

# Геология: чем глубже, тем удивительнее

Слоистая структура  
осадочных пород

## ГЕОЛОГИЯ

Геологический факультет — один из старейших в Московском государственном университете. Дух истории витает в этих стенах, где в огромных застекленных шкафах застыли останки древних организмов, а из витрин загадочно поблескивают многочисленные минералы. Видимо, для того чтобы все помнили, что наука — это не только серьезно, но и весело, на одном из шкафов красуется плакат: «У организма есть только два пути: стать ископаемым или исчезнуть». О геологии, ее месте в развитии цивилизации и жизни Вселенной — наш разговор с деканом геологического факультета МГУ академиком **Дмитрием Юрьевичем Пушаровским.**

— **Дмитрий Юрьевич, хочу начать наш разговор с комплимента геологическому факультету МГУ. Ваши научные сотрудники А.В. Спиридонов и Д.А. Мамонтов читают лекции для детей в книжном магазине-клубе «Гиперион», куда мы регулярно ездим. Благодаря этим лекциям дети влюбляются в вашу науку и даже задумываются о том, чтобы связать с ней жизнь.**

— Это прекрасно! Наша наука не просто очень интересна, она необычайно важна. Мы готовим специалистов, которые обеспечивают почти половину внутреннего валового продукта в мире. Сегодня все понимают, какую роль играет геология в России: ведь 32% мировых запасов полезных ископаемых находятся в нашей стране. Спрос на них постоянно растет. Например, за последние 50 лет потребление энергетических ресурсов, в частности нефти, выросло в десять раз, при том что население увеличилось в два с половиной раза. Это значит, темпы потребления этих ресурсов увеличиваются. Встает вопрос, на сколько их хватит. Так вот, при нынешних темпах добычи, а это примерно 500 млн т нефти в год, теперешних запасов должно хватить на 20–30 лет.

— **Что же дальше?**

— Есть разные точки зрения. Приведу не очень известные факты. Около 10% нефти остается в уже покинутых месторождениях из-за того, что они очень трудноизвлекаемы. Но это огромное количество, и если научиться их добывать, это будет выходом. Сейчас над этим многие работают.

В частности, разработаны плазменно-импульсные технологии добычи этих запасов из уже оставленных месторождений, в старых скважинах, в коллаторах. Извлекая их, еще 30 лет можно обеспечивать этими энергоресурсами нашу промышленность. Но это малый срок.

Поэтому наши геологи работают над технологиями извлечения нефти из высокоуглеродистых сланцевых пород. Огромные территории в Западной Сибири площадью в 1 млн км<sup>3</sup> в этом плане очень перспективны. Интересно, что площадь Северного Ледовитого океана в десять раз меньше, чем Тихого, а нефтяные запасы в пять раз больше. Еще и поэтому Арктический шельф — весьма заманчивый регион.

Не менее важное направление — добыча твердых полезных ископаемых. В конце XX в. использовались в основном 20 металлов, а сейчас благодаря гаджетам, которые у всех есть, — телефонам, планшетах, ноутбукам и т.д. — число таких металлов выросло до 60. За последние 100 лет только потребление меди выросло в 37 раз. Если 100 лет назад продуктивными считались месторождения с содержанием меди порядка 13%, то сейчас это число сокращено до 0,2–0,5%. И здесь в основном помогает совершенствование технологий комплексного освоения таких месторождений.

Развитие цивилизации с древних пор было связано с потреблением металлов. Скажем, те же медные месторождения начали разрабатываться за 4,2 тыс. лет до н.э. Древнейшее месторождение

(съемка: Pichi, Shutterstock)



Тимна на восточной окраине Синайского полуострова, известное еще 6 тыс. лет назад, сейчас стало достопримечательностью, туристическим объектом, а когда-то оно процветало.

