

РОБЕРТ ХЕЙЗЕН

СИМФОНИЯ №6

УГЛЕРОД И ЭВОЛЮЦИЯ ПОЧТИ ВСЕГО



Книжные проекты
Дмитрия Зимина

АНО
АЛЬПИНА НОН-ФИКШН

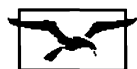
*Моим друзьям и коллегам
по Обсерватории глубинного углерода.*

Приключение только началось

SYMPHONY IN C

Carbon and the Evolution of (Almost) Everything

ROBERT M. HAZEN



W. W. NORTON & COMPANY

Independent Publishers Since 1923

New York • London

Роберт Хейзен

Симфония № 6

Углерод и эволюция почти всего

Перевод с английского



Книжные проекты
Дмитрия Зимина

АНО
АЛЬПИНА НОН-ФИКШН

Москва, 2021

УДК 546.26
ББК 24.124
Х35

Переводчик Анастасия Науменко
Научный редактор Владислав Стрекопытов
Редактор Анастасия Ростоцкая

Хейзен Р.

Х35 Симфония № 6. Углерод и эволюция почти всего / Роберт Хейзен ; Пер. с англ. — М.: Альпина нон-фикшн, 2021. — 402 с. + 8 с. вкл.

ISBN 978-5-00139-283-5

Роберт Хейзен — незаурядный ученый, меломан и успешный музыкант, и этим обусловлена структура его книги, повторяющая принципы построения симфонии. Ее лейтмотив — химический элемент № 6 в Периодической таблице, или углерод, без которого немыслима жизнь, с самого ее зарождения и до всего, что нас окружает в современном мире. Временной охват книги — чуть менее 14 млрд лет, от возникновения Вселенной до наших дней. И на протяжении практически всего этого времени углерод исполняет свою уникальную партию в симфонии эволюции. Глубинный углеродный цикл, минералогия углерода, вулканические газы, алмаз и графит, органическое топливо, нанотрубки, климат, ископаемые остатки животных и растений — вот лишь малая часть тем, затронутых в этой невероятно познавательной книге.

Для широкого круга читателей.

УДК 546.26
ББК 24.124

Все права защищены. Никакая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, включая размещение в сети интернет и в корпоративных сетях, а также запись в память ЭВМ для частного или публичного использования, без письменного разрешения владельца авторских прав. По вопросу организации доступа к электронной библиотеке издательства обращайтесь по адресу tylib@alpina.ru

ISBN 978-5-00139-283-5 (рус.)
ISBN 978-0-393-60943-1 (англ.)

© Robert M. Hazen, 2019
© Издание на русском языке, перевод, оформление.
ООО «Альпина нон-фикшн», 2021



Книжные проекты
Дмитрия Зимина

Эта книга издана в рамках программы
«Книжные проекты Дмитрия Зимина»
и продолжает серию «Библиотека «Династия».

Дмитрий Борисович Зимин — основатель
компании «Вымпелком» (Beeline), фонда
некоммерческих программ «Династия» и фонда
«Московское время».

Программа «Книжные проекты Дмитрия
Зимина» объединяет три проекта, хорошо
знакомые читательской аудитории: издание
научно-популярных переводных книг
«Библиотека «Династия», издательское
направление фонда «Московское время»
и премию в области русскоязычной научно-
популярной литературы «Просветитель».

Подробную информацию о «Книжных проектах
Дмитрия Зимина» вы найдете
на сайте ziminbookprojects.ru.

Оглавление

Пролог.....	9

ТИШИНА	23

ЧАСТЬ I — **ЗЕМЛЯ**: Углерод — элемент кристаллов

ПРЕЛЮДИЯ — До образования Земли.....	27
ВСТУПЛЕНИЕ — Земля появляется и эволюционирует	48
РАЗРАБОТКА — Глубинный углерод Земли	93
РЕПРИЗА — Миры углерода.....	123
КОДА — Вопросы без ответов	129

ЧАСТЬ II — **ВОЗДУХ**: Углерод — элемент глобальных циклов

ИНТРОДУКЦИЯ — До воздуха	133
АРИОЗО — Происхождение земной атмосферы.....	137
ИНТЕРМЕЦЦО — Глубинный углеродный цикл	150
АРИОЗО, ДА КАПО — Атмосферные изменения.....	184
КОДА — Известное, неизвестное и непознаваемое	195

ЧАСТЬ III — **ОГОНЬ**: Углерод — элемент вещей

ИНТРОДУКЦИЯ — Материальный мир	203
СКЕРЦО — Полезные вещества	213
ТРИО — Наноматериалы	221
СКЕРЦО, ДА КАПО — Истории	228
КОДА — Музыка	242

ЧАСТЬ IV — **ВОДА**: Углерод — элемент жизни

ИНТРОДУКЦИЯ — Первозданная Земля	247
ВСТУПЛЕНИЕ — Происхождение жизни	249
ВАРИАЦИИ — Эволюция жизни (Тема с вариациями)	294
РЕПРИЗА — Человеческий углеродный цикл	347
ФИНАЛ — Земля, Воздух, Огонь и Вода	354

Благодарности	359

Примечания	363

Предметно-именной указатель	387

Пролог

Взгляните вокруг. Углерод повсюду: в бумаге этой книги, краске на ее страницах и клее, который их скрепляет; в подошве и коже ваших туфель, синтетических тканях и красителях одежды, а также в молниях на основе тефлона и застежках-липучках; в каждом кусочке пищи, в пиве и крепких спиртных напитках, в газировке и игристом вине; в коврах на полу, краске на стенах и потолке, облицовочной плитке; в горючих материалах — от природного газа и бензина до свечного воска; в прочной древесине и отполированном мраморе; во всех клеях и смазках; в грифелях карандашей и бриллиантах украшений; в аспирине и никотиновой кислоте, кодеине и кофеине, а также в любом другом лекарстве, которое вы когда-либо принимали; в любом пластиковом изделии — от магазинных пакетов до велосипедных шлемов, от дешевой мебели до дизайнерских солнечных очков. Атомы углерода окружают вас от самых первых подгузников до обтянутого шелком гроба.

Углерод дарит жизнь: ваша кожа и волосы, кровь и кости, мышцы и сухожилия — все зависит от него. Каждая

клетка в вашем теле — а на самом деле каждая часть каждой клетки — основывается на прочном каркасе из углерода. Углерод материнского молока становится углеродом бьющегося сердца ребенка. Углерод — это химическая суть глаз, рук, губ и мозга вашего любимого человека. Когда вы дышите, вы выдыхаете углерод; когда целуетесь — атомы углерода соединяются.

Из того, до чего вы дотрагиваетесь, проще назвать те предметы, в которых нет углерода, — это алюминиевые банки в вашем холодильнике, кремниевые микрочипы в вашем айфоне, золотые зубные коронки и еще кое-какие диковинки, — чем перечислить хотя бы 10% окружающих вас объектов, его содержащих. Мы живем на углеродной планете и сами являемся представителями углеродной жизни.

Каждый химический элемент своеобразен, но некоторые — своеобразнее остальных. Из всей пестроты обитателей Периодической таблицы элемент № 6 особо выделяется по своему влиянию на нашу жизнь. Углерод не просто стандартный элемент материи. Углерод обеспечивает важнейшую химическую связь, прослеживающуюся через всю бесконечность пространства и времени, — основополагающую для понимания космической эволюции. На протяжении почти 14 млрд лет Вселенная эволюционировала, становясь все разнообразнее и разнообразнее и завораживая бесконечными вариантами своих проявлений. Углерод лежит в сердце этой эволюции, дирижируя появлением планет, жизни и нас с вами. И в большей степени, чем любой другой компонент, углерод способствовал стремительному появлению новых технологий — от паровых двигателей промышленной революции до нынешнего «пластикового века». Но вместе с тем он же ускоряет небывалые изменения окружающей среды и климата, происходящие в планетарном масштабе.

Зачем нам фокусировать внимание на углероде? Водород намного более распространен, гелий — более стабилен, а кислород — химически активнее. Железо, сера, фосфор, натрий, кальций, азот — у всех есть свои замечательные истории. Все играли важную роль в сложной эволюции Земли. Но если вы хотите найти смысл и цель в бескрайнем холоде и темноте Вселенной, приглядитесь к углероду. Углерод как сам по себе, так и в химических соединениях с другими атомами — это беспримерная космическая инновация, предоставляющая ни с чем не сравнимые возможности для вселенской эволюции.

Ни с одним из более чем 100 химических элементов не связано столько наших ожиданий и страхов, сколько с углеродом. Новые углеродсодержащие материалы, изобретаемые тысячами ежегодно, — продукция Kleenex, спандекс, фреон, нейлон, полиэтилен, вазелин, листерин*, бактин**, скотч, пластилин Silly Putty — бесконечно обогащают нашу жизнь, замечаем мы это или нет. Но распространение всех этих синтетических химических веществ привело к непреднамеренным последствиям — появлению опасных дыр в защитном озоновом слое, смертельных аллергических реакций и большого количества канцерогенов. Будучи основой всех биомолекул, углерод как никакой другой элемент способствует благополучию и поддержанию жизни на Земле, включая человека, а потеря или смещение атомов углерода может привести к болезням и смерти.

Близповерхностный геохимический цикл углерода стабилизирует климат Земли, поддерживает здоровье экосистем, а нас обеспечивает богатейшими источниками недорогой энергии. Однако, если в силу природных или антропогенных факторов — таких как извержения вулканов, сжигание угля,

* Антисептическое средство для полоскания рта и горла. — *Прим. науч. ред.*

** Антисептик. — *Прим. науч. ред.*

сбившийся с курса астероид или уничтожение лесов — баланс атомов углерода нарушится, климат может измениться, а экосистемы прийти в упадок. И влияние углерода не ограничивается приповерхностной сферой жизни; поведение его в глубоких, скрытых недрах Земли определяет динамические процессы, которые выделяют нашу планету среди всех известных миров.

История углерода в каком-то смысле история всего. Но этот вездесущий незаменимый элемент окружен тайнами. Мы не знаем, сколько углерода содержится в Земле, и не до конца представляем себе разнообразие его форм, спрятанных глубоко внутри нашей планеты. Мы не понимаем, как движутся потоки атомов углерода, циркулирующие между поверхностью Земли и ее глубокими недрами, и не можем сказать, значительно ли они изменились за миллиарды лет истории Земли — в ходе «глубокого времени»*. Несмотря на существование миллионов известных соединений углерода, ученые только сейчас начали исследовать богатство его химии. И величайшая тайна всего — происхождение жизни — неразрывно связана с поведением углерода в сложных химических соединениях с другими элементами.

В том, что касается углерода — его количеств и форм, движения и происхождения, — везде мы натываемся на границы своих знаний о нем. Мы должны найти ответы, но как нам удастся восполнить столь зияющие пробелы в нашем понимании? Кажется, что сама структура науки препятствует устойчивому продвижению. В университетах не хватает кафедр по изучению углерода, а широкомасштабные междисциплинарные исследования проводятся редко. Научные

* Концепция «глубокого времени» разработана шотландским геологом Джеймсом Геттоном в XVIII в. Суть ее заключается в крайне медленном характере протекания геологических процессов, а также глубокой древности Земли. — *Прим. ред.*

открытия совершаются благодаря правильно поставленным вопросам о мире природы, но они зависят также от финансирования в условиях сжатых сроков и ограниченных средств, когда специализация часто довлеет над интеграцией.

Кто первым разработает иную форму поддержки научных исследований?

Место действия — почтенный клуб Century Association* в Нью-Йорке в начале 2007 г., куда ответственные за сбор пожертвований сотрудники Института Карнеги пригласили несколько десятков потенциальных спонсоров на изысканный ужин. Экономика страны процветает, а Барак Обама — пока еще сенатор от штата Иллинойс. Просторные, отделанные деревянными панелями комнаты клуба украшены произведениями величайших в истории Америки художников и скульпторов. Выдающиеся их представители, среди которых Джон Фредерик Кенсетт, Уинслоу Хомер и Пол Мэншип, предложили свои основные творения в обмен на столь желанное, но дорогостоящее членство в клубе. Это оказалось хорошей сделкой для всех: Century Association собрал превосходную коллекцию шедевров, а художники обзавелись доступом к богатым меценатам, которые могли себе позволить высокие вступительные взносы клуба.

Я выступал после обеда на тему исследований происхождения жизни — по сути развлекательную; лекцию я подкрепил простыми наглядными пособиями: стаканом газировки, подобранным в ближайшем парке камнем, чайной ложкой и соломинкой. И всё! Этого достаточно, чтобы

* Основанный в 1847 г. клуб объединяет мужчин и женщин, известных своими выдающимися достижениями в сфере литературы и искусств. Устоявшегося перевода названия на русский язык нет. Его можно перевести как «Ассоциация ста» или «Ассоциация сотни», поскольку изначально в ассоциации было примерно столько членов. — *Прим. ред.*

доступно проиллюстрировать химические этапы, в ходе которых из глубин горячей, насыщенной углеродом вулканической среды на океаническом дне могла появиться жизнь. То, что мои идеи были слегка противоречивыми — и это являлось источником оживленных, иногда язвительных дебатов с коллегами-скептиками, — добавило моим высказываниям немного остроты. В качестве бонуса я раздал присутствующим по экземпляру «Происхождения»*, моей последней книги на эту тему. Я помню чувство родства с художниками, чьи работы окружали меня. Как и они, я отработывал приглашение, пытаюсь поймать взгляд потенциально возможного мецената в надежде, что следующий заказ позволит мне и моим коллегам создать новое научное полотно.

Наука недешева. На поддержание каждого выпускника или аспиранта нужно 100 000 долларов в год. Новые аналитические приборы могут стоить до миллиона долларов плюс техническое обслуживание и замена деталей, которые добавляют к ценнику десять или более процентов в год. Поездки на конференции, оплата публикаций и самого необходимого для лаборатории (пробирок, реагентов и безворсовых салфеток для очистки оптики) — без этого не обойтись. Не говоря уже о накладных расходах. Не имея поддержки от производственных компаний, правительственных организаций и частных фондов, научные исследования быстро бы завяли и прекратились. Но писать заявки на гранты в организации и фонды, запрашивая 100 000 долларов в год, когда шанс получить поддержку меньше 10%, довольно мучительно.

Вот так я стоял в самом сердце «Большого яблока»** с протянутой рукой, продвигая науку в комнате, полной людей,

* Речь идет о книге: Hazen, Robert M. *Genesis: the scientific quest for life's origins*. Washington, D. C.: Joseph Henry, 2007. — *Прим. ред.*

** Прозвище Нью-Йорка. — *Прим. науч. ред.*

от науки далеких. На подобных мероприятиях есть вероятность добиться успеха, по крайней мере — стоит попробовать. Тот вечер был приятным и веселым, но вскоре я о нем забыл в суете исследовательских проектов и дедлайнов по заявкам на гранты. И тогда раздался телефонный звонок, который изменил все.

Это произошло три месяца спустя, в начале весны 2007 г., когда Вашингтон был весь в цвету.

— Привет, Боб. Это Джесси Аусубел из фонда Слоуна в Нью-Йорке.

Видимо, я познакомился с Джесси на той лекции в Century Association, но не запомнил его. По телефону он произвел на меня впечатление доброжелательного, но весьма делового человека; говорил Джесси приятным баритоном.

— Фонд Слоуна рассматривает новые программы.

Я наострил уши. Фонд Слоуна поддерживает важнейшие научные исследования и просветительскую деятельность: амбициозный проект «Перепись населения океана», цифровые космические исследования, в ходе которых была обнаружена темная энергия, программы Национального общественного радио и Государственной службы телевидения.

— Мы подумали, не заинтересует ли вас обсуждение программы о глубинном происхождении жизни?

Тема моего выступления в Нью-Йорке — очень спорная гипотеза о том, что жизнь зародилась в глубокой вулканической зоне на дне океана, — явно попала в точку.

Аусубел сообщил мне, что программы фонда Слоуна обычно длятся десять лет при финансировании от 7 до 10 млн долларов в год, затем замолчал, ожидая какой-то реакции. У меня не было слов. Единица с восемью нулями парализовала мой мозг.

Наконец я пришел в себя, и мы начали обсуждать детали. Я сказал, что фокусировка исключительно на глубинном

происхождении жизни — слишком узкий взгляд для крупного десятилетнего исследования. Ведь с углеродом в планетарном масштабе связано множество фундаментальных загадок — не только в биологии, но также и в физике, химии и геологии. Я объяснил, что мы не сможем до конца понять загадочное древнее происхождение жизни, пока не разберемся в истории углерода на Земле в целом.

Джесси Аусубелу понравилась идея всеобъемлющего подхода: физика, химия, геология и биология; 4,5 млрд лет истории Земли, от коры до ядра, от наномасштабов до глобальных. Он предложил годовой исследовательский грант в 400 000 долларов («уже предварительно одобренный», по его словам), чтобы собрать экспертов по всему миру, провести рабочие встречи, определить, что мы знаем и чего не знаем, а также рассмотреть глобальную стратегию, меняющую наше представление о земном углероде.

Это было не просто полотно. Это была невероятно величественная симфония Бетховена в небывалом исполнении, с мощным хором, многочисленными оперными солистами и огромным оркестром со множеством инструментов — от тубы до флейты-пикколо. Ничего подобного раньше даже не пытались делать.

Перенесемся на год вперед — в 15 мая 2008 г. Со всего мира съехалось более 100 экспертов¹. Выдающиеся профессора объединились с начинающими учеными из десятка стран, представляющими не меньшее количество научных дисциплин. Мы должны были понять, есть ли смысл и желание браться за изучение углерода исходя из нового целостного подхода.

Первый день нас совсем не обнадежил, поскольку ученые редко выходят далеко за пределы своей зоны комфорта. Несмотря на возвышенную риторику о том, что необходимо «покинуть свои норы» и «пересечь границы», биологи

больше общались с биологами, равно как и геофизики и химики-органики также собирались своими специализированными подгруппами.

Второй день оказался удачнее. Постепенно, по мере того как в наших оживленных разговорах начали определяться неисследованные области — загадка углерода в ядре Земли, вопрос о древних истоках жизни, цикличность движения литосферных плит, признаки огромной микробной биосферы под поверхностью Земли, — мы увидели наши узкие специализации в новом, более широком контексте. Впервые мы узнали о парадоксальных неисследованных связях вулканических взрывов с месторождениями алмазов, движения плит — с изменениями климата, а химически активных минералов — со скрытой глубинной жизнью. Очарование исследований углерода как универсальной целостной темы захватило нас.

К концу третьего дня определились рамки нового глобального проекта. Выявились лидеры, и энтузиазм возрос. Наблюдатели из фонда Слоуна почувствовали в зале энергию, увидели в наших глазах заинтересованность и быстро дали зеленый свет Обсерватории глубинного углерода^{*2}. Ей предстояло стать глобальным предприятием необычайного масштаба и огромных научных амбиций. Перспектива была волнующей, но я подозреваю, что каждый также беспокоился о том, как бы не оказаться участником зрелищного, ошеломляющего и очень дорогого провала.

Десять лет спустя результаты этой авантюры превзошли наши самые смелые ожидания. Международная армия исследователей шестого элемента — более 1000 ученых

* Обсерватория глубинного углерода (*англ.* DCO, от Deep Carbon Observatory) — международное сообщество ученых со штаб-квартирой в Геофизической лаборатории Института Карнеги в Вашингтоне (округ Колумбия). — *Прим. ред.*

из 50 стран — проникает в загадки земного углерода. С общим международным грантом около полумиллиарда долларов от десятков организаций и фондов по всему миру Обсерватория глубинного углерода представляет собой один из самых всеобъемлющих междисциплинарных исследовательских проектов в истории.

Как это бывает с любой успешной научной программой, мы многому научились, но также стали острее сознавать, сколького мы еще не знаем. Вопросы, которые не давали нам покоя и оставались без ответа, приобрели отчетливость, чтобы мотивировать будущих исследователей. Парадокс науки заключается в том, что чем больше мы знаем, тем яснее понимаем, сколько же остается непознанного, возможно, даже непостижимого. Каждое открытие отворяет дверь в новый, неисследованный мир.

Мне хочется поделиться появившимися захватывающими откровениями исследований углерода, зафиксировать сделанные открытия, а также обозначить границы того огромного пространства, которое еще предстоит исследовать. Но как? Если бы я был Джоном Фредериком Кенсеттом или Уинслоу Хомером, возможно, я бы нарисовал картину. Словами выразить тяжелее. Многотомная энциклопедия углерода вряд ли осветила бы все многочисленные нюансы этой темы. Как тогда можно отразить историю углерода на страницах одной книги? Такая возможность манила меня, но я находился в тупике. Пустая страница насмехалась надо мной, пока Джесси Аусубел не предложил мне путь решения.

— Ты должен написать симфонию! — скомандовал он³.

Джесси знал, что я музыкант симфонического оркестра, 40 лет играю на трубе, совмещая дневную работу в лаборатории с вечерними выступлениями во многих оркестрах — регулярно в Вашингтонском камерном симфоническом оркестре и оркестре Национальной галереи,

а кроме того — в Национальном симфоническом оркестре и Вашингтонской национальной опере. Я играл все симфонии Бетховена, Брамса, Шумана и Мендельсона много раз. И все же в первый момент его предложение меня озадачило. Симфония в словах, не в музыке? Четыре части... чего?

Я пребывал в неуверенности и замешательстве, но эта метафора имела смысл на нескольких уровнях. Подобно тому как в проекте Обсерватории глубинного углерода работают разные ученые — физики, химики, биологи и геологи, в симфоническом оркестре есть разные музыканты, каждый из которых имеет за плечами годы обучения и опыта. У каждого музыканта оркестра свой инструмент: скрипка или туба, флейта или малый барабан, труба или виолончель... Каждый тембр и диапазон важен, но при этом никто по отдельности не может передать величие целого. Так и с симфонией исследований углерода. Без множества голосов Обсерватории глубинного углерода Симфонию углерода никогда бы не услышали.

Эта метафора также предполагает, что из общей ткани оркестра периодически выступают прекрасные соло. Таким образом наша симфония углерода подчеркивает значение исключительных вкладов отдельных исследователей и исследовательниц, хотя и интегрирует их в общее многозвучие с более мощными темами.

Подобно любой симфонии, эта книга представляет собой индивидуальное путешествие — единственное в своем роде по содержанию, ограниченное по масштабу, изложенное с моей субъективной точки зрения и сыгранное в разных тональностях. Я основывался на работе сотен коллег, но этот рассказ об углеродной истории, по сути, мой личный. Другие Симфонии углерода ждут своего часа.

Когда я провел параллели между научным проектом и большой оркестровой композицией, мне начала нравиться идея

Симфонии углерода, хотя и было нелегко представить ее в четких рамках. Тогда меня осенило: ученые древности постулировали существование четырех элементов — Земли, Воздуха, Огня и Воды; каждая сущность обладает своим набором характеристик, каждая является неисчерпаемым компонентом Вселенной, но вместе они суть источник происхождения всей материи. Углерод единственный среди атомов Периодической таблицы обладает характеристиками всех четырех классических первооснов, которые составляют четырехчастную структуру нашей истории.

Как и в симфонии, четыре части этой книги различаются по широте охватываемой темы, тональности и темпу. «Часть I — Земля» посвящена минералам и горным породам, составляющим твердое кристаллическое основание нашей планеты. Эта часть начинается с «зари творения», имевшей место задолго до образования планеты Земля, когда атомы углерода образовывались из более мелких элементарных частиц. Затем рассказ переходит к появлению земных минералов и эволюции их богатства — чествованию растущего разнообразия и пышной красоты кристаллических углеродных соединений.

