труды Карельского научного центра РАН – № 3. – 2019. – С. 99–113.

Филатова И. В., Филатов Н. Н. Закономерности изменчивости внешнего водообмена и уровня крупных озер / И. В. Филатова, Н. Н. Филатов // Тр. V Всесоюзного гидрологического съезда. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – Т. 8. – С. 73–82.

Финогенова Н. П. и др. Состав и количественные показатели донных беспозвоночных / Н. П. Финогенова, Т. Д. Слепухина, С. М. Голубков и др. // Финский залив в условиях антропогенного воздействия / Под ред. В. А. Румянцева, В. Г. Драбковой. – СПб., 1999. – С. 189–211.

Фролов А. В. Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения / А. В. Фролов. – М.: Геос, 2003. – 170 с.

Хендерсон-Селлерс Б. Инженерная лимнология / Б. Хендерсон-Селлерс. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 336 с.

Хотинский Н. А. Голоцен современной Евразии / Н. А. Хотинский. – М.: Наука, 1977. – 200 с.

Хрисанов Н. И., Осипов Г. К. Управление эвтрофированием водоемов / Н. И. Хрисанов, Г. К. Осипов. – СПб.: Гидрометеиздат, 1993. – 278 с.

Хромов В. М. Концепция модернизации биологических методов наблюдения и оценки состояния пресноводных экосистем России на сети Росгидромета / В. М. Хромов, Ю. А. Буйволов, А. Г. Уваров, Д. В. Малащенко // Материалы научной конференции «Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод», Т. 2. – Ростов-на-Дону: ФГБУ ГХИ, 2015. – С. 149–153.

Чеботарев Е. Н. Бактериопланктон притоков Ладожского озера / Е. Н. Чеботарев // Ладога / Ред. В. А. Румянцев, С. А. Кондратьев. – СПб.: Наука, 2013. – С. 286–288.

Чеботарева А. И. Гидрологический словарь / А. И. Чеботарева. – Л.: Гидрометиздат, 1978. – 308 с.

Чернышев А. Н. Особенности лимнологических параметров системы «Лещевое озеро – Лещевый залив» в период максимального прогрета воды (Валаамский архипелаг, Ладожское озеро) / А. Н. Чернышев, В. О. Сергеева, А. К. Котова и др. // Гидрометеорология и экология. – 2020. – № 61. – С. 460–479.

Чернышев А. Н. Пространственная изменчивость зоопланктона озера Лещевое в летний период (природный парк «Валаамский архипелаг») / А. Н. Чернышев // Актуальные проблемы биологии и экологии (Сыктывкар, 16–20 марта 2020). – Сыктывкар, 2020. – С. 36–38.

Чернышев А. Н. Трофическая структура зоопланктона озера Лещевого (о. Валаам, Ладожское озеро) / А. Н. Чернышев // Водные ресурсы: изучение и управление (Петрозаводск, 1–6 сентября 2020). – Петрозаводск, 2020. – С. 131–134.

Чижикова М. Ф. Лещ Ладожского озера / М. Ф. Чижикова // Изв. ГосНИОРХ. – 1974. – Т. 2. – С. 36–42.

Чубаренко И. П. Горизонтальная конвекция над подводными склонами / И. П. Чубаренко. – Калининград: Терра Балтика, 2010. – 256 с.

Шабан М. С. Сравнительный анализ межгодовой изменчивости значений рН и прозрачности воды в малых лесных озерах восточного побережья острова Валаам с заболоченным водосбором / М. С. Шабан // V Международная конференция молодых ученых «Водные ресурсы: изучение и управление» (Петрозаводск, 5–8 сентября 2016 г.). – Петрозаводск, 2016. – С. 408–416.

Шахнович М. М. Мезолитическое поселение Киркколахти 1 в Северном Приладожье / М. М. Шахнович // Своеобразие и особенности адаптации культур лесной зоны Северной Евразии в финальном плейстоцене – раннем голоцене / Под ред. М. Г. Жилина. – М.: ИА РАН, 2007. – С. 163–181.

Шереметевский А. М. Роль мейобентоса в биоценозах шельфа южного Сахалина, восточной Камчатки и Новосибирского мелководья / А. М. Шереметевский. – Л.: Наука, 1987. – 135 с.

Шеффер Е. Г. Некоторые черты развития южного Приладожья в голоцене / Е. Г. Шеффер // Вестник ЛГУ. – 1967. – № 2. – С. 159–162.