— **Когда началась геология, связанная с исследованиями глубинного строения Земли научными методами?**

— В 1909 г. хорватский сейсмолог Андрей Мохоровичич впервые применил для исследований внутреннего строения нашей планеты сейсмические данные. Это методы, когда оцениваются скорости распространения упругих, или механических, волн, при прохождении их вглубь. Ударами, под воздействием которых возникают эти волны, могут быть и землетрясения, и падения метеоритов, а в теперешнем мире и взрывы, которые провоцируют прохождение сейсмических волн сквозь толщу Земли и таким образом позволяют по изменениям их скоростей понять, насколько однородна Земля в глубинах. Мохоровичич, пользуясь этими методами, выделил границу, отделяющую земную кору от мантии. Земная кора — это верхняя скорлупа поверхности нашей планеты. Ее толщина, или мощность, как мы говорим, под континентами выше. Под Гималаями это 80 км, под океанами ее мощность всего лишь несколько километров.

Затем в 1926 г. английский сейсмолог Гарольд Джеффрис и германо-американский сейсмолог Бено Гутенберг обосновали границу мантии и ядра, а спустя десять лет, в 1936 г., датская исследовательница Инге Леманн разделила ядро на внутреннее и внешнее.

Уже в середине XX в., в первую очередь в работах австралийского сейсмолога Кита Эдварда Буллена, все эти данные были окончательно обобщены. Модель, состоящая из земной коры, из верхней и нижней мантии, зоны, отделяющей мантию от ядра, и, наконец, внешнего и внутреннего ядра, была в общем скомпонована. И казалось, что все в порядке. Но ведь надо понимать, что толщина, или мощность, нижней мантии, согласно этой модели, составляет 2,2 тыс. км. Трудно представить, что такая огромная оболочка Земли не меняется на всем протяжении. И начиная с 70-х гг. прошлого века японские, а затем и американские исследователи начали применять метод сейсмотомографии, который пролил свет на этот вопрос. Снаряжались большие экспедиции в океаны, которые занимают огромную площадь — более 70% поверхности Земли.

Было установлено, что в сечениях нашей планеты на определенных уровнях скорости сейсмических волн меняются, причем не только

по вертикали, но и по горизонтали. Почему? Оказывается, температура и вязкость пород, если идти вглубь Земли, не одинакова. При этом на одной глубине температура пород может изменяться от 500° С в верхней мантии до 2000° С в нижней. Это обстоятельство позволяет выделить определенные блоки с близкими контурами распространения сейсмических волн по горизонтали внутри нижней мантии, которая ранее считалась однородной.

Здесь надо сказать, что приоритет принадлежит нашим исследователям. Эту группу в свое время возглавил мой отец, академик Ю.М. Пуцаровский. В декабре 2016 г. ему исполнилось 100 лет. Он жив и продолжает интересоваться наукой.