В «Части II — Воздух» рассказывается о величавом углеродном цикле Земли. Атомы углерода постоянно перемещаются между различными геохимическими резервуарами, мигрируя из океана в атмосферу и обратно, опускаясь в недра Земли при движении литосферных плит и выбрасываясь снова на поверхность с горячими газами, выделяемыми сотнями действующих вулканов. Миллионы лет этот глубинный углеродный цикл пребывал в надежном равновесии, но сейчас оно нарушается человеческой деятельностью, что может привести к нежелательным последствиям. Будучи медленной частью симфонии, эта тема взывает к более мягкому, нежному исполнению.

Динамичная роль углерода в энергетике и промышленности, а также все более активное его применение в высоких технологиях требуют острого, быстрого скерцо «Части III — Огонь». Углерод — «материальный» элемент, элемент вещей, он входит в состав повсеместно необходимых для нашей жизни материалов, обладающих множеством свойств. Истории ученых и музыкантов перемежают это скерцо подобно тому, как углерод пронизывает каждый аспект нашей жизни.

И наконец, в «Части IV — Вода» мы исследуем происхождение и эволюцию жизни. Эта часть начинается спокойно — так и жизнь появлялась из первозданного океана Земли, но неустанно ускоряется вместе с поразительным эволюционным многообразием и новшествами жизни. Симфония углерода стремится к единому финалу, в котором соединяются многие темы исследований углерода.

Занимайте свои места. Гаснет свет. Наша история начинается с самого начала — еще до углерода, даже еще до того, как Вселенная собралась возникнуть из абсолютного небытия.



До Космоса была пустота.

*Ничего — ни намек на материю, или свет, или даже
пустое пространство.*

*Ни единой мысли и открытия, ни искусства и музыки,
ни надежды или мечты.*

Темнота. Тишина.

*Мы не можем представить такое отсутствие всего,
такое абсолютное ничто.*

*Время до времени остается неизведанным,
загадочным, вне нашего перечня физических законов.*

Это было время до углерода и появления всего.



Момент творения!

Время и пространство выходят из ничего.

*Космическая сущность всего появляется за мгновение
в водовороте чистой энергии, возникающей из пустоты.*

*Наша Вселенная рождается в сильно
концентрированном виде —
невообразимо плотная, и горячая, и крошечная, но она
расширяется
быстрее света, сотворяя объем, быстро остужаясь
по мере разрастания.*

*По мере того как она охлаждается, Космос становится
более структурированным,
более знакомым, более домашним.*

ПРЕЛЮДИЯ — До образования Земли

Великая симфония углерода началась с короткой бурной прелюдии немногим позже возникновения Вселенной 13,8 млрд лет назад. Некоторое время после Большого взрыва не украшал собою Космос ни единый атом. Вселенная была слишком горячей, слишком хаотичной. Плотной разогретой смеси материи и энергии нужно было сначала расшириться и охладиться, прежде чем основные частицы могли образовать вещество звезд, планет и жизни. В безумном вихре первыми появились водород и гелий, заложив основу почти для всех известных нам материальных объектов. Но только недавно стало известно, что тогда же образовались и многие более тяжелые атомы. Среди них — необходимые для жизни углерод, азот и кислород.

Создание атомов. Углерод Большого взрыва

Ученые долгое время утверждали, что история углерода началась в звездах — вероятнее всего, через миллионы лет после Большого взрыва. Об этом писали в десятках учебников и многочисленных научных статьях. Тот факт, что мы оказались введены в заблуждение, подчеркивает важность ключевых тем изменчивого, сводящего с ума и захватывающего

мира исследований углерода. Как можно избежать таких ловушек? Да вот как: сомневаться в каждой предпосылке, проверять и перепроверять результаты и быть готовым к сюрпризам.

Задолго до первого поколения звезд единственным процессом образования атомов в истории Вселенной было уникальное мимолетное событие — 17-минутный всплеск ядерного творчества, названный нуклеосинтезом Большого взрыва, или НБВ¹. Большой взрыв — исключительное, загадочное мгновение, случившееся 13,8 млрд лет назад, когда вся материя, и энергия, и сам космос внезапно возникли в одной точке, — дал начало расширению Вселенной, продолжающемуся до сих пор. Расширение означает охлаждение, а с охлаждением пришла чередa уплотнений — физики называют это застыванием — каскадов преобразований, каждое из которых делало космос все более организованным и интересным.

Первыми из непостижимо горячего и плотного вихря сконденсировались элементарные частицы — кварки (строительные блоки атомных ядер) и лептоны (считайте, электроны). За первую секунду, когда температуры упали до невообразимых 100 трлн градусов, триплеты кварков соединились во множество протонов и нейтронов — также строительных блоков атомных ядер, причем протонов оказалось больше примерно в соотношении семь к одному. Секунды шли, Вселенная продолжала расширяться и охлаждаться.

На третьей минуте в быстро развивающейся Вселенной создались благоприятные условия для образования стабильных атомных ядер — различных комбинаций протонов и нейтронов, удерживаемых вместе ядерными силами. Впервые за всю (надо признать, короткую) историю космоса температуры значительно снизились до каких-нибудь 100 млрд градусов. Этого изменения оказалось достаточно

для того, чтобы сформировавшиеся ядра оставались целыми. Количество отдельных протонов — ядер простых атомов водорода — по-прежнему преобладало в этой субстанции, подобно тому как водород преобладает и в наши дни. Но он не остался в одиночестве. Следующие 17 минут свободные нейтроны лихорадочно соединялись со всеми протонами, попадавшимися им на пути, и формировали тяжелый изотоп водорода, называемый дейтерием. Большая часть атомов дейтерия затем попарно объединилась в наиболее распространенную разновидность (изотоп) гелия с двумя протонами и двумя нейтронами, известную как гелий-4. К тому моменту как Вселенной исполнилось приблизительно 20 минут, она охладилась достаточно, чтобы ядерный синтез двинулся дальше. Атомные соотношения стали более или менее постоянными. Самая упрощенная версия результатов НБВ во Вселенной выглядит так: около десяти водородных ядер на каждое ядро гелия-4 и немного дейтерия в остатке.

Это полезное упрощение, но история НБВ не так проста. Ядерные частицы (протоны и нейтроны) соединялись во всевозможные комбинации, формируя, помимо прочего, небольшое, но важное количество гелия-3 (два протона плюс нейтрон) и лития-7 (три протона плюс четыре нейтрона), а также более крупные нестабильные ядра, которые быстро распадались. На самом деле соотношения тех редких ядер гелия и лития, которые присутствуют в сегодняшней Вселенной, резко ограничивают варианты предположений о космической эволюции сразу же после Большого взрыва. В соответствии с основной версией космического происхождения, НБВ не произвел стабильных элементов тяжелее лития (третий элемент Периодической таблицы). То же относится и к углероду — шестому элементу.

В этом прелесть науки. «Не было углерода» в ее контексте не обязательно означает «совсем не было углерода».

Лучше сказать, «не было *значительного количества* углерода», достаточного для того, чтобы влиять на последующее поведение звезд и галактик, которые должны были образоваться. Углерода не доставало для появления кристаллов, или атмосферы, или деревьев. Но так как наше исследование посвящено именно углероду, правду об образовании шестого элемента знать необходимо. Для нас появление даже одного атома углерода имеет космическое значение.

Критический интервал между 3-й и 20-й минутами после Большого взрыва был невообразимо буйным и напряженным — бурное время неконтролируемых ядерных взаимодействий и обменов с последующим появлением новых атомов. Почти все столкновения протонов и нейтронов заканчивались синтезом дейтерия или гелия, и лишь в очень незначительной доле ядерных реакций — особенно тех, что случались между более крупными фрагментами ядер уже ближе к более прохладному концу 17-минутного интервала, — образовались комбинации посложнее, в том числе и некоторые элементы тяжелее лития.

Вычисления, опубликованные в 2007 г. итальянским астрофизиком Фабио Иокко и его коллегами, представили более 100 правдоподобных цепочек ядерных реакций, которые ранее не учитывались, поскольку считались слишком невероятными, не говоря уже об их слишком высокой стоимости с точки зрения затрат времени суперкомпьютеров². Иокко сделал такой вывод: да, эти реакции маловероятны, но не невозможны. И углерод, и азот, и кислород — шестой, седьмой и восьмой элементы — все сформировались при НБВ. Их количество было слишком мало, чтобы значительно повлиять на последующую эволюцию Вселенной, но все же они образовались. Согласно вычислениям Иокко, приблизительно на каждые 4 500 000 000 000 000 000 (четыре с половиной квинтильона) ядер водорода появлялось одно

ядро углерода-12*. Эта на первый взгляд несущественная доля была так мала, что позволила Иокко и его коллегам сделать следующий вывод: самые древние звезды развивались в свободной от металлов среде (металл для астрофизика означает любой элемент тяжелее гелия). То есть ученые опять утверждали, что Большой взрыв, по сути, углерода не произвел.

Но секундожку! В первичной, сразу после НБВ, Вселенной, по приблизительным расчетам, было как минимум 10^{80} (единица с 80 нулями) атомов водорода — сногшибательно огромное число. В то же время на каждые несколько квинтильонов атомов водорода образовался один атом углерода — крошечная доля. Однако крошечная доля *огромного* числа — это *очень большое число*. Простое деление показывает, что Большой взрыв произвел более 10^{64} атомов углерода! Это количество представляет собой лишь малую долю массы Вселенной и лишь одну триллионную часть всех атомов углерода, обнаруженных во Вселенной сегодня, но первичных атомов углерода все же было много.

Где же находятся те 10^{64} атомов углерода в наши дни? Некоторые, безусловно, участвовали в создании первых поколений звезд, в циклах реакций ядерного синтеза, в ходе которых они преобразовались в другие, более тяжелые элементы. Другие атомы углерода Большого взрыва разлетелись и рассеялись по всей нынешней Вселенной в виде космической пыли и газа. Но огромные количества тех самых первых атомов углерода остались в нашем современном мире, и их не отличить от атомов, образовавшихся гораздо позже. Ваше тело состоит из более чем 10^{24} атомов углерода — 100 трлн трлн атомов шестого элемента. Отсюда следует, что триллионы этих атомов должны быть теми самыми ядрами углерода, которые появились еще тогда,

* Изотоп с шестью протонами и шестью нейтронами. — *Прим. науч. ред.*

в родовых муках НБВ, — атомами, неотличимыми от позднейших накоплений углерода, выкованного в звездах. То же самое можно сказать и о ваших основных атомах кислорода и азота, не говоря уже о первичном водороде, — обо всех элементах, необходимых для жизни.

Поразительный вывод: бесчисленное множество атомов углерода вашего тела сформировалось не в звездах, как мы привыкли считать, а при Большом взрыве — целых 13,8 млрд лет назад, в начале времен. Известно изречение Карла Сагана: «Мы состоим из звездного пепла»^{*3}. Но благодаря углероду НБВ мы также состоим из пепла Большого взрыва.

Звездное вещество

Земля и жизнь требуют намного — в триллионы раз — больше углерода, чем могло образоваться в первичном котле Большого взрыва. Чтобы найти такие большие запасы шестого элемента, мы должны приглядеться к светящимся небесам, поскольку почти все атомы углерода были рождены глубоко в недрах звезд.

Роль звезд в истории углерода начала выявляться более века назад благодаря открытиям выдающихся женщин-исследовательниц в Гарвардском университете. Астрономия в 1880-х гг. столкнулась с новой для того времени проблемой — необходимостью обработки огромных объемов данных о природе звезд. До этого астрономы, используя лучшие на тот момент в мире телескопы, зафиксировали положение и яркость более 200 000 звезд, но данных об их физических и химических свойствах было очень мало. К последней четверти XIX столетия у астрономов появилась возможность

* Цит. по: Саган К. Космос / Пер. А. Сергеева. — М.: Альпина нон-фикшн, 2020. — *Прим. ред.*

использовать новые методы, основанные на совмещении мощных телескопов с чувствительными спектрометрами и фотокамерами. В результате на стеклянных фотопластинках знакомый небесный образ из тысячи ярких точек выглядел как мозаика звездных спектров. Подобно тому как стеклянная призма превращает сфокусированный луч белого света в радужный спектр, так и каждая звезда проявилась на этих фотографиях в виде крошечного вытянутого прямоугольника с похожей на штрихкод последовательностью вертикальных линий: каждый рисунок представлял собой радугу цветов спектра от красного до фиолетового.

Такие звездные спектры содержат много информации о звезде. Каждый химический элемент, нагретый до высокой температуры поверхности звезды (обычно от 2000 до 30 000 °C), испускает свой характерный набор ярких линий разных цветов — своего рода «отпечаток пальца» атома. Каждая линия возникает, когда электроны атома перескакивают с более высокого энергетического уровня на более низкий — совершают квантовый скачок, сопровождаемый крошечной вспышкой света определенного цвета. Четкая, близко расположенная пара оранжевых линий характеризует натрий. У водорода — одна интенсивная красная линия, одна зеленая и восемь более слабых линий в сине-фиолетовой части спектра. А у углерода — более 20 четких линий, распределенных по всему спектру. Каждый звездный спектр — это сложное наложение характерных линий десятков химических элементов.

Вооружившись новыми спектроскопическими инструментами, астрономы получили тысячи стеклянных фотопластинок, каждая — с сотней звезд, которые нужно было проанализировать. Каждый звездный спектр следовало изучить и интерпретировать визуально, на глаз. Это была напряженная, утомительная работа. Спектры накапливались намного быстрее, чем удавалось их обработать.

Благодаря новаторским исследованиям врача и астронома-любителя Генри Дрейпера, получившего первое изображение звездного спектра в 1872 г., одним из самых продуктивных центров фотографирования звезд на пластинки стала обсерватория Гарвардского колледжа. Дрейпер получил более 100 изображений со звездными спектрами на стеклянных пластинках, но умер в 1882 г., когда работа только начинала набирать обороты. Друг Дрейпера, гарвардский профессор астрономии Эдуард Чарльз Пикеринг, продолжил его дело в 1885 г. Еще через год богатая вдова исследователя Мэри Дрейпер начала спонсировать исследования Пикеринга, а также издание все расширяющегося «Каталога Генри Дрейпера».

Как и большая часть научных сфер 1880-х гг., астрономия была почти исключительно мужской прерогативой. На самом деле и позже — уже в XX в. — в большинстве обсерваторий женщинам долго не разрешалось работать вместе с мужчинами в «соблазнительное» ночное время. Мужчины занимались и анализом фотопластинок, хотя Пикеринг постоянно был недоволен их небрежной работой. «Моя шотландская служанка справилась бы лучше», — неоднократно сетовал он⁴.

К счастью для Пикеринга, его шотландской служанкой была Вильямина Флеминг, учительница, которая иммигрировала с мужем и ребенком в Соединенные Штаты из шотландского города Данди в возрасте 21 года. Вскоре после этого ее бросил муж, и она нанялась в услужение к Пикерингу. В 1881 г. исследователь предложил ей работу в обсерватории, научив 24-летнюю Флеминг читать звездные спектры. Его поступок, хотя и отнюдь не свидетельствовавший об альтруизме (ее зарплата 25 центов в час была значительно меньше, чем у мужчин), открыл женщинам дверь в эту область.

Флеминг преуспела не только в толковании спектров, она также заметила закономерности в расположении тысяч звезд.

Вильямина быстро научилась выявлять мельчайшие отличия в положении и интенсивности разных спектральных линий и предложила систему классификации, дав каждой звезде буквенное обозначение от А до Q, основанное в первую очередь на выраженности характерных спектральных линий водорода. Она также обнаружила сотни прежде неизвестных астрономических объектов, включая знаменитую туманность Конская Голова и десятки других туманностей — огромных скоплений пыли и газа, как теперь известно, насыщенных углеродсодержащими молекулами. А еще Флеминг проложила путь в Гарвардскую обсерваторию и другим женщинам (их оказалось более десяти), которых потом стали называть «гарвардскими вычислителями»⁵.

Гарвардская классификация звезд

Когда новые спектральные данные по тысячам звезд полились рекой, астрономы оказались готовыми сильно изменить наши представления о происхождении и распределении углерода во Вселенной. Первым важным шагом стало составление более подробной классификации разных типов звезд — прорыв, который совершила астроном Энни Джамп Кэннон.

Энни Кэннон родилась в 1863 г. в Довере, штат Делавэр. Ее отец Уилсон Кэннон был сенатором этого штата и кораблестроителем. Мать Мэри Джамп Кэннон любила ночное небо. Пользуясь старой потрепанной книгой по астрономии, мать с дочерью вместе определяли звезды и созвездия. Родители поддерживали Энни, когда она решила изучать науку в колледже Уэллсли; ее наставницей стала Сара Фрэнсис Уайтинг, преподаватель физики этого колледжа. В 1884 г., в возрасте 20 лет, Энни Кэннон с отличием окончила колледж со степенью по физике.

Десятилетие спустя, поработав фотографом и писателем, Кэннон вернулась в науку, присоединившись в 1896 г. к Пикерингу и «гарвардским вычислителям». Она быстро стала специалистом по распознаванию разных типов звездных спектров, придя в итоге к тому, что определяла типы звезд с поразительной скоростью — по 200 звезд в час. «Мисс Кэннон — единственный человек в мире как среди мужчин, так и женщин, который может выполнять эту работу настолько быстро», — поражался Пикеринг⁶. За свою более чем сорокалетнюю карьеру Кэннон визуально проанализировала в общей сложности 350 000 звезд, намного превзойдя по их количеству всех своих коллег, вместе взятых.

Умение Кэннон распознавать изображения позволило ей замечать закономерности, которые другие упускали. Погрузившись в звездные спектры, она накопила опыт и знания, чтобы переосмыслить систему звездной классификации. Сфокусировав внимание на ярких звездах Южного полушария, Кэннон изобрела систему, основанную на относительной интенсивности ключевых спектральных линий — параметре, который непосредственно связан с температурой поверхности звезд. Результатом ее работы стала Гарвардская спектральная классификация, подразделяющая звезды на семь главных классов, каждый из которых обозначен буквой, соответствующей звездным типам составленной ранее системы Вильямина Флеминга. В итоговом варианте последовательность звезд от самых горячих до самых холодных лишилась большинства букв из системы Флеминг, а остальные поменялись местами. В результате получился ряд O, B, A, F, G, K, M, который многие поколения студентов-астрономов запоминали по мнемонической фразе: “Oh Be A Fine Girl, Kiss Me”^{*}.

^{*} Дословно: «О, будь хорошей девочкой, поцелуй меня!» — *Прим. пер.*
На русском языке предлагается, согласно «Википедии», такая фраза: «*Один Битый/Бритый Англичанин Финики Жевал, Как Морковь*». — *Прим. ред.*

Признание за открытия пришло к Кэннон еще при ее жизни. До конца дней своих в 1941 г. она получала награды и почетные степени, становилась членом научных обществ в Европе и Северной Америке, являя собой образец для подражания нескольким поколениям женщин-ученых.

Почему Кэннон оказалась столь продуктивной и успешной? Некоторые историки отмечают влияние ее матери, научившей дочь образцовому ведению домашнего хозяйства. Другие указывают на почти полную глухоту Кэннон (возможно, возникшую вследствие кори), которая могла ограничить ее интерес к общению. Но многие женщины того времени страдали от недугов и не хуже управлялись с домашним хозяйством. Я думаю, есть более значимый фактор, объясняющий успех Кэннон: безусловно, она была умна и увлечена астрономией, но, в отличие от почти всех ее современниц, *ей выпал шанс*. Веками история науки была историей упущенных возможностей, безымянных потенциальных Эйнштейнов и Ньютонов — блестящих умов, лишенных из-за своего происхождения возможности реализовать тягу к науке. Самая большая трагедия для всех нас заключается в нескончаемой череде нереализованных стремлений, нераскрытых прорывов.

Углерод в звездах

Звездная классификация Энни Джамп Кэннон предоставила нам возможность выявления роли звезд в образовании углерода. Гарвардская спектральная классификация показывает температуру поверхности звезды — от сравнительно холодных красных звезд до супергорячих голубых. Астрономам того времени было ясно также, что спектральные линии дают информацию об относительной распространенности разных химических элементов, но они не знали, как перевести интенсивности линий в химический состав.

Влияние температуры путает все карты. Каждый атом состоит из отрицательно заряженных электронов в оболочках, окружающих положительно заряженное ядро. Электроны, перескакивающие между этими оболочками, влияют на появление характерных спектральных линий, которые и были запечатлены на фотопластинках Гарвардской обсерватории. Однако при высоких температурах звезд интенсивные столкновения атомов срывают электроны с внешних оболочек: атомы ионизируются, что ведет к снижению четкости некоторых линий спектра. Водород и гелий — первый и второй элементы Периодической таблицы — представляют собой предельные случаи. Большинство атомов водорода теряют свой единственный электрон, превращаясь в протоны. Большинство атомов гелия теряют оба электрона и становятся альфа-частицами с двумя протонами и двумя нейтронами. Раз нет электронов, то невозможны и их скачки, поэтому спектральные линии ионов водорода и гелия гораздо слабее, чем многих других элементов.

Сесилия Хелена Пейн-Гапошкина дала расшифровку сложных взаимосвязей между спектром звезд и их химическим составом в работе 1925 г., которую ее коллеги охарактеризовали как «самую блестящую кандидатскую диссертацию, когда-либо написанную по астрономии»⁷. Пейн родилась в 1900 г. в английском Уэндовере в семье с выдающимися академическими традициями. С четырехлетнего возраста ее воспитывала овдовевшая мать, которая поощряла в девочке интерес к науке. Сесилия училась в Кембриджском университете, получая стипендию Ньюэм-колледжа, и была отличницей по биологии, химии и физике. Так как в то время получить степень в Кембридже могли только мужчины, Пейн не имела возможности продолжать обучение в рамках британской системы и переехала из Англии в Гарвард, где в 1925 г. стала первой женщиной, получившей степень PhD по астрономии.

В основе успеха диссертации Пейн лежало применение положений новой для того времени теории ионизации — зависимых от температуры процессов, в ходе которых атомы в звездах теряют свои электроны. Исследовательница поняла, что, хотя относительное обилие многих важных элементов (например, кислорода, кремния и углерода) можно точно определить по интенсивности основных спектральных линий, количество водорода и гелия сильно недооценивается — для водорода, возможно, в миллион раз. Она пришла к поразительному выводу, что водород и гелий — самые распространенные элементы во Вселенной — во многих случаях составляют более 98% общей массы звезды. Этот результат показался настолько невероятным коллегам Пейн, долгое время полагавшим, что состав Земли точно соответствует составу Солнца, что ее открытия поначалу не приняли. Старшие коллеги призывали Пейн назвать выводы в ее первой публикации «сомнительными», но вскоре, когда и другие исследователи прибегли к новаторским методам, ее правота подтвердилась.

Открытия Пейн указали путь к более глубокому пониманию космического происхождения и распространенности углерода, составляющего четвертую часть всех атомов, которые не являются водородом или гелием. Но как звезды вырабатывают такое огромное количество шестого элемента?