Ширкова А. П. Влияние промысла на запасы сига и судака Ладожского озера / А. П. Ширкова // Изв. ГосНИОРХ. – 1977. – Т. 116. – С. 36–45.

Ширкова А. П. Окунь Ладожского озера / А. П. Ширкова // Изв. ВНИОРХ. – 1956. – Т. 38. – С. 143–148.

Шитиков В. К., Зинченко Т. Д. Комплексные критерии экологического состояния водных объектов: экспертный и статистический подход / В. К. Шитиков, Т. Д. Зинченко // Количественные методы экологии и гидробиологии (Сб. науч. тр., посвященный памяти А. И. Баканова) / Отв. ред. чл.-корр. РАН Г. С. Розенберг. – Тольятти: СамНЦ РАН, 2005. – С. 134–147.

Шмакова М. В. К вопросу о расчетах расхода взвешенных наносов / М. В. Шмакова // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2020. – № 1. – С. 50–71.

Шмакова М. В. Расчеты твердого стока рек и заиления водохранилищ / М. В. Шмакова. – СПб.: Издательство ВВМ, 2018. – 149 с.

Шмакова М. В. Стохастическая модель погоды в системе детерминировано-стохастического моделирования характеристик стока: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 11.00.07 / Шмакова Марина Валентиновна; Гос. гидрологич. ин-т. – СПб., 2000. – 25 с.

Шмакова М. В., Кондратьев С. А. Стохастическая модель погоды в системе детерминировано-стохастического моделирования стока и биогенной нагрузки / М. В. Шмакова, С. А. Кондратьев // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 9. – С. 74–84.

Шнитников А. В. Внутривековая изменчивость общей увлажненности бассейна Ладожского озера / А. В. Шнитников // Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. – Л.: Изд. Ленинградского Гос. Университета, 1966. – С. 5–57.

Шурганова Г. В. и др. Распространение коловратки *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) (Rotifera: Brachionidae) в водоемах и водотоках Нижегородской области / Г. В. Шурганова, Д. Е. Гаврилко, М. Ю. Ильин и др. // Российский журнал биологических инвазий. – 2017. – № 3. – С. 122–35.

Эдельштейн К. К. Лимнология / К. К. Эдельштейн. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: изд. ЮРАЙТ, 2020. – 387 с.

Экологическая обстановка в Санкт-Петербурге и Ленинградской области в 1997 году. Справочно-аналитический обзор. – СПб.: Изд. НИИ химии СПбГУ, 1998. – 290 с.

Экомониторинг рек и побережья Финского залива и состояния окружающей среды. Материалы межрегиональной научно-практической конференции школьников. – Санкт-Петербург. АНЭО «Друзья Балтики». – СПб.: ООО Р-Копи. – 2019. – 104 с.

Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения / Под ред. З.С. Кауфмана. – Л.: Наука, 1990. – 264 с.

Экосистемы Валаамского архипелага (Ладожское озеро) на рубеже 20-го и 21-го веков. Черты уникальности и современное состояние: Атлас / Под ред. А.Б. Степановой. – СПб.: РГГМУ, 2016. – 44 с.

Юдин Е. А., Петрова Т.Н. Взвеси / Е.А. Юдин, Т.Н. Петрова // Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас / Ред. В.А. Румянцев. – СПб.: Нестор-История, 2015. – С. 80–81.

Юдин Е.А. Пространственно-временная неоднородность распределения взвесей / Е.А. Юдин // Современное состояние экосистемы Ладожского озера / Под ред. Н.А. Петровой, Г.Ф. Расплатиной. – Л.: Наука, 1987. – С. 92–100.

Юдин Е.А. Режим распределения взвесей в озере / Е.А. Юдин // Ладожское озеро – критерии состояния экосистемы / Под ред. Н.А. Петровой, Г.Ф. Расплатиной. – СПб.: Наука, 1992. – С. 67–74.

Для заметок

Для заметок

Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата

Подписано в печать 24.09.2021. Формат 70х100 1/16.
Гарнитура Times. Печ. л. 40.
Тираж 300 экз. Заказ № 4187.

Издатель – Российская академия наук

Оригинал-макет подготовлен
ООО «Красногорский полиграфический комбинат»

Публикуется в авторской редакции

Отпечатано в ООО «Красногорский полиграфический комбинат»
115093 г. Москва, Партийный переулок д. 1 корп. 58, стр. 1, эт. 1, пом. 1

Издается в соответствии с постановлением Научно-издательского совета
Российской академии наук (НИСО РАН) от 12 февраля 2021 г. № 01
и распространяется бесплатно