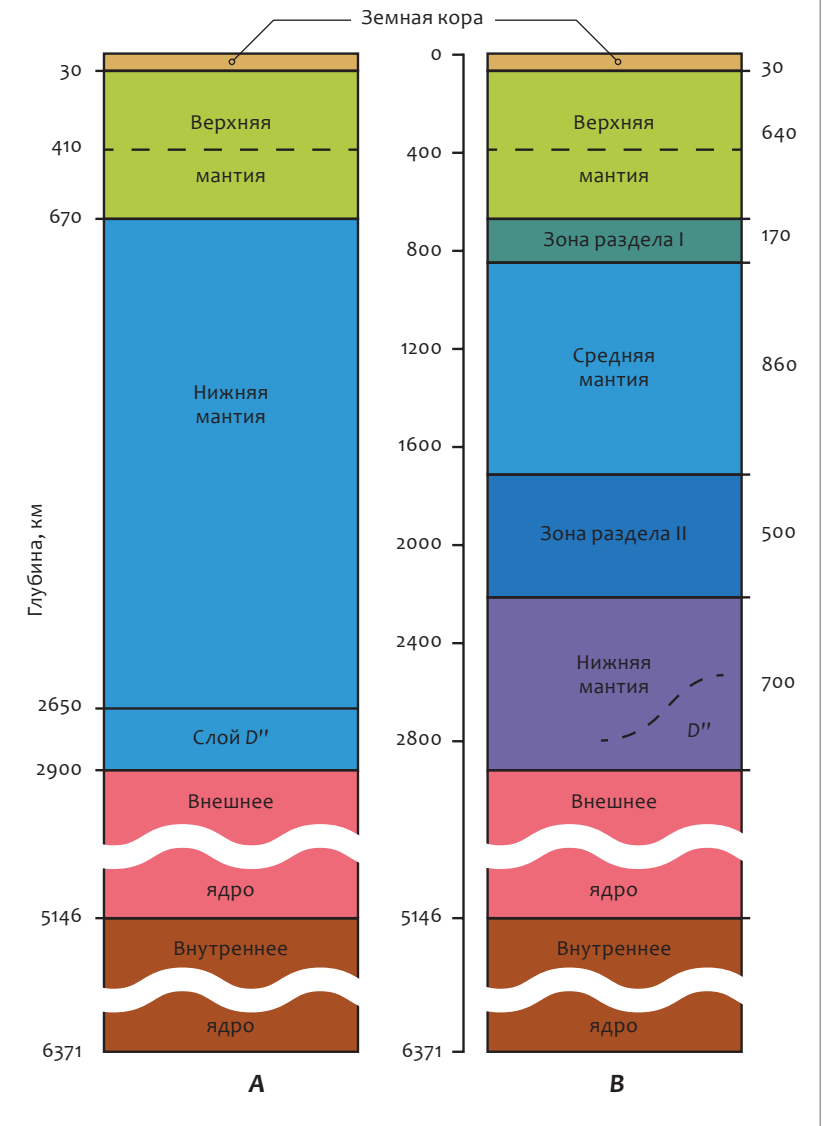
— **Это потрясающе! У вас в роду все долгожители?**

— По линии отца — да. Так что и у меня есть шанс. Так вот, начиная с 1995 г. он опубликовал целый ряд работ, в которых предложил более подробную схему строения мантии. К этой работе он привлек геофизиков, тектонистов и меня. Я принадлежу к минералогическому сообществу, я экспериментатор. Отец сфокусировал мое внимание на изучении структурных трансформаций минералов при высоких давлениях и температурах. Анализ данных о возможных глубинных минеральных преобразованиях, а также сведений о внутримантийных сейсмических границах в мантии Земли позволил высказать новую идею о строении нашей планеты.