Выгорание гелия

Большинство звезд — это гигантские сферы, насыщенные водородом. Наше Солнце как раз такой случай. Преобразование водорода в гелий — постоянно действующий процесс ядерного синтеза, называемый выгоранием водорода, — обеспечивает жизнь Солнца и его свечение, яркость которого почти не изменилась за прошедшие 4,5 млрд лет. Девяносто

процентов звезд в ночном небе вовлечены в тот же процесс: гелий вырабатывается при огромных температурах и давлениях глубоко в их недрах, где протоны (ядра водорода) сталкиваются и соединяются, образуя бóльшие ядра из меньших фрагментов и частиц. По общему мнению, Солнце за счет выгорания водорода останется стабильной звездой еще несколько миллиардов лет. Только тогда, когда водород в ядре Солнца в основном превратится в гелий, наступит новая, более бурная фаза выгорания гелия — процесса, в ходе которого вырабатывается углерод.

Английский астроном сэр Фред Хойл впервые описал реакции ядерного синтеза, в ходе которых гелий в звездах преобразуется в углерод, в 1954 г., когда преподавал в колледже Святого Иоанна Кембриджского университета⁸. Карьера Хойла была необыкновенно разносторонней. Он изучал математику в Кембридже, затем в 1940 г. в возрасте 25 лет стал работать для военных нужд в области исследования радаров. Научные изыскания Хойла привели его в Соединенные Штаты, где из исследований, связанных с Манхэттенским проектом, он впервые узнал о ядерном синтезе. Десять первых послевоенных лет Хойл опять провел в Кембридже, погрузившись в изучение ядерных процессов в звездах.

К 1950-м гг. основная концепция нуклеосинтеза, заключающаяся в том, что высокие температуры и давления в недрах звезд способствуют ядерному синтезу, в ходе которого образуются новые элементы, была уже хорошо известна. Хойл понял, что распространенность элементов в природе отражает этапы звездных процессов, в результате чего маленькие ядерные кирпичики соединяются в большие ядра. Некоторые элементы (например, железо и кислород) более распространены по сравнению с другими (например, бериллием и бором) потому, что определенные комбинации протонов и нейтронов образуются легче, чем иные. Особо

важны состояния резонанса, способствующие одновременному присоединению нейтрона, протона или альфа-частицы (ядра гелия-4 с двумя протонами и двумя нейтронами). Но большинство новых ядер формируется посредством поэтапного добавления одного из этих малых ядерных кирпичиков к уже существующим ядрам.

Углерод же отличался от всех. Расчеты того времени показывали, что нет простого пути, приводящего к его синтезу. Отсюда следовало, что этот элемент должен быть довольно редким. Но измерения его концентраций в звездах, выполненные Сесилией Пейн и ее коллегами, указывали на то, что углерод является четвертым по распространенности элементом во Вселенной. Чтобы объяснить это несоответствие, Хойл предложил детально продуманный механизм, названный тройным альфа-процессом⁹. Исследователь знал, что более старые звезды накапливают в своих недрах ядра гелия-4 (т. е. альфа-частицы). При взаимодействии двух альфа-частиц легко образуются ядра бериллия-8 — с четырьмя протонами и четырьмя нейтронами. А затем все, что нужно сделать для преобразования бериллия-8 в углерод-12, — это добавить еще одну альфа-частицу. Но есть загвоздка: бериллий-8 чрезвычайно нестабилен и распадается на части менее чем за одну квадриллионную секунды. Поэтому предположение, что углерод-12 образуется при добавлении третьей альфа-частицы к хрупкому бериллию-8, кажется невероятным.

Прорыв Хойла заключался в том, чтобы найти некое соответствие в природе. При энергии, близкой к 7,68 МэВ, ядро углерода-12 находится в особом, ранее не учтенном состоянии резонанса. Именно такое значение необходимо бериллию-8, чтобы захватить альфа-частицу, прежде чем распасться. Хойл подсчитал, что скорость синтеза углерода-12 в ходе тройного альфа-процесса возрастает приблизительно в миллиард раз. Физики-экспериментаторы восприняли эту

идею скептически, поскольку углерод считался хорошо изученным и никаких резонансных состояний не обнаруживалось. Тем не менее Хойл убедил исследователей в Калифорнийском технологическом институте поискать это «состояние Хойла», которое вскоре и было ими подтверждено. Предсказание Хойла разрешило проблему несоответствия распространенности углерода и между делом позволило ученому мгновенно получить международное признание в развивающейся области астрофизики.

Хойл обрел славу и почести, дав объяснение звездному нуклеосинтезу, но его карьера оказалась полна противоречий. Ярый критик доминировавшей в то время космологической точки зрения, он придумал выражение «Большой взрыв» скорее как уничижительный термин, но тот в конечном счете прижился. Он предпочитал концепцию устойчивой Вселенной, независимой от ветхозаветного «момента творения». Хойл также поддерживал панспермию — спорную концепцию, что жизнь на Землю была занесена из космоса. В повсеместно осмеянной версии панспермии Хойла начало жизни дали рожденные в комете вирусы, которые до сих пор иногда вызывают глобальные эпидемии. И он горячо поддерживал идею, что нефть и природный газ образуются в ходе небиологических процессов глубоко в мантии Земли. Эта противоречивая гипотеза сейчас заново рассматривается учеными Обсерватории глубинного углерода. Когда Хойла спрашивали о его склонности занимать такие противоречивые позиции, он отвечал: «Лучше быть интересным и неправым, чем скучным и правым»¹⁰.

Рассеивание углерода

Давным-давно, более 13 млрд лет назад, по прошествии нескольких миллионов лет после образования Вселенной,

в космосе, лишенном каменных планет и жизни, ярко горели первые звезды¹¹. Они появились, когда гравитация стала стягивать огромные вращающиеся облака водорода и гелия — атомов, образовавшихся при Большом взрыве, — в еще бóльшие раскаленные сферы.

Звезды — это двигатели химической эволюции. Под действием невообразимых температуры и давления в звездных недрах водород «слипался» в гелий, а три ядра гелия — в углерод. Конечно, это медленный процесс, но у звезд много времени. И таким образом углерод постепенно накапливался, чтобы в конечном итоге стать четвертым по распространенности элементом во Вселенной — на каждую тысячу атомов водорода приходится порядка пяти атомов углерода.

Первые несколько миллионов лет космической истории бóльшая часть этих все пополняющихся запасов звездного углерода оставалась запертой глубоко в недрах звезд. Некоторые его ядра стали ядерным топливом, соединяясь с ядрами гелия и образуя еще более тяжелые элементы: кислород — податель жизни, кремний — строительный материал для каменных планет; железо — основа индустриального развития. Спустя миллионы лет, когда турбулентные потоки звездной конвекции вынесли эти глубинные продукты нуклеогенеза на светящуюся поверхность каждой из звезд, некоторые атомы углерода были унесены мощными звездными ветрами, выталкивающими атомы углерода вовне, в межзвездное пространство, при взаимодействии с сильными магнитными полями звезд. Эти-то образовавшиеся в недрах звезд атомы, которые улетели в космическое пространство, и дали начало настоящей углеродизации космоса.

Самое обильное «засеивание» космоса углеродом происходит, когда умирают массивные звезды; происходящие при этом бурные процессы высвобождают огромное количество вещества¹². При взрывах сверхновых огромные звезды

буквально рассыпаются в пространстве. Но как звезда может взорваться? Ответ на этот вопрос нужно искать в непрерывном противостоянии огромной силы тяготения, которая тянет звездную массу внутрь, и мощностью ядерного синтеза, выталкивающего эту массу наружу.

Давайте подумаем о будущем нашего Солнца, в котором через 4 млрд лет или около того весь водород превратится в гелий. Постепенно водород в раскаленном ядре Солнца полностью израсходуется, а концентрация гелия возрастет. Тогда начнется выгорание гелия. Возможно, на полмиллиарда лет ядерные силы, вызванные выгоранием гелия в недрах Солнца, возьмут верх над силой тяготения. Эти изменения приведут к не очень приятным последствиям для землян. Солнце раздуется более чем в 100 раз по сравнению со своим нынешним размером, превратившись в красный гигант, который разрастется дальше орбиты несчастного, поглощенного Солнцем Меркурия, за орбиту обреченной Венеры и, наконец, подойдет достаточно близко к орбите Земли, заполнив собой дневное небо. Когда ярко-красная поверхность Солнца приблизится к Земле, наш общий дом сгорит и превратится в безжизненную золу.

Учитывая скромные размеры Солнца, углерод окажется конечным продуктом ядерных процессов. Когда запасы гелия иссякнут и ядерные реакции прекратятся, гравитация все-таки выиграет 10 000 000 000-летнюю войну. Солнце сожмется, превратившись в белый карлик — насыщенную углеродом звезду размером с Землю, с диаметром менее сотой доли нынешнего. В процессе медленного охлаждения и сжатия звезды большая часть запасов только что образовавшегося углерода будет заблокирована в ней навсегда, «подобно бриллианту в небе»*.

* Возможно, это аллюзия на хит Рианны 2012 г. “Diamonds”, рефреном которого идет строчка “We’re like diamonds in the sky”. — *Прим. ред.*

У звезд крупнее Солнца судьба иная, поскольку их внутреннего давления и температуры достаточно, чтобы часть ядер углерода-12, соединившись с альфа-частицами, образовала более тяжелые элементы — кислород-16, неон-20, магний-24 и другие. При этом происходит каскад ядерных реакций, и каждое преобразование добавляет звезде энергии, обогащает ее новыми химическими элементами и противостоит непреклонной силе тяготения. Реакции происходят одна за другой все быстрее и быстрее, пока звезда не примется за образование железа-56. Последние стадии синтеза происходят за секунды. У всех элементов в цепочке, заканчивающейся железом, каждое новое ядро стабильнее предыдущего, а каждая ядерная реакция высвобождает энергию и поддерживает горение звезды, как будто подбрасывая дров в ревущий огонь. Но железо-56 — это конечный ядерный пепел. Что бы вы ни пытались сделать с ядром железа-56 — добавить или забрать протон, добавить или забрать нейтрон, — любая реакция с этим элементом потребует энергии. Когда ядро звезды превращается в железо, направленный во вне напор ядерных реакций прекращается почти мгновенно и гравитация так же быстро берет над ним верх.

Главное последствие этого звездного «выключения» — разрушительный взрыв, в котором участвует вся звездная масса. Весь оставшийся водород, гелий, углерод и остальные элементы затягиваются внутрь со всевозрастающей скоростью, достигающей существенных долей скорости света, пока не взорвутся. В этих хаотических условиях, когда температура и давление вырастают до значений, невиданных со времен Большого взрыва, атомные ядра интенсивно сталкиваются и сливаются, их протоны и нейтроны буквально перемешиваются, образуя все более тяжелые комбинации. Так в конечном счете возникает более половины элементов Периодической таблицы. То, что мы наблюдаем как взрыв

сверхновой, на самом деле представляет собой разрушительный распад всей этой звездной массы — беспорядочной смеси множества новых элементов, разлетающихся в пространстве.

Остальные химические новинки, к которым относится бо́льшая часть тяжелых элементов Периодической таблицы, появляются как удивительные отголоски взрывов сверхновых. В процессах, которые только сейчас становятся понятными, гравитация захватывает часть остатков каждой сверхновой и образует из них странные плотные звездоподобные объекты. Если эти остатки тяжелее нашего Солнца примерно раза в три, то образуется черная дыра — объект настолько массивный, что он сжимается в точку, откуда ничего, даже свет, не может вырваться.

Если остатки сверхновой составляют одну-две массы Солнца, итоговый гравитационный коллапс порождает другой объект — нейтронную звезду, в которой протоны и электроны сталкиваются друг с другом, формируя сверхплотное скопление нейтронов. Нейтронная звезда, вдвое превышающая по массе наше Солнце, сжимается в объект диаметром всего несколько километров. Принимая во внимание широкое рассеивание атомных частиц после единичного взрыва сверхновой, вполне можно ожидать образования двух нейтронных звезд. Получившаяся в результате нестабильная конфигурация двойной звезды в конечном счете приводит к еще одной космической катастрофе — событию, когда сталкиваются две нейтронные звезды. Это событие называется «килоновая». Итоговое слияние ядерных частиц происходит с такой интенсивностью, что из этого хаоса возникает почти вся Периодическая таблица элементов.

Последствия ошеломительны. В итоге таких космических катастроф появляются основные химические элементы тяжелее железа — драгоценные золото и платина,

практичные медь и цинк, ядовитые мышьяк и ртуть, высокотехнологичные висмут и гадолиний. Каждый атом этих элементов, обнаруженный здесь, на Земле, прибыл сюда после распада массивных звезд. Вольфрамовые абразивы, молибденовые сплавы, германиевые полупроводники, самариевые магниты, циркониевые ювелирные камни, никель-кадмиевые батарейки, стронциевые люминофоры — все это есть у нас благодаря взорвавшимся древним звездам.

Только после того, как первое поколение сверхновых засеяло Вселенную полным набором химических элементов, и смогли возникнуть каменные планеты (планеты земной группы), а также новое поколение звезд, вырабатывающих углерод. Многие из этих звезд взорвались, создав еще больше углерода и других тяжелых элементов для новых планет и будущих поколений звезд, сильнее обогащенных металлами. Этот нескончаемый бурный цикл создания и рассеивания элементов продолжается во Вселенной по сей день.

Наша Солнечная система сформировалась в результате множества предшествующих звездных циклов, растянувшихся по времени более чем на 13 млрд лет, поэтому она обогащена углеродом — в его кристаллической форме.

ВСТУПЛЕНИЕ — Земля появляется и эволюционирует

Атомы смешиваются, создавая кристаллы необычайной красоты и разнообразия. Земная кора, мантия и ядро Земли содержат углеродистые соединения в огромных количествах: алмаз, графит и более 400 других кристаллических углеродсодержащих минералов составляют главные запасы углерода в Земле. Эти многочисленные минеральные разновидности рассказывают живую историю широкомасштабной 4 500 000 000-летней эволюции Земли, а их современные синтетические аналоги проявляют удивительное разнообразие и играют важную роль в сегодняшнем высокотехнологичном мире.

Первые кристаллы в космосе

Углерод чрезвычайно общителен. Атомы углерода рождаются по одному, но не могут выносить одиночества. Они используют любую возможность, чтобы соединиться с четырьмя другими атомами. Поэтому химия углерода, основанная на этом отчаянном желании углерода соединяться, должно быть, началась очень рано, чуть ли не на заре творения. Окруженные водородом, первичные атомы углерода быстро обзавелись четырьмя компаньонами и стали

молекулами CH_4 — метана, основного компонента природного газа.

Химия углерода стала гораздо интереснее, когда звезды начали взрываться, рассеивая в небесах новые химические элементы. Важным новым элементом стал кислород — химически активный атом, который вступал в прочные соединения с углеродом. На сцене быстро появились молекулы угарного (CO) и углекислого (CO_2) газов. Другие атомы этого элемента соединились с многочисленными атомами азота и водорода в смертельную синильную кислоту (HCN) или с также повсеместно распространенными серой и фосфором — в десятки разнообразных молекул.

Из всех этих небольших первичных молекул образовались газы, которые объединились с водородом и гелием в большие облакоподобные туманности — колыбели звезд¹³. Углерод также не упустил возможности соединять между собой свои же атомы, и в результате возникли структуры типа цепочек, колец и решеток — молекулярных образований со все большей геометрической сложностью. И время от времени в наиболее насыщенных углеродом завихрениях расширяющейся газобразной оболочки звезд каждый атом углерода объединялся с еще четырьмя такими же в растущий объект правильной формы. В результате появился крошечный кристалл алмаза.

Алмаз — это углерод, застывший в кристаллическом совершенстве. Как можно не любить этот драгоценный камень? Сплошные превосходные степени: самый твердый, обладающий самой высокой теплопроводностью, самый сверкающий и прочный на срез, самый ценный. Столетиями алмаз будоражил воображение как обычных потребителей, так и ученых — в равной степени. Крупные без примесей кристаллы — не просто редкие и красивые драгоценности, желанные символы любви и власти. Алмазы являются и научными сокровищами. Они позволяют заглянуть в загадочные недра

планеты и хранят данные о ее интригующем прошлом. Алмазы буквально представляют собой временные капсулы скрытого сердца Земли, а если заглянуть вглубь времен, то окажется, что они были самыми первыми кристаллами в космосе¹⁴.

Вот как это произошло. При высоких температурах на поверхности звезды, насыщенной углеродом, колебания атомов были слишком сильны и неуправляемы, чтобы какая-либо пара атомов углерода смогла образовать прочную химическую связь. Условия меняются, когда такая звезда взрывается, высвобождая огромное расширяющееся облако атомов в газообразной форме. Когда температура внутри этой расширяющейся газовой оболочки падает ниже 4400 °С, жаждущие компаньонов атомы углерода замедляются в достаточной степени, чтобы соединиться с четырьмя другими в крошечные пирамидки, размером менее миллиардной доли сантиметра. Каждый атом этой пирамидки тоже нуждается в четырех соседях, так что ко всем вершинам добавляется еще по три недостающих атома углерода. Это повторяется снова и снова в правильной геометрической последовательности. Так растет кристалл алмаза.

Именно таким образом в течение миллиардов лет в космосе формировались бесчисленные микрокристаллы алмаза. Они образовались задолго до каменных планет и продолжают возникать по сей день в окрестностях наиболее активных звезд во Вселенной, кристаллизуясь на нечеткой границе между раскаленной поверхностью звезды и холодным вакуумом космоса.

О замечательном разнообразии углеродных минералов Земли

Хотя микроскопическая алмазная пыль в космосе распространена повсеместно, алмаз не является здесь преобладающей

формой углерода. При экстремальных температурах вблизи звезд (свыше 4400°C) алмаз кристаллизировался первым, потому что этот минерал — единственная твердая субстанция, способная конденсироваться и расти в таких условиях. Все остальные кристаллы в окрестностях раскаленных добела объектов плавятся или испаряются. Но при более низких температурах и давлениях берет верх другая, более прозаическая кристаллическая форма углерода. В алмазе атомы слишком плотно упакованы, слишком скучены, и поэтому им «неудобно». Микроалмазы достаточно легко образуются из остывающего газа звезды, но, когда температура опускается ниже 4000°C , вместо них возникает графит — знакомый всем мягкий черный минерал грифельных карандашей и сухих смазок.

Графит и алмаз — это пример противоположностей¹⁵. Алмаз твердый и «выносливый» благодаря трехмерному, напоминающему балочную ферму, атомному каркасу. В элегантной структуре графита каждый атом углерода соединяется с тремя, а не четырьмя соседями, образуя миниатюрный плоский треугольник. Такая менее плотная атомная упаковка представляет собой слоистую структуру с идеально плоскими углеродными пластинками, наложенными друг на друга, как листы бумаги в стопке. Эти неплотно связанные чешуйки атомов углерода легко переходят с вашего карандаша на бумагу и скользят друг по другу, смазывая ваши замки и подшипники. Мягкий черный графит не годится в драгоценные камни, но его значение для жизни общества ничуть не меньше, чем у алмаза.

Алмаз был первым, а графит, как мы подозреваем, вторым кристаллическим веществом в космосе. Несмотря на их контрастные свойства оба минерала представляют собой чистый углерод, и оба изначально образовались из того, что осталось после звездной бури. Но настоящий взрывной рост новых

углеродсодержащих кристаллических форм начался лишь после появления каменистых планет — двигателей многообразия минералов углерода.

Образование планет — давний бурный процесс. Огромные туманности — колыбели звезд и планет — это разреженные облака космической пыли и газа размером в несколько световых лет. Потревоженная гравитационным следом проходящей шальной звезды или ударной волной сверхновой, небольшая область туманности может начать сжиматься. При этом гравитация будет затягивать вращающуюся массу внутрь, и та станет вращаться все быстрее, подобно кружащемуся фигуристу. Большая часть массы провалится в центр и образует звезду типа Солнца, остатки же сконцентрируются в несколько вращающихся планет. В нашей Солнечной системе молодое Солнце поддерживало сильный горячий солнечный ветер, который смел большую часть оставшейся пыли и газа в далекое царство газовых гигантов — до орбиты Юпитера и дальше. Каменные обломки образовали планеты земной группы: Меркурий, Венеру, Землю и Марс.

Планеты начинаются с малого — со сферических скоплений космической пыли, микроскопические частицы которой свободно удерживаются между собой статической связью. Выбросы солнечной энергии или вспышки молний в туманностях сплавляли эти комочки в маленькие капельки не больше дроби — их называют «хондры». Хондры слипались во все большие массы: размером с баскетбольный мяч, потом — аэростат, затем — небольшую гору¹⁶. Гравитация собирала бесчисленные летящие по орбите камни в еще более крупные планетезимали, которые сливались друг с другом благодаря участвовавшим мощным столкновениям. Осколки, представляющие эти ранние этапы сборки Солнечной системы, продолжают падать на Землю в виде метеоритов-хондритов. Это самые старые объекты, которые

вам дано подержать в руках. Они не так уж редки, их можно купить на eBay за несколько долларов.

Когда планетезимали увеличились до 160 км в диаметре и более, их внутреннее тепло расплавило, очистило и разделило первичное вещество. Плотные металлы вроде железа и никеля погрузились в недра и образовали планетезимальные ядра. Менее плотные скопления блестящих кристаллов оливина и пироксена окутали растущие миры мантией. Горячая вода, циркулирующая по разломам и трещинам, изменила каменную смесь, а разрушительные удары огромных небесных тел привели к образованию новых плотных минералов — импактных. Ближе к концу этого процесса несколько больших протопланет — среди них и Земля — стали доминировать в зарождающейся Солнечной системе, захватывая большую часть оставшихся каменных обломков подобно огромным пылесосам. Последнее крупное столкновение между Землей и ее меньшей сестрой, протопланетой Тейя, привело к полному уничтожению Тейи и формированию Луны.

Создав в небе коалицию с Луной, разогретая поврежденная Земля быстро «залечила рану» и остыла, превратившись в тело из трех оболочек: тонкой хрупкой коры, мощной мантии и недостижимого металлического ядра. Циркулирующие в глубинах перегретая вода и пар растворяли и концентрировали химические элементы и переносили их к более холодной поверхности молодой планеты, где те образовывали всё новые и новые минеральные формы, среди которых было и множество минералов углерода.

Первичная Земля, испещренная ударами небесных тел, в составе которых были и алмаз, и графит, только начинала собственные эксперименты с шестым элементом. Постепенно, по мере развития нашей планеты, на ней эволюционировала и удивительная минералогия углерода — сотни

кристаллических форм, каждая из которых отличалась неповторимым сочетанием химического состава и кристаллической структуры и включала в себя разнообразные соединения углерода с другими химическими элементами. Каждый из этих изумительно разных минералов и поныне является свидетельством нашего динамичного, эволюционирующего мира.

Сейчас углеродсодержащие минералы находят повсюду¹⁷: от величественных известняковых пиков канадских Скалистых гор до обширных коралловых плато Большого Барьерного рифа, от Белых утесов Дувра до неисчислимых скоплений крошечных раковин на океаническом дне — минералы всех этих объектов хранят в себе гигантские запасы шестого элемента в земной коре. Углерод содержат в своем составе более 400 известных минеральных видов. Но это не всё — результаты недавних исследований указывают на то, что нас ожидает много находок, которые только предстоит описать: более 150 новых, неизвестных еще видов углеродсодержащих кристаллов спрятались от нас замурованными в обнажениях горных пород, выстилающих перегретые жерла вулканов, вырастающих по берегам испаряющихся озер и захламляющих своими обломками заброшенные шахты. Эти редкие кристаллические формы ждут открытия.

Исключительное разнообразие минералов углерода поражает. Их цвета охватывают весь спектр радуги — пламенно-красный, ярко-оранжевый, насыщенно-желтый, изумляюще-зеленый, ошеломительно-синий и глубоко-фиолетовый. Они бывают любых тонов и оттенков: белых, серых, желто-коричневых и черных, некоторые минералы абсолютно прозрачные, другие — полупрозрачные или матовые. Их блеску*

* Блеск — это важный диагностический признак минерала наряду с твердостью, спайностью и другими физическими характеристиками. — *Прим. ред.*

тоже присуще разнообразие — и металлический, и матовый, и алмазный, и жирный, и восковой, и молочный (перламутровый). То же можно сказать и о формах минералов углерода: среди них изящные кристаллы в виде ограниченных кубов и октаэдров, постепенно сужающиеся к концам игольчатые сростки и пластинчатые агрегаты, бесформенные наросты, шероховатые корки, приятные округлые образования и ступенчатые массы неправильной формы — любого размера, от микроскопического до гигантского, больше надувного мяча.

В подвижной земной коре большинство атомов углерода связываются с тремя атомами кислорода, образуя таким образом крошечный плоский треугольник — четырехатомный кластер, известный как карбонатная группа. Из этих атомных строительных блоков состоят разнообразные карбонатные минералы, присутствующие в хорошо знакомых нам крепких раковинах улиток и двустворок, пищевых добавках с кальцием, мраморных столешницах и ярко-розовых украшениях из родохрозита.

Карбонатные минералы, особенно осадочные слои известняка и доломита, представляют собой самое большое хранилище углерода в земной коре — около 100 млн млрд т шестого элемента¹⁸. Это более чем в тысячу раз превышает запасы углерода во всех других резервуарах земной коры, вместе взятых: в угле и нефти, в океанах и атмосфере, в растениях и животных.

Практически невозможно представить себе современное общество без этих разнообразнейших углеродсодержащих минералов и множества их синтетических аналогов. Они играют важнейшую роль в плавке железа, ковке стали, удобрении полей, производстве стекла и цемента. Они помогают в производстве столь разных продуктов, как стиральные порошки, фейерверки, керамика, фармацевтические препараты,

хирургические инструменты, взрывчатые вещества, украшения и пекарный порошок. Они уменьшают кислотность водопроводной воды и удаляют загрязняющие примеси на электростанциях. Они служат абразивами для самых эффективных режущих инструментов и смазкой для самых требовательных устройств. Более того, пышное разнообразие природных углеродсодержащих кристаллов намекает на возможность разработки синтетических материалов с еще бóльшим потенциалом — с техническими свойствами, соответствующими нашим чаяниям, нуждам и желаниям.

Исследование пестроты этих минералов — их многочисленных форм и незримого происхождения — позволяет многое узнать о самом углероде и о том, как этот жизненно важный элемент перемещается и хранится в оболочках нашей планеты. Мы начали каталогизировать это богатство, погружаться все глубже и глубже в недра Земли, даже предсказывать, что может оказаться упущенным при этой нашей все еще неполной инвентаризации. Минералогия углерода — тема со многими вариациями, охватывающая века исследований и открытий.

Чтобы понять ее историю, мы должны вернуться на два столетия назад в Шотландию — в ту эпоху, когда углеродсодержащие минералы были предметом, казалось бы, неразрешимого геологического противоречия.

Карбонатные минералы проливают свет на историю Земли

Человеческому обществу необходим известняк — шероховатая, серая, богатая углеродом горная порода, которая образует величественные утесы и зубчатые горы по всему земному шару. Его обильные древние отложения накапливались постепенно, слой за слоем, иногда как скопления кораллов

и раковин, иногда осаждаясь химическим путем из морских и озерных вод, богатых кальцием. Каждый год продаются миллиарды тонн дробленого известняка — он используется в качестве прочной основы для автомобильных трасс, железных дорог, зданий и мостов. Это природный ресурс, ежегодные продажи которого превышают продажи алмазов, серебра или золота. Возможно, и вы покупали его, в более скромных количествах, чтобы благоустроить свои террасы или подреставрировать садовые дорожки.

Из блоков известняка и его более плотного кристаллического собрата — мрамора (известняка, перекристаллизованного глубоко под землей под действием высоких давления и температуры) — создают внушительные здания и монументы, к примеру пирамиды Гизы в Египте или мемориал Линкольна в Вашингтоне, округ Колумбия. Причудливые разновидности известняка, часто насыщенные окаменелыми раковинами, используют главным образом как блочный камень для облицовки зданий, напольных покрытий и кухонных столешниц. Вероятно, вам доводилось применять известковый порошок в своем саду или на лужайке для уменьшения кислотности почвы, и, наверное, вы употребляли кальций в качестве пищевой добавки. Фермеры, выращивающие кур, для их питания также используют известковые добавки, которые укрепляют яичную скорлупу, вследствие чего яйца меньше бьются при транспортировке.

Использование карбонатных минералов лежит в основе различных промышленных технологий, самая главная из которых — производство извести (на химическом языке это оксид кальция), которая получается путем нагрева известняка в обжиговой печи приблизительно до 980 °C. Известь (не путайте с известковым порошком, которым вы посыпаете лужайку) невероятно полезна. Это главный компонент известкового раствора, штукатурки и цемента, который образует

твердый и прочный состав, когда его смешивают с водой. Известь обеспечивает белый цвет побелки. И тысячи лет она была основной добавкой при выплавке железа и других металлов, представляя собой флюс, который химическим путем отделяет от них примеси. Во всех промышленно развитых странах загородные пространства пронизаны древними печами для обжига извести, многие из которых сотни лет назад были попросту малыми семейными предприятиями.

Производство извести из известняка — процесс, знакомый любому геологу XVIII в., — сыграло любопытную роль в истории науки. В прямом смысле известняк угрожал отодвинуть науки о Земле на десятилетия назад.

В середине того века среди европейских ученых разгорелся спор об относительной геологической важности воды (восхваляемой так называемыми нептунистами) и тепла (любимого механизма так называемых плутонистов) в образовании горных пород¹⁹. Нептунисты, некоторые с явной склонностью к библейскому креационизму, считали главным фактором геологических изменений Всемирный потоп — катастрофическое глобальное событие, укладывающееся в рамки насчитывающей 10 000 лет библейской хронологии. Плутонисты же в качестве не менее важного, чем вода, фактора геологических изменений рассматривали вулканическое тепло, которому, однако, требовалось гораздо больше времени, чтобы создать современный ландшафт.

Семена спора были посеяны в континентальной Европе, где геологи, изучающие водные отложения, вполне естественно отдавали приоритет воде, а те, кто изучал вулканическую лаву, — огню. Это противоречие даже отражено в диалоге 4-го акта знаменитой трагедии Гёте «Фауст», где точку зрения плутонистов неубедительно отстаивал сам дьявол. К концу столетия центр научных дебатов — так же,

как и их возможного разрешения, — сместился в просвещенный город Эдинбург в Шотландии, где проводил свои поистине революционные полевые исследования Джеймс Геттон²⁰.

Геттон родился в Эдинбурге в 1726 г. Он был одним из пятерых детей Сары Балфур и Уильяма Геттона, богатого торговца, который умер, когда Джеймсу было всего три года. Мать мальчика подчеркивала важность образования, и юный Джеймс это хорошо усвоил, проявив особые способности в математике и химии — предметах, которые помогали ему всю жизнь. Углубленно изучив латынь, философию и медицину в университетах Эдинбурга, Парижа и Лейдена, Геттон отправился в Лондон в надежде заняться прибыльной медицинской практикой. Не сумев обеспечить себя достаточным количеством пациентов, молодой исследователь вернулся в Эдинбург и занялся насущными тамошними делами. Ранее Геттон разработал новый химический процесс извлечения хлорида аммония, широко используемого как удобрение, из сажи и золы, которую «производили» многочисленные печи и фабрики города. Он поставил свой новый метод на промышленную основу, управляя прибыльной химической фабрикой в Эдинбурге.

Обезопасив себя финансово на будущее, Геттон посвятил время новому увлечению — сельскохозяйственной химии. Он унаследовал две семейные фермы и проводил там эксперименты по повышению урожайности. В ходе работы с разными горными породами и почвами Геттон начал задумываться о геологии.

Горные породы Шотландии по своим характеристикам весьма разнообразны. Это осадочные и вулканические породы, некоторые — крепкие и залегают горизонтально, как будто бы они здесь и образовались, другие — разрушенные и деформированные. К тому же всего на расстоянии

дня пути от того места, где жил Джеймс Геттон, находились участки метаморфических пород, ледниковые отложения и выходы изверженных пород. Особый интерес представляли морские утесы Сиккар-Пойнт рядом с Джедборо, где Геттон изучал поразительное наложение пластов. Там в обнаженных под действием эрозии ветра и волн скалах он наблюдал, как слегка наклоненные пласты более молодого красного песчаника и галечника перекрывали залегающие ниже круто наклоненные слои более древнего темного песчаника. Граница между этими двумя толщами была настолько четкая, будто нижний ряд почти вертикальных слоев срезали до того, как на них наложился горизонтальный. Как могло возникнуть такое различие в геометрии?

Геттон понимал, что каждый аспект строения утесов Сиккар-Пойнт, как и каждый аспект всей шотландской геологии, можно объяснить просто результатом медленных естественных процессов, происходящих везде и всегда. С одной стороны, постоянно образуются новые осадки, они медленно накапливаются в виде пластов, которые постепенно погружаются, нагреваются, сжимаются и превращаются в камень: эти процессы добавляют новые страницы в каменную летопись. С другой стороны, более древние породы постепенно деформируются, поднимаются вверх и разрушаются, что приводит к удалению пластов. Сиккар-Пойнт показывает все эти процессы одной картинкой: более старые отложения сначала лежали плоскими слоями, но затем были захоронены и превратились в камень. Глубинные силы спрессовали эти слои, смяв их в узкие вертикальные складки. Подъем разрушил верхнюю часть древней толщи. Другой цикл погружения и осадконакопления сформировал более молодые, горизонтально залегающие красные песчаники, после чего следующий эпизод подъема обнажил уже красные слои для эрозии.

В объяснении Геттона не было ничего особенно экзотического или нового, кроме одного — «глубокого времени». Остальные ученые рассматривали историю Земли в рамках нескольких тысячелетий. Геттон же говорил о сотнях миллионов, даже миллиардах лет единообразного постепенного изменения. Он не видел в скалах Шотландии «ни следа начала, ни перспективы конца»²¹. Двухтомник Геттона 1795 г. «Теория Земли», хотя и написанный в напыщенном стиле, что, возможно, ослабило его первоначальное воздействие, провозвестил смену научной парадигмы.

В своих поисках Геттон находился под сильным влиянием духа эмпиризма, характерного для кипучего шотландского Просвещения. Он постоянно общался с десятками интеллектуалов — как в Эдинбургском королевском обществе, так и в местных клубах, которые посещали, в частности, поэт Роберт Бёрнс, экономист Адам Смит и философ Дэвид Юм. Но настоящим героем этой истории стал шотландский геолог и геофизик Джеймс Холл, подтвердивший гипотезу Геттона экспериментально²².

Джеймс Холл и великое известняковое противоречие

Подобно многим современным ему ученым, Джеймс Холл родился в богатой аристократической семье. Состояние и иные сословные преимущества обеспечили ему прекрасное образование в знаменитых Кембриджском и Эдинбургском университетах, где он изучал геологию, химию и естественную историю. Холл много путешествовал по Европе, приобретая научные книги для своей библиотеки и общаясь с французским исследователем Антуаном Лавуазье, одним из основателей современной химии. Биографы редко упускают возможность привести полный титул Холла — сэр Джеймс Холл из Дангласса, 4-й баронет, хотя он знаменит

скорее своими научными открытиями, нежели аристократическим происхождением или титулом.

Вернувшись по окончании путешествий в Эдинбург, Холл узнал о революционных идеях своего друга Джеймса Геттона из первых рук. «Теория Земли» основывалась на разнообразных геологических явлениях, среди которых было взаимодействие расплавленной лавы со слоями осадочных отложений — сценарий, требующий совмещения как процессов, отстаиваемых нептунистами, так и процессов, защищаемых плутонистами. Геттон понял, что при извержении вулканов расплавленная порода просачивается вверх сквозь более древние отложения, в то время как языки магмы проникают между глубоко залегающими пластами. Такие интрузивные события прекрасно видны кое-где в Шотландии, особенно в Троне Артура в эдинбургском парке Холируд. Это подвергшийся ледниковой эрозии холм, описанный в учебниках в качестве примера подобных взаимодействий (я не говорю уже о прекрасном виде, который в западном направлении открывается на город с этого холма).

Испытанием для теории Геттона стало обнаружение тех участков, где похожие расплавленные породы проникли в известняк. Как же он мог выдержать температуру расплавленной лавы — спрашивали исследователя оппоненты-нептунисты? Все знают, что сильно нагретый известняк должен превратиться в известь, ведь так происходит в печи для обжига. Следовательно, базальт, гранит и другие предположительно изверженные породы не могут быть горячими; вероятно, они образовались путем осаждения из воды примерно в то же самое время, что и известняк. Некоторым колеблющимся ученым эта нестыковка казалась неопровергаемым, фатальным ударом по теории Геттона. Однако сам он возражал, что известняк, который подвергается при погружении высокому локализованному давлению, должен

оставаться неизменным даже при высокой температуре. Но как можно было проверить эти предположения лабораторным путем?

Несмотря на свое скептическое отношение к плутонизму, Холл нашел впечатляющее экспериментальное разрешение этого конфликта. Проверив гипотезу своего друга с помощью ряда необыкновенно оригинальных экспериментов, Холл стал пионером исследований глубинного углерода. Он откровенно признавался в одной из публикаций: «После трех лет почти ежедневной войны с доктором Геттоном по поводу его теории идеи доктора начали мне казаться все менее и менее противоречивыми»²³. В серии экспериментов Холл нагревал до высоких температур базальт и гранит, чтобы посмотреть, как они себя поведут. Рассыпятся ли, подобно известняку, и тогда будет опровергнуто их вулканическое происхождение? Как и прогнозировал Геттон, породы сначала расплавились в раскаленную докрасна лаву, а затем остыли до исходного состояния, что является основным свойством любой породы предположительно вулканического происхождения.

В последующих опытах в 1798 г., через год после смерти Геттона, Холл серьезно усовершенствовал свой эксперимент — применил к нагретым образцам давление. Для этого он забил отпиленные ружейные стволы известняком и глиной, заварил их и поместил в горячую печь. Расширение газов, высвобожденных теплом, создало высокие внутренние давления — гораздо, гораздо выше тех, что на поверхности Земли. Многие эксперименты Холла не удались из-за того, что сварной шов был негерметичным или металл расплющивался, а один опыт, в котором реагенты оказались недостаточно высушены, закончился катастрофическим взрывом. «Печь разорвало на части, — писал Холл. — Доктор Кеннеди, который присутствовал при этом... едва остался жив»²⁴.

Но некоторые из заваренных Холлом стволов с известняком выдержали всё, и он доказал, что известняк под давлением может нагреваться до высоких температур, даже выше точки плавления, не распадаясь с образованием извести. Холл представил свой инновационный труд «Отчет о серии экспериментов, показывающих, как эффекты сжатия изменяют действие тепла» на собрании Эдинбургского королевского общества (президентом которого он станет семь лет спустя) в 1805 г. Джеймс Холл не только подтвердил идеи Геттона, но и положил начало эпохе исследований высокого давления — направления, которое процветает по сей день, проливая свет на глубинный углеродный цикл Земли.

Редчайшие минералы Земли

Известняки, состоящие из весьма распространенной минеральной разновидности карбоната кальция — кальцита, — это крупнейшее хранилище углерода в земной коре. Но кальцит лишь один из нескольких сотен зарегистрированных углеродсодержащих минералов. Если мы действительно желаем разобраться с земным углеродом, нам нужно переместить фокус внимания с обычных минералов вроде кальцита на более экзотические минеральные виды, каждый из которых обладает уникальным сочетанием химического состава и кристаллической структуры. Мы должны приглядеться к некоторым самым редким кристаллам на Земле.

Если вы хотите узнать секреты природы, вам потребуется максимально овладеть информацией. Каждому ученому знакомы периоды одержимости, когда целыми днями раздумываешь над графиками и разбираешься в таблицах, заполняя ум страницами подробностей. Это своего рода временное безумие — размышлять над анализами, пока ешь, пока приговариваешься, что беседуешь с коллегами и родственниками;

засыпать, думая о числах, и просыпаться, думая о числах. Если вам повезет, если вам откроются скрытые закономерности, если ваш мозг установит правильные взаимосвязи, тогда вы сможете увидеть что-то новое — что-то, чего никто раньше не видел.

Признаюсь, я знавал такие времена. Летом 2015 г. я был поглощен осмыслением особенностей всех известных минеральных видов, которых более 5000. Я погрузился в их сложную химию и замысловатые кристаллические структуры, их свойства и способы образования, разнообразие проявлений и минеральные ассоциации. На много дней я изолировался от насущных забот. Коллеги сердились за оставшиеся неотвеченными письма. Семья все больше отдалялась от меня в ответ на мою невнимательность, мою глухоту.

Пять тысяч видов — это много, но их вполне возможно изучить за неделю, если не отвлекаться. За неделю вам удастся «прочувствовать» масштаб и богатство минерального царства. Что поражает меня больше всего, так это насколько же мало количество тех минералов, которые распространены повсеместно, — 99,9% объема земной коры представлено менее чем 500 видами.

Минералогия углерода отнюдь не ограничивается алмазом и графитом. Геологи насчитывают более 400 углеродсодержащих минералов, каждый из которых представляет собой уникальную комбинацию углерода с другими химическими элементами, а каждая такая комбинация уникальна особым геометрическим расположением атомов в регулярно повторяющейся кристаллической структуре. Некоторые из этих видов можно в изобилии найти на всех континентах: вездесущий кальцит в известняковых утесах и школьном меле, арагонит коралловых рифов и раковин моллюсков, формирующий горы доломит и практичный магнезит — магниевая руда. Углерод также содержится в прекрасных ювелирно-поделочных

цветных камнях, находящихся по «шкале желания» на одну ступень ниже рубинов и изумрудов, — нежно-розовый родохрозит, насыщенно-зеленый малахит и темно-синий азурит, мой любимый минерал.

Но на каждый распространенный углеродный минерал приходится десяток малоизвестных видов — минералов, о которых большинство людей, включая и большинство минералогов, никогда не слышали. Есть множество необычайно редких, микроскопических кристаллов, которые были найдены лишь в одном или паре мест в мире. Например, крошечные кристаллы пурпурного абелсонита были извлечены только из образцов керна горючих сланцев возрастом 50 млн лет в районе Грин-Ривер (штаты Колорадо и Юта). Чудесный небесно-голубой хуангодойит найден лишь на серебряном руднике Санта-Роса в чилийской провинции Икике. Кристаллы прекрасного изумрудно-зеленого уиджимулталита (попытайтесь быстро сказать это слово три раза подряд!) были обнаружены исключительно на руднике Маунт-Эдвардс в Уиджимулте, Западная Австралия. А все известные запасы хрутфонтейнита Земли, открытого в виде микроскопических зерен на руднике Комбат в Намибии, поместятся в наперсток, да еще и место останется.

Почему столь многие минеральные виды редки? Почему бы атомам не найти несколько десятков оптимальных компоновок и не придерживаться их? Мы с моими коллегами никогда не задумывались об этом. Поэтому так важно иметь умных, любознательных, пылких и обладающих широким кругозором друзей, которые не являются экспертами в вашей области. Здесь как с углеродом: чем более разнообразные связи мы формируем, тем больше наш потенциал. Жизненно необходимо иметь коллег в других областях — коллег мыслящих, не боящихся задавать действительно оригинальные вопросы, которые эксперты в вашей области

никогда и не подумают задать. Для меня таким другом и коллегой стал Джесси Аусубел.

Джесси называет себя промышленным экологом, изучает источники и потоки энергии в разных социумах. Он слышет весьма осведомленным специалистом с провокационными взглядами на энергетическую политику, но его профессорская позиция в Рокфеллеровском университете в Нью-Йорке дает ему возможности для гораздо более разнообразных и творческих интеллектуальных поисков. Джесси — эксперт по творчеству Леонардо да Винчи и его жизни. Он предложил новые и убедительные гипотезы причин различных явлений — от массовых вымираний до авиакатастроф. Джесси — компетентный специалист в области разнообразия и распределения морских организмов, также он разбирается в использовании ДНК-дактилоскопии для идентификации видов растений и животных, так как участвовал в глобальной программе под названием «Штрихкод жизни»²⁵.

Аусубел — потрясающий наставник молодых ученых, он использует для обучения весьма замысловатые методики и способствует профессиональному росту начинающих, предлагая им участвовать в проектах, на редкость оригинальных. В 2011 г. он консультировал подростков Кэтрин Гэмбл, Роана Кирпекара и Грейс Янг из манхэттенской Тринити-скул, как разбираться в ингредиентах чая²⁶. Оказывается, многие чайные рецепты хранятся в тайне — самые важные ингредиенты никогда не раскрываются. Но ДНК-тестирование может выявить даже незначительные компоненты любого чая, от «Липтона» до самых экзотических азиатских смесей. Применив методы баркодирования ДНК, юные сыщики обнаружили удивительный ряд не указанных в описании добавок — среди них петрушку, пырей, люцерну и обычные сорняки вроде белой мари или красной зубчатки.

Через год, в 2012 г., Джесси стал наставником старшеклассниц Кейт Штокл и Луизы Штраусс, также учениц Тринити, которые обошли более десятка дорогих суши-ресторанов и рыбных магазинов. Тайком от их владельцев Штокл и Штраусс взяли маленькие образцы сырой рыбы в лабораторию для ДНК-дактилоскопии. Результаты оказались поразительными — каждая четвертая рыба подменялась другой, которая выдавалась всегда за более дорогой деликатес: обычная треска «играла роль» красного лucciана, икру обычной корюшки продавали как икру летающей рыбы, дешевую тилапию любовно презентовали в качестве дорогого белого тунца. Когда топовые новостные СМИ Нью-Йорка узнали эту историю, она произвела фурор. Скандал, получивший название «сушигейт», доставил много неприятностей престижным японским ресторанам и заставил Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов ввести новые правила тестирования и маркировки рыбной продукции²⁷.

Джесси Аусубел, конечно, понимал социальные последствия исследований чая и суши, но он смотрел шире — искал возможность привнести науку в повседневную жизнь людей. *The New York Times* приводит его фразу: «Триста лет назад наука была менее профессиональной. Возможно, колесо истории вновь поворачивается туда, где в ней сможет участвовать больше людей»²⁸.

Джесси изменил мою жизнь в бытность его координатором программ фонда Слоуна, благодаря которому и появилась Обсерватория глубинного углерода*. Быстро перемотав потребовавший нескольких лет этап предварительного одобрения грантов, рабочих встреч, подготовки предложений и формирования команды, перейдем сразу

* Далее в тексте также будет использоваться аббревиатура DCO. — Прим. ред.

к кульминационному пункту работы DCO. На всем пути ее становления Джесси был нашим энергичным коллегой, принимающим в работе деятельное участие, полностью погруженным в науку и ее планирование.

Один наш памятный разговор состоялся в октябре 2015 г. на исходе напряженного дня, проведенного в знаменитом вулканическом кратере Сольфатара неподалеку от Неаполя. Минерализация этой активной зоны выхода углекислого газа и едких насыщенных серой паров весьма разнообразна. Великолепные красные, оранжевые и желтые кристаллы конденсируются прямо из горячих газов, насыщенных серой, мышьяком, ртутью и другими ядовитыми элементами. Минералообразующая мощь создающих кристаллы зловонных вулканических паров потрясла меня — я в жизни не видел подобного минералогического спектакля и никак этого не ожидал.