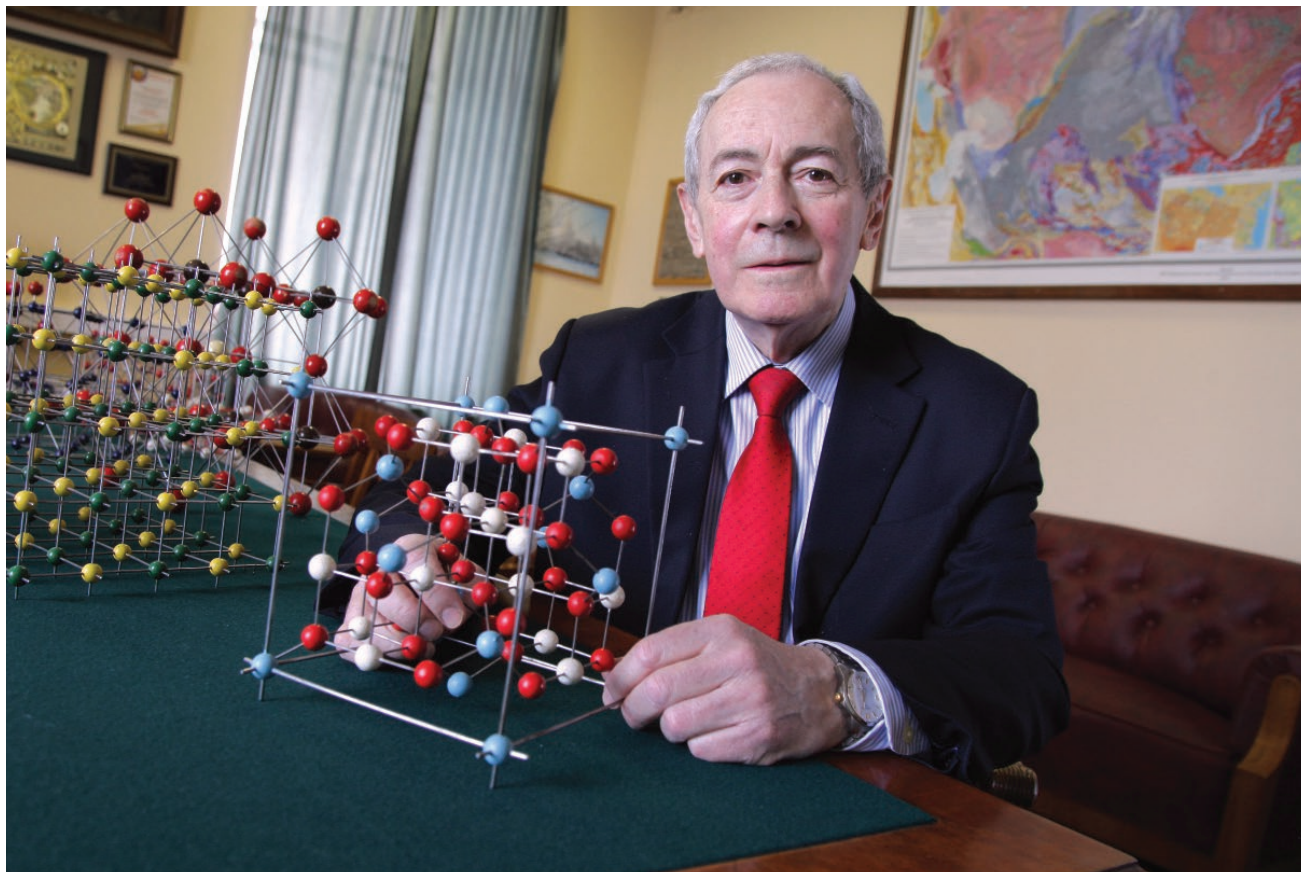
Таким образом, внутри ранее однородной нижней мантии в интервале глубин 850–1700 км была выделена средняя мантия, отделенная от нижней и верхней зонами перехода. Эта работа была признана, мы опубликовали значительное число статей как в российских журналах, так и в зарубежных, а в конце 2011 г. — обобщающую монографию «Геология мантии Земли». С тех пор в той или иной форме эти идеи находят подтверждение. А некоторые последние исследования ученых в мире также направлены на более детальное разделение глубинных оболочек Земли.

В 2015 г. была опубликована работа китайских и американских сейсмологов, в которой акцентировалось внимание на том, что на самом

## Традиционная (А) и новая (В) модели строения Земли с выделением средней мантии



деле и внутреннее ядро Земли, имеющее радиус 1,3 тыс. км, разделяется еще на две примерно равные геосферы или оболочки. Я общался с одним из авторов этой публикации, он работает в Чикагском университете, и мы пришли к следующему заключению. Известно, что давление в центре Земли измеряется миллионами атмосфер. Температура — от 4000° С до 5000° С. Это, как мы говорим, фаустовские условия, способные подвергнуть минеральное вещество драматическим перестройкам. И если на поверхности Земли железо встречается в известной нам форме, так называемая структура альфа-железа, то при таких параметрах, как



Декан геологического факультета МГУ академик Д.Ю. Пуцаровский



в глубинных частях внутреннего ядра, оно трансформируется в совершенно другую, анизотропную структуру, которая обладает иной симметрией. Это так называемая структура эILON-железа. Не исключая наличия разницы в вещественном составе обеих оболочек внутреннего ядра, можно допустить, что в них содержатся преимущественно кристаллы именно эILON-железа, различающиеся своей взаимно перпендикулярной ориентировкой по отношению к оси вращения Земли.