Тем вечером, проезжая по Риму на такси, мы с Джесси обсуждали богатое разнообразие минералов и их неравномерное распределение — с учетом изобилия редких видов. Вот тогда он и задал вопрос, который большинство геологов не задали бы: а почему редких минералов так много? И сразу пришло осознание: если мы хотим понять все формы углерода, нам бы лучше ухватиться за многочисленные малораспространенные углеродсодержащие кристаллы. Почему существуют целые сотни редких углеродных минералов, каждый с уникальным сочетанием химии и структуры? Дальнейшее обсуждение, начавшееся с этого вопроса, Джесси подкрепил своими сведениями об экзотической морской жизни, а я — своими познаниями по минералогии. К концу поездки идея статьи обрела форму²⁹.

Мы с Джесси поняли, что минералы могут быть редкими по четырем причинам. Тысячи минеральных видов редки, поскольку содержат один или несколько редких химических

элементов, которые должны быть обособлены и сконцентрированы до того, как сможет образоваться минерал. Поэтому в относительно малом количестве минералов присутствуют кадмий, йод, рений или рутений — содержание атомов любого из этих элементов в земной коре меньше одного на миллиард других атомов. К образованию редкостей приводят также странные, невероятные сочетания элементов. Бериллий с сурьмой вместе встречаются только в одном минерале — велшите. Названный в честь Билла Велша, заядлого коллекционера минералов (и, к счастью, моего учителя естественных наук в восьмом классе), велшит можно найти исключительно в исторической горнодобывающей области Лонгбан в Швеции. Ванадий и молибден объединяются также в одном-единственном минерале из одной-единственной местности: герероите из уже упоминавшегося свинцово-цинкового рудника Комбат неподалеку от Хрутфонтейна в Намибии.

Еще одна группа минеральных диковинок содержит распространенные элементы, но их редкость объясняется весьма жесткими ограничениями по условиям, необходимым для их образования. Кальций, кремний и кислород — одни из самых распространенных элементов на Земле, но минерал хатрурит, для которого соотношение этих элементов $3:1:5$, был найден лишь в формации Хатрурим в Израиле. Хатрурит кристаллизуется только в узком диапазоне состава и при необычайно высоких температурах (выше $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$). Но стоит лишь чуть-чуть изменить условия, особенно если присутствует распространенный элемент алюминий, и вместо хатрурита образуются другие минералы.

Некоторые минералы редки в силу своей неустойчивости: едва образовавшись, они быстро исчезают. Скаккит, минеральная форма хлорида магния, впитывает воду из воздуха и рассыпается при определенной его влажности. Названный

в честь меня минерал хазенит, найденный только в озере Моно в Калифорнии, растворяется под дождем. (Милые маленькие кристаллики представляют собой какашки микроорганизмов; как говорит один мой коллега: «Хазенит случается» *.)³⁰ У других редких видов происходит дегидратация на воздухе, они распадаются под действием солнечного света или попросту испаряются. Некоторые из этих минералов, должно быть, образуются часто и в гораздо большем числе мест, чем мы знаем, но так ведь нужно оказаться в нужном месте в нужное время, чтобы их найти.

И наконец, о некоторых минералах нечасто сообщают просто потому, что они находятся слишком далеко или их слишком опасно собирать. Минералов из активных вулканов или глубоких шахт, вмерзших в антарктический лед или находящихся глубоко под океаническим дном, может быть и много, но они вряд ли окажутся в музеях и уж тем более в коллекциях собирателей минералов.

Чтобы считаться редким — а это бо́льшая часть всех минеральных видов, — минерал должен обладать по крайней мере одним из этих четырех признаков: причудливый состав, жесткие ограничения по условиям образования, мимолетное существование или образование в опасном окружении. В очень немногих случаях особенно редким минералам присущи все четыре. Примером этого является фингерит — минерал, названный в честь Ларри Фингера³¹, который долгое время был моим коллегой по Геофизической лаборатории и наставлял меня в минералогии. Фингерит — редкий, потому что он: 1) содержит необычное сочетание элементов — меди и ванадия, 2) требует точного соотношения этих элементов 2 : 1 (если будет соотношение 1,5 : 1 или 2,5 : 1,

* В оригинале: “Hazenite happens” — явный отсыл к знаменитому американскому выражению “Shit happens”, получившему особую известность после фильма «Форрест Гамп». — *Прим. ред.*

сформируются другие, такие же редкие минералы), 3) растворяется каждый раз, стоит пойти дождю, и 4) образуется из горячего пара только в выходах супернагретых источников у вершин вулканов. Неудивительно, что фингерит известен лишь в одном месте на Земле — в fumarолах вблизи вершины периодически проявляющего активность вулкана Исалько на западе Сальвадора.

Понимание того, что большинство минералов — редкие, имеет важное практическое применение. Редкие минералы указывают на те участки Земли, где сочетание химических и физических условий было необычным, если не уникальным. Возможно, горячий природный рассол, обогащенный никелем и медью, попал под давлением в трещину известняка на глубине около 1 км. В результате образовались несколько округлых кристаллических кластеров темно-зеленого глаукосферита. Крошечные розетки желтого бейлиита и корочки желто-коричневого свартцита растут исключительно на стенах урановых шахт, тогда как золотые иглы гелита и прозрачные пластинки кладноита конденсируются только в горелых отвалах угольных месторождений.

Наша активная живая планета проделывает много подобных замысловатых трюков в самых неожиданных местах. Диковинные минеральные полости — результат химического смешивания, вызванного действием внутреннего тепла, мигрирующих флюидов* и повсеместно проникающих безудержных проявлений жизни — создают уникальную «экологию» минералов Земли. Этим наш дом отличается от любого другого известного мира. Сияющая Луна, быстрый Меркурий, даже наш красный сосед Марс, который по всем признакам когда-то был теплым и влажным,

* Газово-жидкие растворы. — *Прим. науч. ред.*

как Земля, — в том, что касается минерального разнообразия, все они блекнут по сравнению с нашей планетой.

Редкие минералы — это научный праздник для тех из нас, кто занимается изучением кристаллического царства природы. Это так хотя бы потому, что самые редкие минералы обладают неизвестными прежде кристаллическими структурами — новым геометрическим расположением атомов, — которые способствуют поиску новых и полезных материалов. Помимо этого, редкие минералы содержат не изученные ранее сочетания элементов. Подобные новинки также мотивируют на создание новых материалов. Но вот что, возможно, удивительнее всего: документирование всех редких минералов оказывается ключом к предсказанию множества еще не идентифицированных диковинок, которые должны встречаться на поверхности Земли или чуть глубже, но пока не обнаружены и не описаны.

Минералогия больших данных³²

Секрет предсказания еще не открытых минералов заключается во всеобъемлющих исследованиях тех, что уже известны. Обсерватории глубинного углерода нужна была полная инвентаризация сотен минералов углерода — распространенных и редких, каждой отдельной формы углерода на Земле. Нам также требовалось знать их количество — список всех их местонахождений по всему миру и всех сосуществующих с ними минералов во всех шахтах и карьерах, на всех горных пиках и приливно-отливных зонах.

Минералогия больших данных — ключ к предсказанию еще не открытых объектов минерального царства Земли. Мы должны создать базы данных по более чем 5000 известных минеральных видов и миллионам их местонахождений по всему земному шару. Затем мы должны проштудировать

эту информацию, чтобы распознать скрытые закономерности, которые укажут верное направление к открытию.

Для работы с большой базой данных нужен особенный человек — тот, кто любит эту область, у кого есть творческое видение, кто обладает техническими навыками в разработке программного обеспечения и, возможно самое важное, кто готов потратить бесчисленные часы на поддержку этого проекта. Роберт Даунс, профессор минералогии Аризонского университета в Тусоне, как никто соответствует этим требованиям³³. Он посвятил два десятилетия составлению всеобъемлющего списка минералов и их свойств.

Боб Даунс не тот человек, о котором вы бы подумали в первую очередь, представляя себе этот подвиг Геракла. Покладистый канадец по происхождению и темпераменту, он не так давно пришел в науку. Даунс добился превосходных результатов как математик в Университете Британской Колумбии, но также был вполне счастлив, когда, будучи строительным рабочим, прокладывал автомобильные трассы на канадских Северо-Западных территориях, подземку в Ванкувере и железные дороги в Британской Колумбии. Какое-то время Боб копал золото на участке своего отца в районе Фифтин-майл-Крик на Юконе и добывал чудесные образцы минералов в ходе собственных изысканий в высокогорных районах юга Британской Колумбии, вскрывая твердую породу динамитом. «Я получал динамит бесплатно, потому что был кое с кем знаком». Он добавляет: «Я вел себя по-идиотски, но мне везло, так что я не убился». Только пожив жизнью, полной приключений, Даунс остепенился и получил докторскую степень по математической кристаллографии в Политехническом университете Вирджинии уже в весьма зрелом возрасте — в 37 лет. Три года спустя, отработав на позиции постдока вместе со мной в Институте Карнеги, он стал преподавателем Аризонского университета в Тусоне.

На первый взгляд Боб — спокойный человек, но стоит узнать его получше, как становится очевидной его сильная страсть к минералам и их исследованию. Пару-тройку десятков лет назад он обнаружил, что минералогии с ее данными по тысячам видов, разбросанными по сотням источников, не хватает порядка и стройности — систематического перечня всех официально утвержденных минеральных видов, точного определения их кристаллических структур и всеобъемлющей классификации их физических и химических свойств. Дело, которое он начал, стало самой большой в мире базой данных минеральных видов.

Сперва это была тихая и незаметная работа для души — персональный сбор наиболее достоверных сведений о кристаллической структуре минералов. Будучи редактором — специалистом по кристаллическим структурам в ведущих научных журналах *American Mineralogist* и *The Canadian Mineralogist*, Даунс имел непосредственный доступ к сотням таблиц с кристаллографическими данными. Как говорилось выше, он обнаружил, что не существует полного списка официально утвержденных минеральных видов. Международная минералогическая ассоциация (ММА), повсеместно известная как IMA (International Mineralogical Association), занимается проверкой заявок на новые виды со всего мира — чтобы верифицировать каждое уникальное сочетание химического состава и кристаллической структуры, найденное в природе. Но ММА — общественная организация, и много лет ее «официальным» списком была неформальная «сборная солянка», систематически не обновляемая и не публикуемая регулярно в каком-то определенном издании. С целью привнести больше порядка в эту область Даунс и начал составлять собственный список, координируя свою деятельность с ММА.

Все изменили деньги. Бизнес-ангелом Даунса стал миллиардер Майк Скотт, генеральный директор Apple Computers,

который присоединился к Стиву Джобсу и Стиву Возняку в 1977 г., как только свежеоперившаяся компания вышла из гаража. Скотт — страстный коллекционер прекрасных драгоценных камней. Его собрание крупных, безупречных, насыщенных цветом сокровищ превосходит коллекции почти всех музеев в мире. Скотт хотел разработать быстрые и точные методы идентификации ограненных драгоценных камней, поэтому предложил Бобу сделку. Скотт вложит 5 млн долларов в самый современный инструментарий для его лаборатории и поддержит разработку базы данных по минералам и их свойствам, а Даунс поможет идентифицировать минералы коллекционера. Но при одном условии: базу данных надо будет назвать в честь кота Майка Скотта, Праффа. Так и родилась RRUFF — база данных по минералам³⁴. Кое-кто из нас заметил, что название содержимого этого ресурса — «данные Праффа» — производило не лучшее впечатление. Но такова была сделка, и название RRUFF сохранилось. (Можете проверить по адресу <http://rruff.info/ima>.)

Сначала замысел заключался в том, чтобы просто собрать много-много сведений — без необходимости регистрировать каждый отдельный минеральный вид. Но аппетиты росли. Даунс нанял армию студентов, чтобы те вводили в базу самые необходимые данные по минералам, измеряли атомные структуры и оптические свойства, сохраняли характерные образцы в растущей коллекции минералов Аризонского университета и делали как можно более удачные микрофотографии характерных кристаллов. Он нанял программистов, чтобы ускорить процесс ввода информации, иметь возможность добавлять в базу новые поля, устанавливать связи с другими ресурсами данных по минералам и делать весь сайт более удобным для пользователя. Он приветствовал преемственность работавших с ним выпускников,

которые в итоге построили свои карьеры на сборе и использовании данных по минералам.

В процессе создания базы данных RRUFF Боб Даунс стал совершенно незаменимым для минералогии. Его веб-сайт, обновляемый каждые несколько дней, содержит наиболее полный из всех перечень минеральных видов. Ресурс rruff.info/ima набирает почти 100 000 посещений каждую неделю, так как сюда регулярно заходит все минералогическое сообщество мира — студенты, преподаватели, коллекционеры-любители и музейные кураторы.

RRUFF продолжает расширяться как по содержанию, так и по размаху. Сейчас у вас есть возможность искать на нем минералы по составу, структуре или минеральной группе. Даунс с коллегами недавно добавил на портал страницу «Минеральная эволюция», где возраст почти 200 000 минералов сопоставлен с другими данными. Новые пакеты программ обработки статистической информации и графические опции позволяют пользователям визуализировать сведения о минералах различными «умными» способами. Знания Даунса по минералогии привели его на Марс в качестве члена команды Марсианской научной лаборатории, которая управляет марсоходом «Кьюриосити» на Красной планете. Как следствие, к базе данных добавили также планетарную минералогию.

Сейчас каждый желающий имеет бесплатный и открытый доступ к полному каталогу, содержащему более 5000 утвержденных ММА минералов на Земле и других планетах со ссылками на всю необходимую статистику по каждому виду. Но знание множества обнаруженных форм углерода только первый шаг в предсказании того, чего «не хватает». Нам также нужны данные по сотням тысяч местонахождений минералов по всему миру — по всем шахтам и горам, карьерам и обнажениям, пещерам и утесам. Составление такого

списка — хотя это и гораздо, гораздо более сложная задача, нежели каталогизация более чем 5000 видов, — единственный способ, с помощью которого мы могли бы узнать число углеродсодержащих минералов Земли.

Mindat.org

Другой герой кампании по составлению международной базы данных по минералам — Джолион Ральф, целеустремленный прагматичный британец, который построил небольшую империю, собирая данные по минералам и драгоценным камням и делясь ими³⁵. Как и многие любители минералогии, Ральф начал коллекционировать еще в детстве. Он вспоминает свой самый первый образец: кристалл кварца, найденный им в гальке на прославленном побережье Тинтагель в английском Корнуолле, когда ему было шесть лет. С этого и началась любовь Ральфа к минералам длиною в жизнь. Коллекция выросла, но он все еще хранит тот маленький камушек — уже более 40 лет.

Вторая страсть Джолиона проявилась в 1980 г., когда в возрасте десяти лет он был отобран для участия в пилотной программе по обучению британских детей программированию. Его увлечение разработкой алгоритмов со временем не ослабло. Поступив в престижную Королевскую горную школу, чтобы изучать геологию как основной предмет, он вскоре переключился на компьютерные науки, выбрав их в качестве своей профессии.

Mindat.org — самый внушительный в мире на сегодняшний день ресурс сведений о местонахождении минералов и основное дополнение к базе данных по минеральным видам RRUFF Даунса — появился на свет в рождественские дни 1993 г. в виде персонального списка минералов Джолиона Ральфа³⁶. Сначала это был просто каталог его собственных

образцов и мест сбора, но Ральф постепенно начал осознавать, что его база данных могла бы стать чем-то бóльшим. Он продолжал добавлять информацию и улучшать функциональность Mindat, но уже начала обретать форму идея создания сайта, который вмещал бы все минеральные виды из каждой точки мира. Наступление эпохи ОС Windows и мощь интернета дали новый толчок к дальнейшему развитию Mindat, и 10 октября 2000 г. он стал публичным ресурсом.

Одному никак с таким не справиться. Сотни лет минералогических исследований, помноженные на энтузиазм десятков тысяч хорошо подкованных и страстных коллекционеров, породили целый океан информации по минеральным видам и их местонахождениям. Миллионы фактов, указывающих, где конкретно и какие именно комплексы минералов были найдены, оказались разбросанными повсюду, погребенными в бесчисленных книгах и статьях, опубликованных на многих языках. Мало того, существовало неизвестно сколько скрытых ценных сведений о минералах — неопубликованные обрывочные сведения, собранные на спрятанных в картотечных ящиках карточках для записей, записанные от руки в полевых дневниках и хранящиеся на устаревших ныне дискетах. Задачей Джолиона Ральфа было найти все эти данные, собрать их на единой интернет-платформе и предоставить миру.

Точное местонахождение минералов имеет важное значение для очень многих людей. Геологи хотят знать, куда идти, чтобы понять, как образуются минералы. Коллекционеры хотят знать, куда идти, чтобы найти лучшие образцы для представления их на минералогических шоу. А добывающие компании хотят знать, куда идти, чтобы заработать много денег. До недавнего времени у них не было единого источника информации о местонахождении минералов.

Некоторые минералоги проводили региональные исследования; геологические библиотеки заполнены книгами с названиями вроде «Минералы Аризоны» или «Минералы Карпат». На титулах других сборников написано, к примеру: «Шахты Долины смерти» или «Драгоценные камни мира». Плюс популярные минералогические журналы, среди которых *The Mineralogical Record* и *Rocks & Minerals*, публикуют богато иллюстрированные сообщения о знаменитейших местонахождениях коллекционных минералов в мире, зачастую с тщательно составленными списками всех зарегистрированных видов из действующих шахт или известного региона. Но, чтобы получить исчерпывающий обзор — чтобы свести в таблицу все, что имеет отношение к распространенному минералу, скажем азуриту или родохрозиту, — вам потребуются годы изучения нескольких тысяч источников, значительная доля которых окажется той самой скрытой информацией на иностранных языках. Вам также потребуется легион помощников-энтузиастов. Именно таких и набрал Джолион Ральф.

Статистика Mindat поражает. Добавлять фотографии минералов, описывать их местонахождения и редактировать данные по ним могут почти 50 000 зарегистрированных пользователей. В совокупности они загрузили сотни тысяч фотографий образцов. Были внесены данные по 300 000 участков по всему миру, а количество индивидуальных минералогических находок перевалило за миллион. Это изумляет Ральфа: «Я не ожидал, что сайт настолько разрастется. Он начал руководить моей жизнью!»

Джолион, который сейчас работает в полную силу, управляя Mindat и расширяя его, как никто другой понимает, что работа не окончена. Покрытие некоторых богатых минералами географических зон, в частности Китая, неполно. Многие места плохо описаны (Ральф пытается

добавить ко всем ним GPS-координаты). Более того, на таком краудсорсинговом ресурсе, как Mindat, всегда будут досадные ошибки и искажения фактов. Коллекционеры иногда допускают неточности в идентификации своих находок, и они скорее сообщат о редких видах, которые встречаются в форме цветных кристаллов, чем о гораздо более распространенных белых или серых неприметных пороодообразующих минералах. Тем не менее десятилетия усилий и организационных стараний Джолиона Ральфа привели к тому, что его Mindat.org преобразовал минералогию и открыл потрясающие новые возможности для минералогических исследований.

Экология минералов

Благодаря всеобъемлющему списку минеральных видов Боба Даунса и огромной подборке местонахождений минералов Джолиона Ральфа мечта ДСО каталогизировать все кристаллические формы углерода на Земле вполне осуществима. О чем говорит нам вся эта информация? Этим вопросом мы задались в 2014 г., когда начали искать скрытые закономерности в нагромождении данных.

Первым, что нас поразило, было неравномерное распределение земных минералов — тенденция, наблюдаемая, как правило, в биологических экосистемах. Несколько десятков минералов встречаются в тысячах мест, в то время как большинство других — чрезвычайно редкие. Полдесятка видов минеральной группы полевого шпата, по оценкам, составляют 60% объема земной коры³⁷. Несколько десятков других распространенных минералов составляют почти все остальное. А более 1200 минеральных видов, напротив, известны только по уникальным находкам в единичных местонахождениях. Еще более 600 видов найдены всего в двух

местах, а почти 400 — описаны лишь из трех. Общий обзор данных по местонахождениям в Mindat.org показывает, что более половины всех зарегистрированных минералов происходят из пяти или менее мест. Поразительный вывод: большинство минералов — очень редкие.

Тогда мы задумались: является ли такое неравномерное частотное распределение с малым количеством очень распространенных видов и намного более многочисленными редкостями характерным для природы в целом?³⁸ Может ли литература по социологии, экономике, географии или другим областям знаний показать аналогичное частотное распределение? Существует ли уже признанный математический подход для описания подобной взаимосвязи с преобладанием редкостей, который мы можем использовать, чтобы понять распределение минералов?

Ответ пришел (как это часто бывает) в несвязанном, казалось бы, контексте — во время прогулки в лесу. В июне 2014 г. Мэттью Скотт, недавно назначенный президентом Института Карнеги, пригласил меня к себе домой в Пало-Альто, чтобы поговорить о науке, жизни и будущем института. Мэтт — родственная мне душа, с той же страстью к концептуализации и междисциплинарному мышлению. Он внес весьма революционный вклад в клеточную биологию и биологию развития, да к тому же был главой амбициозной лаборатории Bio-X в Стэнфордском университете, где работают исследователи, занятые в передовых междисциплинарных проектах, которые связывают биологию с медициной, инженерными науками, физикой и химией. Благодаря активности Мэтта лаборатория получила 1 млрд долларов на новейшее оборудование. Теперь же он предвкушал новые приключения, руководя обновленным Институтом Карнеги, в котором проводились связанные между собой исследования Земли, космоса и живой природы.

Вместо того чтобы просто сидеть и разговаривать, мы пошли на прогулку по живописному скалистому побережью Северной Калифорнии и зашли в ближайший лес с древними массивными секвойями. Проходя мимо внушительных хвойных деревьев, я поражаюсь неравномерному распределению растительной и животной жизни. Бóльшая часть биомассы этой экосистемы скопилась на гигантских секвойях, а оставшаяся — на нескольких других крупных доминирующих видах деревьев и кустарников. Но львиная доля биоразнообразия была представлена гораздо более мелкими видами: мхами, папоротниками, насекомыми, певчими птицами и яркоокрашенными калифорнийскими банановыми слизнями, не говоря уже о бесчисленных невидимых микроскопических формах жизни. Шагая, я размышлял: а не может ли распределение биомассы в экосистеме отображать распределение минералов на Земле?

Разгадка появилась из неожиданного источника несколько дней спустя, когда я искал статьи по частотному распределению³⁹. Ответом послужили слова. Оказалось, что характерное распределение слов в книге необыкновенно похоже на распределение минералов на Земле. Давайте рассмотрим эту мою книгу. Как и все, я часто использую здесь артикли и союз «и» — возможно, сотни раз. Другие часто используемые слова более характерны для данной конкретной истории: первыми приходят на ум «минерал», «алмаз» и «углерод».

Вы, возможно, видели «облака слов», или Wordles, в которых крупным шрифтом выделяются самые распространенные ключевые слова в тексте. Те, которые вы не видите в «облаке», — это более редкие слова, которые использовались всего один или два раза. И в эту категорию попадает намного больше разных слов. Здесь слово Wordle появляется только единожды (упс, полагаю, теперь уже дважды). То же

самое можно сказать о «Чосере», «тилапии» и «уиджимулталите». На самом же деле анализ этих редких слов может однозначно указать на тему, жанр и даже авторство документа. Вот если бы вы нашли старую рукопись и захотели узнать, кто ее написал? Такие редкие, характерные слова и фразы могут помочь выявить ранее неизвестные произведения Диккенса, Чосера или Шекспира.