Разумеется, мы не можем со стопроцентной уверенностью утверждать, что именно находится в центре Земли. Тут я вспоминаю случай, когда мы с женой покупали арбуз и жена поинтересовалась у продавца, достаточно ли красный он внутри. «Я там не был, не знаю», — ответил продавец.

## В современной геологии новые идеи высказываются в отношении глубинного строения не только Земли, но и других планет. В прошлом веке американские корабли «Аполлон» оставили при посадке на Луну четыре датчика. Зарегистрированные ими скачки в скоростях сейсмических волн позволили лучше понять и строение нашего спутника

— **И каким оказался арбуз?**

— Отличным. По всей видимости, продавец все-таки в этом вопросе разбирался. Так и мы: не были внутри Земли и не знаем наверняка, как она устроена, хотя современные измерительные возможности исключительно высоки.

В современной геологии новые идеи высказываются в отношении глубинного строения не только Земли, но и других планет. Еще в прошлом веке американские корабли «Аполлон» оставили при посадке на Луну четыре датчика сейсмических волн, которые измерили скорость их прохождения сквозь толщу нашего спутника в результате происходящих там лунотрясений и импактных ударов метеоритов.

Радиус Луны, конечно, значительно меньше земного. Однако зарегистрированные скачки в скоростях сейсмических волн позволили лучше понять и строение Луны. Выяснилось, что в ее внутреннем ядре присутствует железо, но, поскольку давление внутри нее значительно ниже, чем у Земли, и железо там совсем не такое, а в гамма-форме. Плотность и упругие свойства этой модификации

железа, а следовательно и скорости распространения сейсмических волн, вполне соответствуют глубинной оболочке Луны.

— **Мы говорим о строении планет. Но что представляет собой состав их глубинных оболочек? Ведь при высоких давлениях и температурах минералы не могут быть таким же, как на поверхности.**

— Совершенно верно. Тут надо понимать, что прямых данных о составе глубинных оболочек геосферы у нас нет. На Земле большинство образцов, которые рассматриваются как выбросы пород, залегающих в мантии, диагностируются интервалом глубин в 100 км, и лишь изредка, в кимберлитах, 250 км. Включения в алмазах, захваченные в процессе роста их кристаллов на больших глубинах, весьма редки. Последние работы, буквально накануне нынешнего года, позволяют предположить, что некоторые эти включения сформировались на глубинах порядка 700 км. Мы знаем также, что была пробурена Кольская сверхглубокая скважина, достигшая в 1990 г. отметки 12 262 м. Технически это выдающийся результат. Это самая глубокая скважина в мире. Но при этом все понимают, что затронута самая верхняя скорлупа земной коры.

Конечно, в результате этой работы был сделан ряд интересных открытий. В частности, установлено, что температурный градиент, то есть увеличение температуры с глубиной, идет более существенно, чем это предполагалось. Думали, что на этой глубине температура будет 100° С, а оказалось — 180° С. Но как понять, что происходит на большей глубине?

В предсказании минералогически возможных фаз на таких глубинах очень помогают современные кристаллографические, рентгенографические методы, позволяющие в маленьких камерах, где наковальнями служат кристаллики алмазов, сжимать минералы. Это особая технология гидростатического сжатия, с помощью которого в небольших объемах удается смоделировать давление вплоть до центра Земли, то есть 3,6 млн атм. Для сравнения упомяну, что если слона обуть в туфли на шпильках, то создастся давление, равное 16 тыс. атм.

— **Известно ли, что вообще представляет собой земное вещество?**

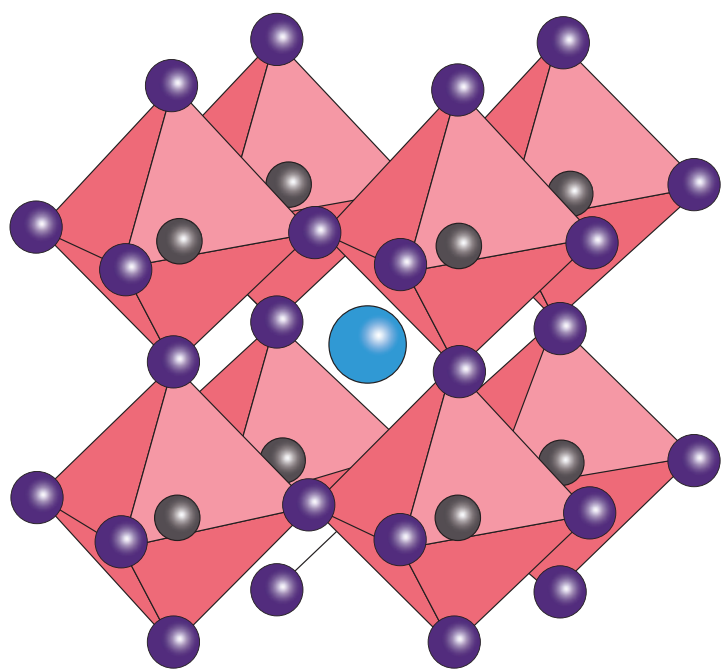
— Да, многое известно. Более 95% земной коры — это силикаты, минералы, в которых структуры содержат в первую очередь различные геометрические постройк

тетраэдров. В центре кремний, по четырем вершинам — кислород. Таких вариаций более 100.

Новая эра в наших представлениях о вещественном составе мантии связана с 1961 г., когда аспирант нашего факультета, кафедры геохимии, а теперь уже академик С.М. Стишов установил перестройку структуры кварца. А кварца в земной коре примерно 12%. Оказывается, эта структура при давлениях порядка 10 ГПа трансформируется в структуру с совершенно с другой пространственной геометрией. Коренное отличие этих двух структур в том, что в кварце кремний находится в тетраэдрах, а в этой его модификации кремний находится в октаэдрах. Там шесть вершин, восемь граней. Интересно, что годом позже в импактном кратере в Аризоне был обнаружен минерал именно с такой структурой.

А потом в камерах с алмазными наковальнями подвергли сжатию основные породообразующие минералы, которые, как предполагают, характерны для верхней мантии. Слагающее ее гипотетическое вещество содержит в первую очередь оливин, пироксены и гранаты, известные всем модницам. И вот когда стали сжимать уже эти минералы, оказалось, что все они трансформируются в абсолютно другие структуры. А при еще больших давлениях, соответствующих более существенным глубинам, допустим, 670–700 км, находясь уже внутри нижней мантии, основные содержащиеся в ней силикаты приобретают структуру минерала перовскита. Железо-магнезиальные и кальцийсодержащие силикаты с такой структурой уже более 40 лет считаются самыми распространенными вероятными минералами в масштабе всей Земли, составляя около 75% объемного содержания нижней мантии. Но минерал с таким составом и структурой, получивший название бриджманит, был открыт лишь в 2014 г. А вот в масштабе земной коры наиболее распространен полевой шпат — более 50%. Мы часто видим, как он поблескивает, когда спускаемся в метро. Оставшиеся 20% от состава нижней мантии приходятся на оксиды железа и магния со структурой хлористого натрия — минерала галита. И это лишь два примера по минералогически возможным химическим соединениям в глубинных оболочках Земли. На самом деле, по мнению большинства исследователей, их значительно больше.

Под воздействием давления многие химические элементы начинают себя вести очень необычно. Неудивительно, что размер их атомов уменьшается. Менее очевидно, что при этом изменяется их электронная структура. Инертные газы перестают быть таковыми и образуют соединения между



Минералогически вероятные для нижней мантии соединения со структурой перовскита: каркас из октаэдров, образованных атомами кислорода (фиолетовые шары), внутри — атомы кремния (серые шары), в полостях каркаса — атомы магния и железа (голубой шар)

собой и с другими элементами. Образующиеся соединения не подчиняются школьным представлениям о валентности. В свете этого нетрудно представить, что, если бы Алиса из сказки Льюиса Кэрролла действительно летела сквозь центр Земли, ее разорвало бы на части.