Подобная закономерность — с несколькими распространенными элементами и многочисленными редкими — называется распределением «большого числа редких событий» (или сокращенно БЧРС). Вы, возможно, полагаете, что исследование распределений БЧРС относится к сфере компетенции какого-то захолустья прикладной математики и интересуется всего лишь нескольких историков и литературоведов. Однако это не так: глобальная борьба с терроризмом сделала лексическую статистику горячей темой. Агентство национальной безопасности хочет знать, кто что пишет и кому. БЧРС-анализ — даже просто электронного письма, короткого документа или записи телефонного разговора — может дать убедительные подсказки. Как следствие, на БЧРС-исследования потекли деньги. В последние годы вышли толстые учебники, напичканные математическими формулами, а мудреные статистические программы для БЧРС-анализа доступны онлайн и бесплатны.

Погружение в мельчайшие подробности столь сложной математики не для слабонервных, и мало у кого из минералогов есть ноу-хау, чтобы расшифровывать загадочные БЧРС-уравнения, а уж тем более применять их к новой дисциплине. В 2015 г. мне посчастливилось работать с Гретой Хистад, в то время преподавателем прикладной математики в Аризонском университете и одновременно — членом хоккейной команды Боба Даунса. Найти коллегу, подобного Хистад, — мечта любого ученого⁴⁰. У нее потрясающие математические

способности, она обожает учиться, творчески мыслит и любит работать как никто другой.

Грета — норвежка по происхождению, а ее генеалогия восходит ко временам викингов. Почти все детство она провела на ферме, которая принадлежала ее семье в течение 16 поколений, и может похвастаться тем, что найденный на их землях клад с украшениями железного века является национальным достоянием. Грета — заядлая спортсменка, она выступала за норвежскую футбольную команду Первого дивизиона* и несла олимпийский факел на Зимних играх в Лиллехаммере в 1994 г., перед тем как приехать в Соединенные Штаты, чтобы поступить в аспирантуру. Она получила докторскую степень в Аризонском университете и осталась там преподавать на математическом факультете, затем заняла должность профессора в Северо-Западном университете Пердью**.

Хистад понравилась идея применить устоявшиеся математические формулы к новой природной системе — распределению минералов на Земле. Она погрузилась в литературу по лексической статистике, выделила и изменила соответствующие процедуры и вскоре продемонстрировала нам, что естественное распределение минералов на Земле прекрасно соответствует двум хорошо известным типам БЧРС-распределения: конечной функции распределения Ципфа — Мандельброта (кЦМ) и общей обратной функции распределения Гаусса — Пуассона (ООГП)⁴¹.

Поток открытий, последовавших в этой области, мы окрестили экологией минералов в честь экологических

* До 1991 г. так называлась Высшая лига чемпионата Норвегии по футболу. — *Прим. ред.*

** Этот университет относится к системе государственных университетов Пердью, он был создан в 2016 г. путем слияния двух региональных кампусов, основанных в 1946 г. Кампусы находятся на северо-западе штата Индиана. — *Прим. ред.*

исследований распределения видов⁴². Мы обнаружили, что БЧРС-распределения также применимы к различным подгруппам минералов, особенно тем, которые содержат специфические химические элементы, к примеру бор, кобальт, медь и хром. Дотошные исследования углерода продвинули эту идею на шаг вперед, поскольку были обнаружены БЧРС-распределения для меньших подгрупп минералов, содержащих углерод в сочетании с кислородом, водородом и кальцием.

Вот чем интересны БЧРС-модели распределения минералов — они предлагают эмпирический закон, который точно описывает то, что мы вывели из больших баз данных по минералам: большинство минералов редкие. Но от такого подхода можно получить гораздо больше. Математические модели бесценны не только потому, что систематизируют уже известное нам. Помимо этого, подобные взаимосвязи часто уводят нас от простого описания природы, за пределы того, что мы знаем, позволяя делать прогнозы о том, чего мы не знаем. Грета Хистад обнаружила, что модели не только оценивают распределение известных минералов, но еще и раскрывают распределение пока не найденных и не описанных. С БЧРС-моделью мы в состоянии предсказывать «недостающие» минералы Земли⁴³.

Теперь — как это работает. Представьте себе, что ваш космический корабль совершил посадку на неизведанную землеподобную планету и вам нужно составить как можно более полный список ее минералов. В первом же куске горной породы, который вы подберете, будет несколько новых для вас видов. Поднимете другой камень, а затем еще один, и еще... Пока вы находите что-то новое, ваш список будет быстро расширяться. Но через несколько недель после того, как вы занесете в реестр тысячи образцов и сотни разных минеральных видов, открытия новых видов станут происходить

все реже и в конечном счете сократятся до струйки необычных, более редких находок.

Когда вы будете отмечать на графике растущее количество изученных образцов минералов по горизонтальной оси, а количество описанных видов — по вертикальной, то увидите характерную кривую накопления, которая начинает резко подниматься слева и постепенно выполаживается вправо. Эту кривую можно экстраполировать дальше вправо, чтобы оценить общее число видов, многие из которых пока только предстоит открыть и описать. Несомненно, потребуются много лет поиска, чтобы приблизиться к этому прогнозируемому числу, а тем более достичь его, но вы можете быть уверены, что намного больше минералов лежит в ожидании внимательного минералога.

Алгоритмы БЧРС позволяют обрабатывать кривые накопления, которые Грета Хистад вывела из БЧРС-статистики при помощи нескольких математических приемов. В нашей первой совместной работе, опубликованной в 2015 г., когда было известно порядка 4900 минеральных видов, предсказывалось, что еще остается найти по крайней мере 1500 минералов. Последующие исследования, которые проводила все увеличивающаяся команда выпускников, аспирантов, кандидатов наук и старших научных сотрудников, были сфокусированы на детализации того, чего недостает, не хватает: к примеру, более 100 минералов, содержащих полезный элемент бор, только и ждут, чтобы их нашли и описали. Мы предсказали, что в копилке не хватает 30 минералов хрома и 15 минералов редкого элемента кобальта. Далее последовали исследования по многим другим химическим элементам, причем все они основывались на анализе статистических тенденций в данных по минералам.

Мы объединили результаты наших всесторонних исследований по более чем 400 минералам углерода с почти

83 000 данных Mindat.org по этим разнообразным углеродным минералам и их местонахождениям⁴⁴. БЧРС-распределение работает прекрасно: более 100 минералов углерода известны только из одной местности, еще 40 — всего из двух мест и т. д. Результирующая кривая накопления говорит о существовании привлекательной перспективы — еще нужно найти и описать почти 150 углеродсодержащих минералов, которые должны существовать на поверхности Земли или в приповерхностном слое. Продолжая использовать те же методы, мы обнаружили, что из этих 150 недостающих минералов почти 90%, вероятно, содержат еще и самый распространенный минералообразующий элемент — кислород и примерно столько же — водород. Мы сделали прогноз, что десятки еще не открытых минералов углерода содержат в качестве главных компонентов также кальций или натрий.

Имея на руках такую информацию, нам было сравнительно легко сделать следующий шаг и предсказать как особенности неизвестных минералов, которые могут быть найдены, так и места, где их следует искать. Некоторые из этих потенциальных видов уже хорошо нам знакомы как синтетические соединения, например карбонаты натрия и калия. Эти химические вещества обычно белого или серого цвета, они слабо раскристаллизованы, не говоря уже о том, что хорошо растворяются в воде, а стало быть, исчезают после первого же дождя. Поэтому неудивительно, что подобные минеральные виды остались незамеченными и любителями, и профессиональными минералогами. У нас есть предложение: идите искать новые виды по покрытым минеральной коркой берегам богатого натрием танзанийского озера Натрон в Восточно-Африканской рифтовой долине. Это будет нелегко, поскольку на берегах озера уже и так полно более распространенных белых корковидных минералов,

но будет намного легче найти что-нибудь новое, если вы знаете, что искать.

Мы можем предположить свойства других недостающих минералов, если рассмотрим химических собратьев уже известных минералов углерода. Наш список из 190 возможных вариантов — железных, медных и магниевых аналогов хорошо известных карбонатных минеральных видов — затронул лишь малую часть гипотетических недостающих минералов углерода. С использованием экологии минералов мы расширили рамки основной миссии Обсерватории глубинного углерода по нахождению всех форм углерода на Земле; впервые в истории минералогии мы предсказали множество минеральных видов, которые трепещут в ожидании, чтобы их открыли.

Итак, мы застолбили нашу заявку. Мы предположили, что на Земле есть еще почти 150 неоткрытых — недостающих — минералов углерода, и конкретно предсказали, куда идти и что искать. Пришла пора проверять прогнозы.

Программа Carbon Mineral Challenge

Столетиями минералогия была наукой, основанной на наблюдении, и все новые минералы находили по чистому везению. Редкая натриевая слюда вонезит была обнаружена случайно в ходе стандартного анализа обычного биотита. Волокнистый минерал джимтомпсонит долгое время принимали за один из минералов группы вездесущих амфиболов. И как гласит пословица, золото там, где его найдешь. Конечно, есть некоторые закономерности, но только малая часть из более чем 5000 минеральных видов была предсказана до их обнаружения в природе.

С учетом экологии минералов эта традиция меняется. Мы можем предсказывать то, что пока не найдено.

О некоторых таких редкостях мы даже знаем, какими они должны быть и где их найти. Нам стало ясно, что озеро Натрон в Танзании — это место, куда можно поехать, чтобы обнаружить там новые карбонаты натрия и калия. Подобным образом уже найден ряд карбонатов стронция в известном карьере Пудретт в Квебеке, в то время как другие похожие карбонаты стронция известны нам пока только в виде синтетических химических веществ.

Чтобы найти новые минералы карбоната стронция, вам не нужно ехать на канадский карьер (хотя такая экспедиция была бы наслаждением для любого профессионального минералога). Просто подойдите к музейным ящикам, наполненным образцами из Пудретта, и тщательно изучите их в поисках крошечных кристаллических зерен ранее не распознанного вида. Новые минералы углерода должны быть также в угле и горючих сланцах. Исследования уже привели к обнаружению десятка редких кристаллов, образованных из небольших углеродсодержащих органических молекул, сконцентрированных в богатых кристаллами полостях в углях или в слоях горючих сланцев. Конечно, большинство органических минералов еще ждут своего открытия. Чтобы их найти, вы можете разрезать, изучить и проанализировать уголь или горючий сланец из местонахождений, в которых уже были обнаружены необычные минералы.

Для продвижения этого нового минералогического проекта Обсерватория глубинного углерода запустила в 2016 г. программу Carbon Mineral Challenge^{*45}. Этот международный поиск недостающих минералов углерода представлялся нам интересной идеей, но нужен был и харизматичный лидер — чтобы вызывать всеобщее чувство восторга и быть

* По смыслу можно перевести как «Минералы углерода бросают нам вызов!». — *Прим. ред.*

замечательным во всех отношениях. Нам нужен был тот, кто умеет общаться как с кураторами минералогических музеев, так и с коллекционерами. Итак, знакомьтесь: Дэн Хаммер⁴⁶.

Его и впрямь сложно не заметить. И дело не только в его 195 см роста и широких плечах. Улыбка Дэна излучает энтузиазм и искренние доброту и щедрость, очень ему свойственные. Плюс его заразительная фраза: «Ух, черт!», выражающая смесь этого энтузиазма с удивлением, которая, возможно, досталась ему от предков из Айовы (вкуче с неисчерпаемым любопытством). Когда Дэн Хаммер говорит, что минералы углерода только и ждут, чтобы их открыли, окружающие кивают и приступают к работе.

Дэн, мой бывший постдок, недавно назначенный на должность старшего преподавателя в Университете Южного Иллинойса, отдает себе отчет, что для Обсерватории глубинного углерода ставки высоки. Наш успех зависит от понимания сложного углеродного цикла Земли, а мы не сможем понять этот цикл без знания множества прекрасных и разнообразных форм, которые принимает углерод. «Недостача» почти 150 углеродсодержащих минералов — огромный пробел в нашем понимании природных форм шестого элемента, и Дэн намерен его восполнить.

Минералоги со всего мира — что любители, что профессионалы — включились в охоту, и результаты посыпались. В течение первого года программы ММА утвердила девять новых углеродсодержащих минералов в качестве «узаконенных» видов. Первым оказался найденный в испанской Каталонии абеллаит — карбонат натрия и свинца с крошечными вкраплениями бледно-зеленых иголок. Нам было очень приятно отметить, что зарегистрированный в 2017 г. абеллаит присутствовал в опубликованном нами же в 2016 г. списке прогнозируемых минералов углерода.

Тиннункулит — минерал, найденный вторым, — образуется, когда помет пустельги (вида *Falco tinnunculus* — отсюда и название) взаимодействует с теплыми газами из горящего в терриконе одной из российских шахт угля^{*47}. (Окей, признаю — такого мы не предсказывали!) За ними последовали голубой марклит из Германии, зеленый миддлбекит из Австралии и бледно-желтый леосилардит из штата Юта. Симпатичный канареечно-желтый юингит (шестое открытие) стал новым карбонатом урана из Яхимовского рудного района Чешской Республики — местности, уже известной разнообразием редких минералов углерода. И наконец, паризит-(La) — карбонат с редким элементом лантаном — тоже был предсказанной разновидностью^{**}.

Программа Carbon Mineral Challenge продолжается. Мы не рассчитываем найти все оставшиеся 145 предсказанных новых видов, но, как обещал Дэн Хаммер, без сомнения, будет интересно попытаться это сделать.

Вполне естественно, что подавляющее большинство углеродсодержащих кристаллов в природе были обнаружены в доступной приповерхностной области земной коры. Но мы знаем, что Земля хранит и более глубокие минералогические секреты — недоступные прямому наблюдению кристаллы, образующиеся при экстремальных температурах и давлениях мантии и ядра нашей планеты. Понимание сих таинственных этапов требует сложного арсенала исследовательских инструментов, которые используют ученые особой специализации. Это физики, изучающие минералы.

* Речь идет о шахте в районе г. Копейск, Южный Урал. Подробнее см. статью, на которую ссылается автор в Примечаниях. — *Прим. ред.*

** В этом фрагменте перечислены восемь минералов, вероятно, девятый не был предсказан DCO. — *Прим. ред.*

РАЗРАБОТКА* — Глубинный углерод Земли

На глубине сотен километров под твердой поверхностью Земли раскинулось скрытое, непостижимое царство тайны. Экстремальные давление и температура — условия, несовместимые с жизнью, — те две силы, что формируют глубокие недра планеты. Атомы сталкиваются друг с другом, приобретая необычные, более плотные кристаллические формы. Наше представление о космосе искажено нашим существованием на практически непроницаемой границе между Землей и Воздухом. Мы ограничены хождением по твердой поверхности Земли — каменистому барьеру, который мешает нам исследовать что-то помимо тончайшего слоя нашего величественного планетарного дома.

Какие поразительные открытия ждут нас на глубине сотни, тысячи километров под нашими ногами?

Минералогия глубинного углерода

Наши знания об углеродсодержащих минеральных видах, какими бы всеобъемлющими они ни казались, довольно поверхностны, т. е. в буквальном смысле поверхностны —

* В оригинале Development. В данном контексте означает развитие музыкального материала. — *Прим. ред.*

обусловлены доступностью лишь верхней пары километров земной коры. Почти все известные нам минералы выросли и обрели свою форму в этой тонкой каменистой оболочке. А многие из них — те, что собраны из выветрелых отвалов шахт или образовались из тлеющих экскрементов пустельги, — являются поверхностными в силу своего происхождения.

В Обсерватории глубинного углерода мы жаждем знать больше. Мы хотим понять скрытую, недоступную, глубинную область земной коры и мантии, где огромные давления и температуры давят и обжигают углерод и сопутствующие ему элементы, преобразуя их в новые, плотные формы, которые только-только становятся нам понемногу известными. Мы должны узнать эти манящие секреты недр, поскольку почти весь углерод Земли заперт внутри планеты. Для нас Земля — огромный сферический пазл, в котором лишь несколько кусочков по краям находятся точно на своих местах. Мы страстно желаем вставить недостающие фрагменты пазла минералов углерода, но есть серьезное препятствие: чем глубже мы идем, тем более сложной становится задача.

Из более чем 400 известных минералов углерода лишь жалкая горсточка представлена разновидностями, образовавшимися при высоком давлении⁴⁸. Алмаз, выкованный при экстремальных температурах и давлениях в глубоких недрах Земли, — самый очевидный пример углеродсодержащего мантийного минерала. Еще один вероятный кандидат — плотный муассанит, представляющий собой карбид, в котором атомы углерода связаны непосредственно с кремнием в кристаллическую структуру, подобную алмазу (примечательно, что в этой структуре отсутствует кислород). Поскольку кристаллы карбида кремния обладают физическими

свойствами, удивительно похожими на свойства кристаллов алмаза, ювелирные камни из ограненного и полированного синтетического муассанита нашли свое место на рынке в качестве сравнительно недорогих заменителей бриллиантов. Присутствие редких включений в алмазе указывает на несколько других возможных карбидных минералов родом из мантии, в которых атомы углерода связаны с металлами — железом, хромом или никелем. Но это касается найденных в природе образцов из глубин. Что еще может быть там, внизу?

Стандартный способ выявления возможных мантийных минералов заключается в том, чтобы подвергнуть распространенные минералы земной коры суровым условиям глубин в сотни или более километров под поверхностью Земли. Обычный кальцит — повсеместно распространенный карбонат кальция — стал одним из очевидных минеральных видов, которые стоило протестировать. Я хорошо помню, как читал передовое исследование Уильяма (Билла) Бассета и его аспиранта Лео Меррилла, описавших первую из последовательностей плотных форм кальцита, образующихся при высоком давлении⁴⁹. Я был тогда аспирантом, и передо мной стоял вопрос об интересной теме для диссертации. У Билла имелся заманчивый ответ — кристаллография высокого давления.

Для такого ученого, как Билл Бассет, «глубинный углерод» означает «углерод высокого давления». Чем глубже вы погружаетесь в недра Земли, тем выше давление. Мантия Земли подвергает минералы давлению в сотни тысяч атмосфер, а в ядре оно превышает 1 млн атм. Шотландцу Джеймсу Холлу было весьма сложно воссоздать условия глубины 1 км в своих смелых экспериментах с ружейными дулами. Воссоздать же среду мантии Земли — самая трудная экспериментальная задача, которую только можно представить.

Дополнительная сложность для изучающего кристаллы экспериментатора — создать экстремальные давления Земли, не раскрошив кристаллический образец в порошок. Это своего рода компромисс. Вы хотите добиться самого высокого давления, какое только возможно, но при этом требуется подвергнуть крошечные площади действию больших сил. Однако крошечные площади означают крошечные кристаллы, которые легко разрушаются. Как же измерить столь малые кристаллы под давлением, не уничтожив то, что вы хотите исследовать? Проблема сложная, поскольку для того, чтобы выдержать давление, ваш образец должен быть заключен в крепкую защитную камеру. Но как можно сделать какие-либо полезные измерения через такой прочный барьер?

Блестящее решение этой проблемы было найдено в 1950-х гг. в Национальном бюро стандартов США (NBS), когда его ученые получили неожиданную возможность исследовать алмазы. Им дали большую партию изъятых у контрабандистов бриллиантов и сказали, что можно проводить с камнями любые эксперименты. Одну часть ценных камней — сотни карат бриллиантовых сокровищ — исследователи сожгли дотла в тщетных поисках вкраплений (вывод: в бриллиантах их не много). Другие алмазы, включая один прекрасный 8-каратный самоцвет, стоивший целое состояние, исцарапали, просверлили или раскрошили.

Именно во время тех надругательств над алмазами ученый NBS Элвин ван Волкенбург и обнаружил их уникальную способность играть двойную роль в экспериментах высокого давления — служить как резервуаром, в котором можно закреплять и сжимать образец, так и прозрачным окном для наблюдения этого сжатого образца. Ван Волкенбург составил пары бриллиантов, расположив их грани таким образом, чтобы сконцентрировать давление в образовавшейся

ячейке с алмазными наковальнями^{*50}. Его простая, подобная тискам конструкция прижимала алмазы друг к другу для создания огромных давлений, но образец кристалла при этом оказывался защищен.

Попробуем — слой за слоем — собрать DAC-камеру для образца. Нижний слой камеры — это плоская стальная пластина с просверленным в ней маленьким цилиндрическим отверстием. Возьмем первый алмаз и вставим его в отверстие наковальней вверх. Следующий слой — это прокладка, вырезанная из тонкого металлического листа не более 0,05 см толщиной. Маленькое отверстие в прокладке, точно отцентрированное над наковальней нижнего алмаза, служит цилиндрическими стенками ячейки с образцом. Заполним эту ячейку тремя составляющими: сначала наш кристаллический образец (обычно закрепляемый на месте крохотным комочком вазелина), рядом — мельчайшие зерна чувствительного к давлению рубина или какого-то другого материала, который послужит стандартом внутреннего давления, и наконец — чтобы дозаполнить ячейку с образцом — вода или какая-либо другая передающая давление жидкость. После того как на прокладке располагают второй алмаз, ячейка запечатывается. Его наковальня обращена вниз, он накрывается сверху второй стальной пластиной с отверстием. Когда камера для образца собрана, мы повышаем в ней давление, сжимая ее в любом из создающих давление устройств. Если мы были осторожны и аккуратно выровняли все цилиндрические отверстия, то сможем смотреть прямо сквозь алмазы на потрясающий, неожиданный мир высокого давления.

Команда NBS своей новой игрушкой, как они ее называли, запустила целую эпопею экспериментов высокого давления.

* Далее будет иногда использоваться иногда использоваться аббревиатура DAC, от *англ.* Diamond Anvil Cell. — *Прим. ред.*

Исследователи зачарованно наблюдали, как чистая вода преобразовывалась в новые формы высокобарического льда, а алкоголь кристаллизировался иглами — их ван Волкенбург окрестил джин-сосульками. Экспериментаторы использовали дорогие спектрометры, чтобы измерять значительные изменения во взаимодействии света с материей. А еще они направляли рентгеновские лучи на образцы, пытаясь хоть чуть-чуть ухватить, как при сжатии атомы перераспределяются, образуя более плотные конфигурации.

Я был поистине пленен поразительными отчетами ван Волкенбурга и его коллег по NBS. Когда в начале 1970-х гг. я прочитал статьи об их достижениях и уловил манящий свет этого ранее скрытого глубинного царства, то понял, чем хочу заниматься в жизни.

Рентгеновские исследования кристаллов под давлением

Когда ученые из DCO говорят об обнаружении всех разнообразных «форм» углерода, у нас в мозгу возникает вполне определенное изображение. Мы представляем атомы. Все материалы вокруг нас — твердые тела, жидкости и газы — состоят из атомов. Кристаллы с их изящно повторяющимися симметричными рисунками атомов привлекают особое внимание. Каждый минеральный вид имеет свою атомную топологию, собственную кристаллическую структуру.

Давление добавляет нюансы в копилку кристаллических структур. Подвергайте минерал все более высокому давлению — и его атомы будут все сильнее уплотняться. Если мы хотим понять глубинные формы углерода Земли, то должны обнаружить эти плотные кристаллические структуры высокого давления.