Интересно и то, что в составе формально безводных веществ, выброшенных с больших глубин, присутствует вода. Например, одно из таких соединений — модификация оливина со структурой шпинели, минерал, который называется рингвудит. Он был найден на Земле и в метеоритах. И если всю содержащуюся в мантийных минералах жидкость освободить, уровень воды в Мировом океане поднимется на 800 м. Москва станет портовым городом.

— **Наверняка подобные трансформации минералов характерны не только для Земли, но и для Луны и других планет?**

— Да, это так. Но ответ на этот вопрос очень непростой. Кроме Земли и Луны результаты экспериментальных работ позволяют высказывать предположения относительно важнейших компонентов состава мантии и ядер газовых (Юпитера, Сатурна) и ледяных (Урана, Нептуна) гигантов. Теоретические структурные модели предлагаются для возможных минеральных фаз экзопланет. А это уже давления порядка миллиарда и более атмосфер. Звучит фантастически, и в этом плане мы располагаем более реалистичными сведениями о составе



марсианской коры. Американский марсоход, проехав по поверхности Красной планеты около 8 км, пробурил несколько скважин в 2012 г., а затем несколько раз передавал результаты рентгенографических исследований на Землю. Первое предположение — примерно о 70% находящихся там минералов, среди которых, так же как и на Земле, доминируют силикаты. Это очень интересно.

Иначе говоря, геологическая наука нужна не только для познания Земли. Сейчас появились сообщения о проекте доставке руды с Луны. Предполагается, что это будет сырье, содержащее в первую очередь такие элементы, как железо, алюминий, титан.

Важно, что исследования такого рода комплексные, с привлечением специалистов по физике, химии, минералогии, кристаллографии и очень

## Наши представления о составе, строении и эволюции Земли продолжают расширяться. Каждый год в мире открывают 50–60 новых минералов. Для сравнения: прирост числа синтезируемых человеком химических соединений оценивается цифрой в несколько сотен новых веществ в день

многим смежным наукам. В результате таких совместных работ наши представления о составе, строении и эволюции Земли за последние десятилетия значительно расширились и продолжают расширяться. Каждый год во всем мире открывают 50–60 новых минералов. Для сравнения: прирост числа синтезируемых человеком химических соединений оценивается цифрой в несколько сотен новых веществ в день. На сегодня известно 5224 минерала. Уверен, что и этот список будет расти. Мне как декану приятно отметить, что за время существования МГУ около 40 минералов названо в честь профессоров и сотрудников геологического факультета.

— **Дмитрий Юрьевич, среди всего разнообразия минералов есть пуцаровскит. Это в вашу честь?**

— Да, так его назвал мой швейцарский коллега, который его и открыл. Мы дружили. Я в ту пору возглавлял комиссию Международной минералогической ассоциации по классификации минералов. Сейчас большинство новых минералов называют в честь исследователей, которые посвятили

этому направлению свою жизнь. Это, конечно, очень непростое дело. Определить новый минерал без структурных исследований невозможно.

Иногда случаются курьезы. Однажды в нашу исследовательскую группу попали кристаллики, которые сначала посчитали новым карбонатом меди. Однако, расшифровав эту структуру, мы увидели, что это не карбонат. Он действительно содержал медь, а также углерод, водород, кислород, но не имел отношения к карбонатам. Это была структура органического соединения, соль янтарной кислоты. Мы были очень рады, что эта структура не была изучена, и направили ее в высокорейтинговый журнал. Но там потребовали указать, как эта фаза образовалась. Нам пришлось провести по этому поводу целое расследование. Оказалось, что моему коллеге из Женевы этот образец передала дама — коллекционер минералов. Но изначально это был образец азурита, очень красивого медного минерала темно-синего цвета. Чтобы он выглядел еще лучше и блестел, она его помыла со стиральным порошком, в результате произошла химическая реакция и образовалась эта новая фаза.