Эlegantным способом измерения атомных структур кристаллов является рентгеноструктурный анализ. Рентгеновские

лучи — это «сильнодействующая» форма световых волн, схожих по характеру с видимым светом и радиоволнами, но с гораздо более короткими (несколько миллиардных долей сантиметра) длинами волн, близкими к стандартным расстояниям между слоями атомов в кристаллах. Когда поток рентгеновских лучей просвечивает кристалл, волны рассеиваются и усиливаются в сфокусированных потоках дифрагированных лучей. Направления и интенсивности таких лучей позволяют выявить атомную структуру.

Исходная ячейка с алмазными наковальнями NBS была изумительным достижением, но первоначальная конструкция оказалась слишком громоздкой, чтобы поместиться внутри стандартного пучка рентгеновских лучей. Более того, стальная опорная система модели NBS блокировала большую их часть. Отличное решение Меррилла и Бассета, проиллюстрированное многочисленными чертежами устройства в публикации престижного журнала *Review of Scientific Instruments* в 1974 г., состояло в том, чтобы сконструировать миниатюрную версию ячейки с алмазными наковальнями, используя прозрачный для рентгеновских лучей металл бериллий, которым бы заменили стальные ограничивающие пластины⁵¹. Сжимающую силу ячейки Меррилла — Бассета обеспечивала треугольная рамка с тремя винтами.

Свои первые эксперименты исследователи проводили на кальците, о котором было известно, что он приобретал немного более плотное расположение атомов, названное «кальцит-II» и «кальцит-III», при давлениях, соответственно, 15 000 и 20 000 атм — такие значения характерны для верхней мантии Земли на глубине нескольких десятков километров. Меррилли и Бассету не удалось расшифровать все детали этих структур, но они заметили небольшие изменения в порядке атомов, которые указывали на более плотные формы с более низкими симметриями кристаллов.

Стремясь опробовать этот новый подход и применить его к своей диссертации, я связался с Биллом Бассетом и попросил его совета. Некоторые ученые отказали бы. Зачем им стимулировать конкуренцию, имея в руках мощный новый метод и такую кучу требующих решения задач, когда не знаешь, за что и хвататься? Но Билл решил помочь. Специально для меня он заказал в своей механической мастерской новую алмазную ячейку, продал ее мне по себестоимости и приехал из Рочестера, штат Нью-Йорк, в Кембридж, штат Массачусетс, чтобы показать, как ею пользоваться.

Билл Бассет помог также многим другим ученым, и область кристаллографии высокого давления начала процветать. Благодаря передовым достижениям Билла кальцит продолжает привлекать к себе повышенное внимание. Сейчас известны по меньшей мере шесть разных форм карбоната кальция, существующих при давлениях вплоть до 80 000 атм, каждая из которых включает в себя типичный крошечный карбонатный треугольник с тремя атомами кислорода, аккуратно окружающими атом углерода. Карбонаты железа, магния, марганца и других элементов проявляют подобное разнообразие форм под давлениями, эквивалентными тем, что характерны для верхней мантии, — которые достигаются относительно легко в исследованиях кристаллических структур с помощью ДАС. Иными словами, теперь мы знаем, что минералы глубоких недр Земли отличаются от минералов близповерхностных областей.

Более высокие давления

Еще один вызов — «прозондировать» кристаллические структуры в экстремальных условиях слоя Голицына* и ниж-

* Переходная зона между верхней и нижней мантиями. Характеризуется изменением скоростей сейсмических волн. — *Прим. ред.*

ней мантии Земли, где давления превышают 100 000 атм. Наша успешная стратегия заключалась в том, чтобы применить для решения этой задачи расчеты атомных связей. Благодаря достижениям квантовой механики удалось создать сложные математические модели кристаллических структур. Ее вычислительные методы точно воспроизводят многие структуры природных материалов, найденных в земной коре, — так же как и структуры искусственных веществ, ряд которых был предсказан в теории до того, как эти вещества были синтезированы в лаборатории⁵².

Данные вычислительные методы можно также применять к высоким давлению и температуре — пусть для этого и потребуются некоторые математические приемы и мощные компьютеры. Компьютерные модели снова оказались замечательно эффективными, воссоздавая уже известные переходы при высоком давлении минералов поверхности в плотные минералы мантии (пусть даже модели не всегда точно предсказывают давление, при котором в мантии образуются новые минералы). В отличие от экспериментов, где каждое приращение давления требует существенного усложнения техники исследования, набрать миллион или больше атмосфер в квантовых вычислениях и посмотреть, что произойдет, гораздо проще.

Общий результат — и это неудивительно — заключается в том, что более глубокие минералы имеют более плотные структуры. Для карбонатных минералов, таких как кальцит и доломит, это изначальное увеличение плотности происходит из-за все более плотной упаковки знакомых карбонатных треугольников CO_3 с другими атомами, но переупаковка атомных треугольников и ядер имеет место лишь до определенного момента. После примерно полумиллиона атмосфер нам понадобится другая стратегия, потому что при таких условиях карбонатные минералы берут пример с алмаза.

Преобразование графита в алмаз заключается в превращении плоского слоя с тремя смежными атомами углерода в пирамиду с четырьмя. Подобным образом, согласно вычислениям, углерод карбонатов вместо трех смежных атомов кислорода в плоскости будет иметь четыре атома кислорода в крошечных группах CO_4 пирамидальной формы, называемых тетраэдрами.

Минералоги быстро распознали возможное сходство содержащих CO_4 карбонатов высокого давления со многими распространенными силикатными минералами, найденными в изобилии в коре Земли, в которых кремний окружен тетраэдром из четырех атомов кислорода. В минералогии земной коры преобладают десятки хорошо известных типов силикатных структур — слюд, полевых шпатов, пироксенов, гранатов и др. Могут ли подобные типы структур встречаться в карбонатах мантии? Безусловно. Теоретики спрогнозировали, что карбонат магния в условиях нижней мантии должен приобретать изящную структуру пироксена с длинными цепочками тетраэдров CO_4 , связанных угол с углом.

Не довольствуясь этими интригующими предсказаниями, большинство геофизиков хотят экспериментальных доказательств — подтверждений, которые требуют рентгеноструктурного анализа в, казалось бы, невозможных экстремальных условиях. Технические достижения, позволяющие осуществить такое исследование, поразительны. В 1970-х и 1980-х гг. в наших передовых методах использовались «большие» кристаллы — 0,02 см в поперечнике, простая DAC Меррилла — Бассета и стандартный источник рентгеновских лучей, который доступен в любой кристаллографической лаборатории. В удачный день мы могли добиться давления 100 000 атм, не разрушив наш образец и не расколов дорогие алмазные наковальни. Эти рентгеновские эксперименты при высоком давлении постепенно

становились обыденными, и их начали воспроизводить в десятках лабораторий по всему миру.

С давлением в сотни тысяч атмосфер другая история. Кристаллы должны быть размером менее тысячной доли тех, что я изучал. Более крупные рассыпятся в порошок. Необходимо использовать модель DAC гораздо более высокого уровня, иначе неправильно расположенные алмазы треснут и расколются при таких высоких давлениях. Традиционные рентгеновские лучи также не подходят — они слишком слабые, чтобы можно было получить измеримые рисунки кристалла, который меньше пылинки. Так что ученые вынуждены использовать гигантские, финансируемые государством синхротроны — ускорители частиц, в которых рентгеновские лучи в миллион раз сильнее, чем в традиционных источниках. Но они заняты 24 часа в сутки 7 дней в неделю. Мало кому из ученых удалось преодолеть те строгие ограничения, которые обеспечивают единственно возможный экспериментальный путь к пониманию самых глубинных углеродсодержащих кристаллов Земли. Среди них своими открытиями в науке о глубинном углероде выделяется итальянский минералог и кристаллограф Марко Мерлини из Миланского университета⁵³.

Марко Мерлини — скромный ученый, которому гораздо важнее трепет открытия, нежели признание. Он приветливо улыбается, встречая вас, его глаза горят азартом, ученый жаждет показать свою лабораторию и последние результаты. И эти результаты впечатляют. В статье 2012 г., опубликованной в журнале *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Мерлини с коллегами сообщил о структурах высокого давления доломита — похожего по структуре на кальцит распространенного карбонатного минерала земной коры с равным соотношением кальция и магния⁵⁴.

Если карбонатные минералы существуют в мантии Земли, то доломит — хороший на то кандидат. Работая

в Европейском центре синхротронного излучения во французском Гренобле, ученые из группы Мерлини сжали крошечный кристалл доломита до небывалых значений. При давлении свыше 170 000 атм исследователи увидели структуру, которую они называли «доломит-II» — по аналогии с кальцитом-II Меррилла и Бассета. Но стоило им сжать кристалл до 350 000 атм, как появилась совершенно новая структура — с четырьмя атомами кислорода вокруг нескольких атомов углерода, однако в новой, уплощенной пирамиде. Исследователи назвали ее конфигурацией «3 + 1». Мерлини и его команда продолжили подвергать свой кристалл доломита давлениям до 600 000 атм, но не увидели ни единого признака преобразования его в предполагаемый карбонат с углеродом, окруженным тетраэдром атомов кислорода.

Прорыв произошел в 2015 г., когда группа Мерлини опубликовала описание необыкновенной новой формы карбоната высокого давления, содержащего равные части магния и железа⁵⁵. Эти измерения казались почти невозможными, ведь требовались давления, приближающиеся к 1 млн атм, что соответствует условиям в глубочайших глубинах мантии Земли — более 1000 км под нашими ногами. Исследованием было подтверждено спрогнозированное преобразование плоских карбонатных групп CO_3 в пирамиды CO_4 . Однако вместо ожидаемой структуры пироксена с непрерывными цепочками тетраэдров, соединенных углами, ученые обнаружили совершенно новый и неожиданный атомный порядок. У их карбоната под ультравысоким давлением цепочки разбились на сегменты по четыре тетраэдра, разделенные короткими, заполненными железом разрывами, — получилась причудливая плотная структура, не похожая ни на что, виденное ранее.

У открытий Мерлини — далеко идущие последствия. Десятилетия назад общепринятая точка зрения заключалась

в том, что при высоком давлении минералы имеют тенденцию образовывать простые структуры — результат необходимой на больших глубинах плотной правильной упаковки атомов. Продолжающиеся же исследования Мерлини и других пионеров минералогии ультравысокого давления показывают иную картину. Структуры высокого давления могут быть сложными, непривычными и зачастую неожиданными. И это хорошие новости для тех из нас, кто увлечен изучением удивительной сложности природы.

Глубинные алмазы⁵⁶

Среди всего разнообразия форм углеродсодержащих минералов высокого давления — с учетом как уже известных кристаллических структур, так и тех, которые еще предстоит обнаружить, — алмаз всегда будет занимать свое почетное место. Он находится в идеальной нише между очень редкими и просто редкими минералами: достаточно распространен для того, чтобы его мог купить любой желающий, но достаточно редок, чтобы заслуживающие внимания крупные камни стоили миллионы долларов. Уже добыты сотни миллионов драгоценных камней с теми размерами, что подходят для колец или ожерелий, но обладать одним или несколькими такими камнями хотят еще сотни миллионов потребителей. Привлекательность алмазов обусловлена и их научной ценностью: чем больше мы изучаем эти почти чистые фрагменты углерода из глубин Земли, тем больше узнаем об истории и динамике нашей планеты. Поэтому неудивительно, что никакой другой минеральный вид не завораживал ученых из Обсерватории глубинного углерода до такой степени.

Первые кристаллы алмаза (хотя и микроскопического размера) в истории Вселенной образовались при конденсации

атомов углерода из горячего газа в оболочках химически активных звезд. Но наши самые ценные алмазы образуются не в ходе этого энергетического процесса, протекающего в практически вакуумных условиях Космоса. Если речь идет о драгоценных камнях, мы должны отвести взгляд с окраин звезд и посмотреть в глубокие недра планет, подобных Земле.

В земной коре образуется очень много графита. Когда атомы углерода концентрируются вблизи поверхности планеты, появляется именно графит, а не алмаз. Для создания крупного кристалла плотного твердого алмаза Земле требуется значительное давление, — по крайней мере в десятки тысяч раз больше атмосферного, — чтобы упаковать атомы углерода поплотнее. Не помещает также применить жар паяльной лампы, чтобы «уговорить» колеблющиеся атомы углерода перейти в новую, более стабильную конфигурацию пирамиды. Так что мы должны сместить фокус внимания в глубокие недра, на сотни или более километров вниз, в недостижимую мантию Земли. Где химические условия подходящие, а давление и температура достаточно высокие, где множество атомов углерода концентрируются вокруг центра кристаллизации, вот там и могут вырасти крупные драгоценные камни.

Человечество научилось воссоздавать условия, существующие на глубине сотен километров под нашими ногами, сконструировав гигантские гидравлические прессы с прочными карбидными наковальнями и мощными электрическими нагревателями. Миллионы карат синтетических камней производятся таким образом каждый год: или для абразивов, или для электронных компонентов, или для оптических окон — или как синтетические драгоценные камни. Можно даже заказать «алмаз памяти» в виде кулона — он образуется под давлением из атомов углерода, оставшихся

после кремации любимого человека. Люди не вечны, но памятный алмаз переживет даже самую долгую память.

Самые крупные алмазы — не такие, как все⁵⁷

Теперь, когда мы знаем, что алмазы могут раскрывать укрытые долгое время тайны сложных недр и бурного прошлого нашей планеты, у развивающегося научного сообщества появляется больше оснований, чтобы оценивать эти камни дороже других сокровищ. Охотники за алмазами, представляющие эту новую генерацию, не гонятся за безупречными камнями для дорогих помолвочных колец или теннисных браслетов. Наоборот, превыше всего они ценят изъяны в виде крошечных минеральных включений — некрасивые черные, красные, зеленые и коричневые вкрапления минералов, а также микроскопические карманы с глубинными жидкостью и газом. Эти дефекты, обычно удаляемые при огранке драгоценных камней, зачастую представляют собой фрагменты глубоких недр Земли — кусочки, которые образовались давно и глубоко, намного глубже залитой солнцем поверхности нашей планеты, где они были захвачены и герметично запечатаны обволакивающими их растущими алмазами.

Какие истории они рассказывают! Включения могут сообщить нам, как глубоко, как давно и в каком окружении росли их хозяева-алмазы⁵⁸. Обратимся к тайнам, которые сейчас открывают нам самые крупные камни в мире. Среди богатого разнообразия алмазов особо выделяются гигантские «Обещание Лесото» в 603 карата, добытый в 2006 г. и названный величайшей находкой нового столетия; легендарный «Кохинур» в 793 карата, найденный столетия назад в Индии и ныне украшающий корону британской королевы-матери; «Созвездие» в 813 карат, проданный на аукционе

в 2016 г. за рекордные 63 млн долларов; и самое исполинское сокровище — «Куллинан» весом в 3106 карат, обнаруженный в 1905 г. в южноафриканской шахте «Премьер» как «выживший» фрагмент камня, который должен был быть гораздо большего размера. Оказывается, у всех этих гигантов — общее неожиданное происхождение.

Столетиями считалось, что такие прекрасные драгоценные камни являются просто крупными вариантами более распространенных камней меньшего размера. Но это не так. В ходе оптических исследований были замечены признаки их иного происхождения. Большинство алмазов, пусть и поразительно прозрачных для видимого света, из-за изъянов на атомном уровне поглощают волны инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов. Самые распространенные «нарушители» — атомы азота. В алмазах типа I примерно один атом углерода из тысячи бывает заменен атомом азота. Если эти атомы азота собираются в небольшие скопления, они могут придавать драгоценным камням желтый или коричневый оттенок. Когда-то их считали некрасивыми, но теперь некоторые из этих нечистых алмазов продаются под такими откровенно соблазнительными названиями, как «коньячные», «цвета шампанского» или «шоколадные». Вы уж меня извините, но это по-прежнему просто коричневые алмазы.

Оставшиеся алмазы — менее 2% всех добытых драгоценных камней — относятся к типу II. У отличающихся своей непревзойденной прозрачностью как для видимого, так и для ультрафиолетового света алмазов типа II нет видимых включений азота, но наблюдается тенденция быть крупнее плюс они совершеннее оптически. Эти характеристики навели некоторых ученых на мысль об их более медленной и глубокой кристаллизации. Тем не менее точное происхождение алмазов типа II остается загадкой.

В открытии 2016 г., взорвавшем СМИ броскими заголовками, международная группа изучающих глубинный углерод ученых, которую возглавляет Эван Смит из некоммерческой организации «Геммологический институт Америки» (GIA, от Gemological Institute of America)⁵⁹, показала, что алмазы типа II, к которым относятся многие наиболее крупные камни, имеют любопытные специфические включения: серебристые крупинки железо-никелевого состава, отличающиеся от обычных минеральных включений, представленных оксидами и силикатами, характерными для алмазных собратьев меньшего размера.

Это исследование стало триумфом как с общечеловеческой, так и с научной точки зрения. Владельцы шахт, огранщики и коллекционеры ревностно охраняют свои сокровища: чем крупнее алмаз, тем сложнее получить к нему доступ для научных исследований. Обретение возможности хотя бы поверхностного изучения включений в одном или двух больших алмазах стало бы неожиданным подарком для большинства ученых. Те, кто пытал счастье ранее, кто видел проблески серебристых включений в крупных алмазах, ошибочно предполагали, что это распространенный минерал графит. А он не представлял особого интереса.

Но Смит и его коллеги из GIA, объединившись с другими экспертами по алмазам из Соединенных Штатов, Европы и Африки, заложили основу для исследований по целому спектру параметров. Задача отделения GIA в Нью-Йорке — сертифицировать алмазы всех видов: их взвешивают, сортируют, пытаются определить страну происхождения и постоянно разрабатывают новые тесты, чтобы отсеивать следующее поколение искусных синтетических подделок или «конфликтных алмазов» — камней из зон конфликтов. Сертификация GIA — это универсальный стандарт качества. Благодаря многочисленным связям с работниками месторождений

и музейными сотрудниками команда Смита смогла собрать и детально изучить поразительную коллекцию драгоценных камней и фрагментов, отсеченных от 53 крупных алмазов типа II. Исследователи даже заново огранили и отполировали пять фрагментов, чтобы обнажить серебристые включения для тщательного изучения высокотехнологичными аналитическими инструментами.

Первый сюрприз поджидал их при исследовании состава. Богатые металлом включения не содержали кислорода — самого распространенного химического элемента мантии, но в них присутствовало много углерода и серы, а это свидетельствовало о том, что металл должен был находиться в расплавленном состоянии, когда образовывались алмазы. Примечательно, что металлические включения указывают на те глубокие области нашей планеты, которые по составу подобны недоступному ядру Земли с его океаном плотного жидкого металла — железа и никеля, — окружающим внутреннюю сферу диаметром 2446 км, состоящую из еще более плотного кристаллического сплава железа и никеля.

Вот какой вывод мы можем сделать: крупные алмазы образуются на глубине сотен километров в изолированных мантийных карманах, заполненных богатой металлом жидкостью. Алмазам легко расти в такой среде, потому что металлическое железо обладает необычной способностью поглощать много атомов углерода. При достаточных давлении и температуре образуются центры кристаллизации и алмазы начинают расти — подвижные атомы углерода легко проходят через расплавленный металл, добавляя слой за слоем к будущим гигантским кристаллам. Образование некоторых алмазов именно таким образом — при участии металла — для ученых не является полной неожиданностью: металлические растворители использовались

для выращивания больших кристаллов синтетических алмазов с начала 1950-х гг. Но никто тогда не знал, что природа освоила тот же трюк миллиарды лет назад.

Применения открытия, что крупные алмазы сформировались специфическим образом, намного шире, чем просто поиск причудливых драгоценных камней. Этот особый класс алмазов типа II демонстрирует ранее не описанную гетерогенность мантии. Раньше думали, что высокие температуры в мантии за миллиарды лет перемешивания посредством конвекции должны были превратить ее в похожую на смузи однородную массу. Теперь же — благодаря крупным алмазам и их красноречивым включениям — у нас есть очевидное доказательство, что мантия похожа скорее на фруктовый пирог с несколькими относительно однородными областями, а вдобавок — с завитками начинки и множеством фруктов и орехов (читай, металлов и алмазов).

Более того, эти локальные варианты мантийных пород и минералов указывают на наличие глубинных областей с разными химическими средами. Мы долгое время предполагали, что мантия состоит почти исключительно из силикатов, оксидов и других богатых кислородом минералов. Именно их мы обычно видим в вулканических породах, называемых кимберлитами, которые выносят свой клад драгоценных алмазов на поверхность и являются основным компонентом богатейших алмазных трубок в мире. Но металлические включения указывают на иные зоны мантии — области, которые лишены кислорода и в которых могут происходить другие процессы, такие как рост действительно крупных алмазов.

Здесь все точно так же, как и во многих других аспектах эволюции Земли: чем пристальнее мы смотрим и чем больше данных собираем, тем более замысловатой и увлекательной становится история.

Алмазы хранят тайны истории Земли

Металлические включения, наблюдаемые только в малой доле алмазов, по-видимому, являются исключением — редкостью под стать малочисленности крупных алмазов типа II, в которых они встречаются. Намного более распространенными и доставляющими головную боль ювелирам, которые ищут сколь возможно идеально ограненные и отполированные драгоценные камни, являются включения обычных мантийных минералов в алмазах типа I. Пока люди ценили совершенные драгоценности, минеральные включения были источником разочарования. Ученые придерживаются противоположной точки зрения, так как минеральные включения сами являются кладезем данных о глубоких недрах Земли.

Некоторые из этих включений раскрывают возраст алмазов: несколько древних камней оказались старше 3 млрд лет. Ключами к определению даты рождения алмаза стали иногда встречающиеся микроскопические частицы сульфидных минералов — сияющие кристаллы толщиной меньше волоса, состоящие из комбинации атомов металлов и серы. Эти сульфидные включения всегда содержат мизерное количество редкого элемента рения, который оказывается необыкновенно полезным, если вы хотите узнать возраст минерала.

Природные атомы рения имеют две разновидности. Стабильный изотоп рений-185 составляет около 37% от общего объема рения Земли; остальные 63% приходятся на радиоактивный рений-187 — нестабильный изотоп, который может самопроизвольно преобразовываться в стабильный осмий-187 со скоростью распада половины атомов рения за 41,6 млрд лет. Со временем отношение радиоактивного рения-187 к осмию-187 уменьшается так же прогнозируемо, как тиканье часов. Требуется тщательная подготовка образца

и ультрасложные аналитические приборы, но поднаторевшему и терпеливому ученому удастся выяснить возраст алмаза измерением соотношения изотопов рения и осмия в микроскопическом сульфидном включении.

Такое сложнейшее датирование получает огромное преимущество, когда сочетается с исследованиями других включенных минеральных зерен — обычно самых распространенных оксидов и силикатов, которые составляют большую часть мантии Земли. Эти характерные ассоциации минералов иногда проливают свет на экстремальные глубины образования алмаза. В ряде случаев необычайно плотные включения оксидов и силикатов указывают на свое происхождение на глубине более 900 км, в загадочном и недоступном царстве нижней мантии Земли. Как алмазы могут прокладывать путь к поверхности из таких больших глубин, как они переживают такое путешествие, находя безопасный проход сквозь сотни километров, казалось бы, твердой породы, — не рассыпаясь, не застревая, не превращаясь в другой минерал, — остается во многом нерешенной загадкой.

Какими бы тернистыми путями эти алмазы ни появлялись из глубины, они могут много рассказать о миллиардах лет изменений в глобальном масштабе⁶⁰. Поразительные доказательства, тщательно собранные в передовом исследовании 2011 г. экспертами по алмазам Стивеном Шири из Института Карнеги и Стивеном Ричардсоном из Кейптаунского университета в Южной Африке, указывают на глубокое преобразование, которое произошло примерно 3 млрд лет назад.