Нам пришлось написать официальное письмо в представительство фирмы — производителя стирального порошка, чтобы выяснить его точный состав. Прошло два месяца. Пришел ответ, что состав порошка строго конфиденциален. Тогда мы обратились к нашим коллегам-химикам из МГУ. Они помогли решить эту задачку. В итоге наша статья вышла-таки в этом журнале под заголовком: «Никогда не мойте медные минералы стиральными порошками».

— **Вы уже более 50 лет в геологии. С кого началась ваша геологическая родословная?**

— С отца. Он в 16-летнем возрасте попал в экспедицию под руководством А.В. Фурсенко, дедушки А.А. Фурсенко, советника президента нашей страны. Я помню Андрея лет с семи. Сейчас, когда мы с ним встречаемся, хотя это бывает редко, всегда радуемся, потому что нас связывают общие воспоминания.

Вообще у отца очень интересная биография. Влюбившись в геологию, он в 1937 г. поступил в университет на географический факультет. А когда в 1938 г. сформировался геологический, перешел туда. Июнь 1941 г. он встретил в Черновцах, это западная граница бывшего Советского Союза. Там он работал с геологическим отрядом, проходил преддипломную практику. Фашисты наступали на этот район с севера и юга. И это позволило им на грузовике выбраться из Черновцов и добраться до Тулы. Там они сели на поезд, приехали в Москву, и через несколько дней отец ушел на фронт. Прошел всю войну, был участником Парада Победы в июне 1945 г.

— **Мы поздравляем его с этим праздником! Интересно, геология ему на войне каким-то образом пригодилась?**

— Он ушел на войну, не доучившись один год. А в 1942 г. вышел указ: тем, кто ушел на войну с последнего курса, вручали диплом без защиты. И отец всегда в шутку подчеркивал, что не доучился. Но это никак не сказалось на его квалификации.

Начинал он в пехоте на Северо-Западном фронте, потом попал в авиацию, был начальником склада горюче-смазочных материалов. Однажды инспектировать его, когда он был уже в звании лейтенанта, на аэродром приехал Ю.А. Косыгин, в то время в звании майора. Юрий Александрович уже тогда был известным геологом-тектонистом, и он обратил внимание, что в землянке, где жил отец, стоит книжка «Литоология» (это одно из направлений геологии). Поинтересовался чья. Так завязалось их знакомство. В 1945 г. отец демобилизовался и стал оформляться в Геологический институт АН СССР. На заявлении с просьбой принять его на работу стоит виза Ю.А. Косыгина, который был в этот момент директором института.

— **Вот как интересно переплетаются судьбы...**

— Потом Юрий Александрович стал академиком, жил и работал в Хабаровске, возглавлял геологический институт. Каждый раз, бывая в Москве, он

встречался с отцом. У них сохранялись самые дружеские отношения. Поэтому геология для нас — это сама жизнь.

— **Дмитрий Юрьевич, я подозревала, что под нашими ногами тайн и загадок не меньше, чем в космических глубинах. Ваш рассказ в этом убеждает.**

— Да, это так. Вообще, значение геологии в современном мире исключительно велико. Причем геологии не только как прикладной, но и как фундаментальной науки. На первый взгляд может показаться, что все это отходит на второй план по сравнению с необходимостью добывать руды, нефть и газ, но на самом деле это не так. Например, астрономия изучает планеты, галактики, Вселенную. Кто-то может спросить: для чего все это нужно? Ведь мы там не живем. На самом деле я бы поставил эти исследования в один ряд с важнейшими географическими открытиями, благодаря которым мы постепенно расширяли границы нашего мира. Любой научный поиск позволяет человеку лучше понять окружающий мир и свое место в нем. Это коренной вопрос любой фундаментальной науки, и геологии в том числе. И только следом за этими исследованиями идут великие открытия, которые позволяют нам жить дольше и лучше. ■

Беседовала **Наталья Лескова**



Минералогические подарки геологическому факультету МГУ в кабинете декана