Систематические исследования минеральных включений в алмазах по всему миру — драгоценных камнях из самых продуктивных рудников Бразилии и России, Южной Африки и Канады — показывают, что более молодые минералы зачастую содержат характерные сочетания серо-зеленого пироксена и красного граната. Этот цветной

минералогический дуэт указывает на то, что алмазы происходят из породы, называемой эклогитом. У эклогита очень интересная биография. Эта красивая красно-зеленая порода возникает вследствие преобразования под высоким давлением базальта — повсеместно распространенной темной горной породы, которая кристаллизуется из магмы, изливающейся вдоль всей зоны срединно-океанических хребтов, имеющих протяженность в тысячи километров и опоясывающих весь земной шар. В результате этого базальт покрывает большую часть океанического дна — почти 70% поверхности Земли. Такое постоянное производство новой базальтовой коры требует, чтобы соответствующее количество старой базальтовой коры исчезало в процессе необратимого погружения в зонах субдукции. Вдали от срединно-океанических хребтов более древние, холодные и плотные пласты базальтовой коры изгибаются вниз и уходят глубоко в недра Земли. Субдукция таким образом завершает важнейший процесс «кругооборота» земной поверхности, вызываемого движением литосферных плит.

Когда базальт опускается, он нагревается и испытывает огромное давление. На глубине не менее 50 км минералы базальта преобразуются в более плотные свои разновидности, в частности в красный гранат и серо-зеленый пироксен, обнаруженные в некоторых алмазах. Это характерное сочетание эклогитовых включений навело ученых на мысль, что движение плит, которое мы наблюдаем сегодня — с его активными срединно-океаническими хребтами и подвижными зонами субдукции, — шло полным ходом на протяжении последних 3 млрд лет.

Другие алмазы, включая и те, возраст которых превышает 3 млрд лет, содержат очень разные наборы мантийных минералов. Можно найти много включений желтого или коричневого оливина (его ювелирная разновидность известна

как хризолит*), а также пурпурного граната, черного хромита и изумрудно-зеленого пироксена. Такое характерное сочетание минеральных включений указывает на гораздо более глубокий мантийный источник, который связан с горной породой, называемой перидотитом и, как считается, доминирующей в мантии Земли. Это плотное собрание минеральных фрагментов никогда не видело земной поверхности и не подвергалось субдукции. Отсюда важный вывод: на ранних этапах эволюции Земли движения плит не было (по крайней мере, в современном его варианте — со столкновениями и расколом континентов и погружением базальтовой коры).

Урок ясен. Алмазы и их включения — действительно научные сокровища, убедительно доказывающие, что одна из величайших инноваций нашей планеты — движение литосферных плит — появилась, когда Земле было около 1,5 млрд лет. И по иронии судьбы, не ускользнувшей от исследователей алмазов, некоторые из тех драгоценных камней, которые некогда отвергли покупатели из-за присутствия в них некрасивых включений, сейчас продаются коллекционерам минералов по бешеным ценам. Опубликованные научные открытия вдохновили общественность и создали спрос на содержащие включения образцы, которые оказались не по карману некоторым исследователям.

Углерод в ядре

Понять по отдельным фрагментам минералогию углерода в мантии и так достаточно тяжело, но это цветочки по сравнению с получением проб с глубин более 2900 км, где проходит

* По-английски эта разновидность называется peridot. В России хризолит ассоциируется скорее с зеленым цветом. — *Прим. ред.*

граница между мантией и ядром. Давление там поднимается выше 1 млн атм, а температура превышает 3000 °С. Сколько в ядре углерода и какова его природа там — единственная остающаяся нерешенной величайшая загадка при оценке общего содержания углерода на Земле.

Минералогия расплавленного внешнего ядра проста. Там нет кристаллов, так что нет и минералов углерода. Тем не менее нам все равно нужно узнать, сколько углерода могло раствориться в этой зоне железо-никелевого расплава. По крайней мере две линии доказательств указывают на то, что его может быть много — возможно, гораздо больше, чем во всех остальных оболочках планеты, вместе взятых.

Первые ключи к разгадке тайны глубинного углерода появились в новаторском исследовании спокойного и скромного гарвардского геофизика Фрэнсиса Бёрча⁶¹. Научные открытия Бёрча, возможно, оказались в тени его центральной роли в создании и вводе в действие атомной бомбы, известной под кодовым названием «Малыш». Будучи капитан-лейтенантом Военно-морского флота США во время Второй мировой войны, он руководил сборкой бомбы на острове Тиниан в западной части Тихого океана и погрузкой оружия в Боинг В-29 «Суперкрепость», носящий собственное имя «Энола Гэй».

Когда я ходил на его курс геофизики осенью 1971 г., 68-летний Бёрч казался мне мягким, увлеченным своим делом преподавателем. Он рассказывал обо всех сферах применения геофизики — от исследования слоистой структуры Земли до изучения ее значительного теплового потока и переменного магнитного поля. Если бы он не был таким известным в этой области, т. е. если бы мы до этого уже не прошли по учебной программе закон Бёрча и уравнение состояния Бёрча — Мурнагана, мы бы даже не осознали, насколько большая часть материала курса базируется на его собственных революционных открытиях.

В самой важной своей работе, опубликованной в 1952 г. и остающейся фундаментом геофизического мышления до сегодняшнего дня, Бёрч объединил данные сейсмологии (исследования звуковых волн, проходящих сквозь Землю) и материаловедения⁶². Исследователь понял, что скорость сейсмической волны напрямую связана с плотностью породы, через которую она проходит. Используя свою модель, он описал недра Земли гораздо детальнее и углубленнее, чем было сделано до него. Под тонкой земной корой находится трехслойная мантия со значительными неоднородностями плотности, отмечаемыми на глубинах примерно 410 и 670 км. Это границы, которые отделяют друг от друга верхнюю мантию, слой Голицына и нижнюю мантию. Бёрч предположил, что плотность обогащенных магнием, кремнием и кислородом силикатных минералов, из которых состоят эти слои, последовательно нарастает с глубиной. Десятилетия дальнейших исследований сотен ученых добавили некоторые детали и нюансы, но общая картина, нарисованная Бёрчем, остается верной и поныне.

Гораздо более отчетливая неоднородность, отражающая сильный контраст плотностей, отмечается в основании мантии (граница мантии и ядра) на глубине около 2900 км от поверхности Земли. Ранее ученые в течение долгого времени описывали ядро как плотную, богатую металлом зону с жидким внешним ядром, простирающимся вниз до глубины 5100 км, и меньшим кристаллическим внутренним ядром с радиусом около 1230 км. Бёрч использовал свежие данные о плотности жидкого металлического железа и сплавов при высоких давлениях и температурах, чтобы развить эту точку зрения. Он заметил, что сейсмические скорости в ядре указывали на плотность значительно меньшую, чем у чистого железо-никелевого сплава. Ученый утверждал, что в этом расплавленном слое должен быть по крайней мере один

более легкий компонент: атомы железа и никеля внешнего ядра смешаны с 12% чего-то еще. Может ли оказаться этим недостающим компонентом огромное количество углерода?

Бёрч быстро обнаружил потенциальные «нестыковки» в своей смелой модели недр Земли. В остроумном примечании, которое прославилось не меньше его геофизических открытий, Бёрч отметил⁶³:

Излишне доверчивым читателям следует обратить внимание на то, что обычные слова, когда их применяешь по отношению к недрам Земли, подвергаются изменению и переходят в формы высокого давления. Вот несколько примеров подобных эквивалентов:

Форма высокого давления	Обычное значение
Определенный	Сомнительный
Несомненно	Возможно
Положительное доказательство	Смутное предположение
Неоспоримый аргумент	Обычное возражение
Чистое железо	Неопределенная смесь всех элементов

Несмотря на это предупреждение, предсказание Бёрча о наличии легкого элемента в жидком внешнем ядре выдержало все испытания. Но что это может быть за элемент? Экспериментаторы и теоретики, посвятившие себя данной сфере, продолжают биться над этим интригующим вопросом, но он до сих пор остается открытым.

В поисках ответа мы должны следовать трем простым правилам. Во-первых, элемент должен быть значительно легче железа и никеля, так что уран, свинец или золото не подходят. Во-вторых, элемент должен встречаться в изобилии в космосе; это требование исключает из списка подозреваемых легкие

литий, бериллий или бор, к примеру. И наконец, в-третьих, элемент должен обладать способностью растворяться в расплавленном металле в экстремальных условиях температуры и давления внешнего ядра. На самом деле только жалкая горстка кандидатов удовлетворяет этим трем основным требованиям: водород, углерод, кислород, кремний и сера — вот единственные реальные претенденты. У каждого свои преимущества и недостатки, у каждого свои сторонники и очернители. Конечно, это не обязательно «или/или». Расплавленный металл способен легко растворить более одного примесного легкого элемента, возможно, даже все пять сразу. (Я лично отдаю предпочтение именно этому всеобщему раствору, поскольку природа, похоже, продвигает сложность.) В любом случае есть убедительное доказательство присутствия углерода в этой смеси.

Очевидными подсказками обеспечивают нас изотопы углерода⁶⁴. Атомы углерода распространены в двух вариантах — у него два стабильных изотопа. Каждый атом углерода имеет шесть протонов в своем ядре, это определяющая характеристика углерода. Однако количество нейтронов — других кирпичиков атомных ядер — может варьировать. Почти 99% атомов углерода обладают шестью нейтронами (изотоп углерод-12), а оставшийся 1% — это углерод-13 с семью нейтронами. У наших каменистых соседей — в частности, у красной планеты Марс и большого астероида Веста — именно такое, научно доказанное соотношение этих изотопов; судя по всему, оно характеризует и большинство других объектов нашей внутренней части Солнечной системы. Но углерод Земли, по крайней мере доступный, находящийся рядом с поверхностью, похоже, слишком «тяжелый», с бóльшим процентным содержанием углерода-13, чем у соседей нашей планеты. Это загадка, которая требует решения.

Самое простое объяснение этой кажущейся аномалии заключается в том, что изотопный состав Земли такой же, как и у других миров, но «недостающий» легкий углерод спрятан от нас, заперт в ядре Земли. Если жидкое внешнее ядро содержит хоть крошечную долю углерода, то во всем ядре легко могло бы поместиться в 100 раз больше шестого элемента, чем известно для земной коры. А сколько всего содержится в Земле углерода? Поразительно, но мы абсолютно несведущи в таком важном вопросе.

Глубочайшие тайны

Нет почтового назначения на Земле более тайного, более недоступного, чем твердое внутреннее ядро. Находясь на глубине более 5100 км, элементы внутреннего ядра подвержены давлениям выше 3 млн атм и температурам, достигающим до 5000 °С. Десятилетиями общепринятая точка зрения гласила, что внутреннее ядро сложено твердым металлическим железом с небольшой долей никеля. Как и в расплавленном внешнем ядре, один или несколько легких элементов тоже могут играть свои роли — второстепенные, но ведущая партия у железа.

Однако существует проблема, связанная с природой звуковых волн. Сейсмические волны бывают двух разных типов. Более сильные и быстрые, первичные (или «Р») волны возникают, когда атомы и молекулы ударяются друг о друга последовательно, подобно костяшкам падающего домино. Движение атомов происходит в том же направлении, что и движение Р-волны. Железо и его никельсодержащие сплавы вполне соответствуют регистрируемой скорости Р-волн во внутреннем ядре.

Вторичные же (или «S») волны возникают, когда атомы двигаются из стороны в сторону, вызывая аналогичные

движения у своих соседей. (Вспомните волну болельщиков на футбольном стадионе, когда люди встают и садятся, т. е. движутся вверх-вниз, а волна идет вдоль трибун.) Движения атомов при этом перпендикулярны движению волны. Удивительно, но S-волны проходят сквозь внутреннее ядро в два раза медленнее, чем должны бы в кристаллическом железе.

Что же происходит? Простое объяснение заключается в том, что внутреннее ядро частично расплавлено — состояние, которое неизменно замедляет S-волны, но железо-никелевый сплав не мог бы плавиться в предполагаемых условиях внутреннего ядра. Джи (Джеки) Ли, профессор геологии в Мичиганском университете, предложила оригинальное экспериментальное объяснение этого расхождения⁶⁵.

Блестящая, увлеченная исследовательница, способная оперативно поддержать вызывающие интерес новые идеи или подметить слабое место в аргументах коллеги плюс всегда готовая улыбнуться тонкой шутке или остроумному высказыванию, Ли — мастер ячейки с алмазными наковальнями. Подобно многим своим ровесникам из материкового Китая, она попала в науку, так как была отличницей.

Ли отучилась на бакалавра в престижном китайском Научно-техническом университете, затем поступила в Гарвард, чтобы получить докторскую степень, специализируясь на физике и химии глубоких недр Земли.

Одно из самых творческих исследований Джи Ли было посвящено углероду во внутреннем ядре Земли⁶⁶. Работая со своим выпускником Бин Ченом (ныне преподавателем Гавайского университета) и группой коллег по Обсерватории глубинного углерода, Ли изучила суперплотное соединение атомов железа и углерода в соотношении 7:3. Ранее исследователи утверждали, что этот необычный карбид железа потенциально может представлять собой минерал самых глубинных зон Земли, поэтому мичиганская команда

проверила эту идею, сжав черный порошкообразный образец между алмазами до почти 2 млн атм, чтобы измерить его различные физические свойства. Экстраполируя полученные результаты на условия внутреннего ядра, экспериментаторы обнаружили почти полное соответствие сейсмологическим наблюдениям — прохождение Р-волн было таким же, как в чистом железе, а скорость S-волн оказалась гораздо меньше. Это открытие никоим образом не доказывает, что углерод существует во внутреннем ядре Земли в форме карбида железа, но на текущий момент такая гипотеза кажется вполне вероятной.

В дополнительном исследовании, результаты которого были опубликованы несколько месяцев спустя, группа ученых в Германии во главе с аспирантом Клеменсом Прешером в Баварском геологическом институте при Байройтском университете подвергла то же соединение одновременно высокому давлению и высокой температуре и обнаружила необычные эластичные свойства, описанные авторами как «резиновые»⁶⁷. Это нетипичная характеристика для минерала, но она подчеркивает, сколько еще нам придется узнать об углероде, находящемся глубоко внутри нашей планеты.

Наши попытки разгадать тайны земного ядра открывают фундаментальную правду о науке. Мы можем занести в каталог все кристаллические формы углерода Земли — сотни известных минералов коры и множество недостающих видов, плотные карбонаты мантии и манящие намеки на карбиды в ядре. Но такой каталог, каким бы полным он ни был, не самоцель. Все разрастающиеся знания о формах земного углерода ведут к созданию все более живой картины нашего изменчивого планетарного дома: как он появился, как функционирует, какова его дальнейшая судьба и почему он уникален в космосе.

РЕПРИЗА — Миры углерода

Минералогия Земли уникальна⁶⁸. Что может углеродная минералогия рассказать нам о нашем земном доме? Особенности ли мы? В нашей собственной Солнечной системе Земля определенно отличается от других планет земной группы и каменных спутников. На Марсе, некогда теплом и влажном, есть только небольшие и рассредоточенные слои предполагаемых карбонатов. Метеориты тоже бедны углеродсодержащими минералами, да и на Луне, сколь бы тщательно ее ни изучали, обнаружены только микроскопические зерна графита и карбида железа, но ни единого карбонатного минерала. А что насчет более удаленных планет, вращающихся вокруг других звезд?

Одним из множества полезных результатов математических исследований минеральных редкостей, проведенных Гретой Хистад, стало ранжирование всех минеральных видов в соответствии с их вероятностью нахождения на Земле. Поэтому мы задались таким вопросом: если бы мы могли взять другую планету, идентичную Земле во всем (того же размера и массы, того же состава и структуры, с океанами, атмосферой и движением плит), и «воспроизвести» 4,5 млрд лет ее истории и если бы в случае редкостного везения мы бы обнаружили на той далекой планете 5000 минералов, какова вероятность того, что они оказались бы теми же 5000 минеральных видов, которые мы видим сегодня на Земле?

Я подозреваю, что большинство минералогов, если бы им задали этот вопрос, подобно мне ответили бы, что минералогия планеты оказалась бы в основном такой же. Безусловно, присутствовали бы в изобилии все породообразующие минералы — кварц, полевой шпат, пироксен, слюда... Сотни других, менее распространенных минералов, к примеру алмаз, золото, топаз и бирюза, также неизбежно имели бы место. Продолжая рассуждение, я бы предположил, что и почти все редкие минералы тоже встречались бы в любом мире, подобном Земле. Они, конечно, точно так же были бы редкими, но в конечном счете и их бы нашли.

А вот и нет. По расчетам Хистад, это не так. Если заново «проиграть ту же пленку», то на всех планетах, химические и физические характеристики которых подобны земным, вероятно, порядка половины видов — более 2500 минералов — окажутся точно такими же, как на нашей. Еще у 1500 чуть менее распространенных минералов также есть хороший шанс — от 25 до 50% — совпасть с земными. Но более 1000 самых редких минеральных видов, скорее всего, будут отличаться, причем для многих минералов вероятность появиться в других землеподобных мирах не превышает 10%.

Вычислить по этим оценкам вероятность того, что две планеты будут иметь идентичную минералогию, было несложно: требовалось просто перемножить индивидуальные вероятности всех 5000 минеральных видов. Результат нас ошарашил. Вероятность несовпадения оказалась буквально астрономической — более 10^{320} (т. е. единица с 320 нулями)!

Сравните это непостижимое число с оценкой количества планет в космосе. Во Вселенной сотня триллионов галактик, в каждой в среднем 100 млрд звезд, поэтому — с учетом невероятного допущения, что у каждой звезды есть планета, подобная Земле, — при самом благоприятном сценарии

получится, что в лучшем случае существует лишь 10^{25} таких же планет, как наша. Доведем рассуждения до абсурда: вам нужно будет изучить каждую планету в почти 10^{300} таких вселенных, как наша, чтобы найти ту одну-единственную, которая бы точно повторяла минеральный состав Земли.

Поразительное заключение Хистад было опубликовано в 2015 г. в одном из выпусков журнала *Earth and Planetary Science Letters*. Оно гласит: «Несмотря на жестко определенные физические, химические и биологические факторы, которые обуславливают бóльшую часть минерального разнообразия нашей планеты, минералогия Земли уникальна для космоса»⁶⁹.

В основе открытия Хистад лежит глубокий философский аспект — вывод, связанный с вековым спором об относительных ролях случая и неизбежности. Сложные системы, будь то минералы или живые организмы, эволюционируют и по детерминистскому, и по вероятностному пути. С одной стороны, многие проявления природы неизбежны, продиктованы законами физики и химии. Уроните камень — и он упадет, зажгите лист бумаги в насыщенной кислородом атмосфере Земли — и он сгорит. С другой стороны, все сложные системы переживают одиночные события — «замороженные случаи», которыми также определяются эволюционные пути. Противостояние между случаем и неизбежностью усиливается, поскольку в большинстве природных систем не всегда легко различить, что есть что. Почему один редкий минерал образуется, а другой нет? Почему у Земли такой большой спутник? Почему на Земле появилась разумная жизнь? Было это случайностью или неизбежностью?

В минералогии мы теперь можем до поразительно высокой степени снять это противостояние количественным путем. Мы пришли к выводу, что, хотя многие аспекты минералогии Земли детерминированы, случай также играет

существенную роль. Наши редкие минералы образуются в результате практически невероятной последовательности химических, физических и биологических процессов. Следовательно, Земля абсолютно и однозначно уникальна в космическом пространстве. Возможно, это и хорошо.

Землеподобные планеты⁷⁰

В науке не много тем, привлекающих столько же внимания, сколько открытие и описание планет за пределами Солнечной системы — невидимых миров, расположенных на расстоянии нескольких световых лет от нашего Солнца. В стремлении человечества узнать, одиноки ли мы во Вселенной, астрономы отслеживают едва заметные колебания и периодические уменьшения силы света той или иной далекой звезды, т. е. признаки того, что на ее орбите находится планета, пусть и слишком слабая, чтобы ее можно было увидеть непосредственно в телескоп.

Первыми были открыты далекие гиганты массивнее Юпитера, которые с бешеными скоростями проносятся по орбитам вокруг своих ближайших звезд в течение несколько дней, таким образом вызывая максимально возможные звездные возмущения. Но, когда мы отмечали 20-ю годовщину обнаружения первой планеты вне нашей Солнечной системы, фокус внимания сместился с громадин на миры, более похожие на Землю.

Термин «землеподобные» имеет различный смысл для разных людей. Астрономы фокусируются на трех характеристиках, которые они могут уверенно измерить: это радиус, масса и орбита. Радиусы землеподобия вычисляются на основании максимального уменьшения силы света звезды, когда планета затемняет крошечную ее часть, а массы — исходя из степени звездного колебания,

вызываемого гравитационными эффектами. Но этого недостаточно: чтобы планета получила звание землеподобной, ее орбитальные параметры должны соответствовать нахождению в обитаемой зоне — сплюсненном в форме пончика пространстве, где жидкая вода может удерживаться на поверхности планеты или рядом с ней. Все больше открытых планет — Kepler-186 f, Kepler-438 b, Kepler-452 b (их определили по данным космического телескопа «Кеплер») — укладывается в рамки этих астрономических ограничений. Как и минимум три из семи планет, вращающихся вокруг небольшой звезды TRAPPIST-1, что всего в 40 световых годах от Солнца. Почти каждый месяц заголовки в СМИ возвещают об обнаружении «самой землеподобной планеты».

Но обычно в этих легкомысленных статьях даже не упоминается, что одни только радиус, масса и орбита довольно плохие индикаторы потенциальных планетарных близнецов Земли. Чего здесь не хватает, так это химии. Видимые световые спектры далеких звезд — сведения, которые легко получить посредством современных телескопов, — показывают, что звезды сильно различаются по своему химическому составу. В некоторых звездах намного больше или намного меньше магния, или железа, или углерода, чем в нашем Солнце. И вероятно, эти важные различия в составе звезд в значительной степени отражаются и на составе их компаньонов-планет, потому что они формируются из тех же протопланетных дисков.

Химический состав планет имеет значение. Недавние исследования минералогов и геохимиков указывают на то, что даже небольшие отклонения в нем могут сделать планету непригодной для жизни. Если будет слишком много магния, не запустится движение плит — главный локомотив круговорота необходимых для жизни питательных веществ. Если не хватит железа — не сформируется магнитное

поле, защищающее жизнь от смертоносных космических лучей. При недостаточном количестве воды, или углерода, или азота, или фосфора не зародится жизнь в той форме, которую мы знаем.

Так что — каковы наши шансы найти другую Землю? Поскольку ключевых химических элементов набирается более десятка да плюс еще множество менее значимых, вероятность воспроизвести все основные параметры химического состава мала: разве что одна из 100 или, может быть, даже из 1000 землеподобных планет будет похожа по составу на Землю. Тем не менее при осторожной оценке количества подобных Земле по радиусу, массе и орбите планет в 10^{20} , должно существовать бесчисленное множество таких миров, как наш.

Это осознание может привести нас в замешательство. Найти планетарных соседей, похожих на нас, землян, — это вполне человеческое желание, аналогичное тому, как мы ищем друзей и любимых, которые разделяют наши вкусы, политические взгляды и религиозные убеждения. Но наткнуться на кого-то, кто подобен нам во всех отношениях — одевается так же, имеет ту же профессию и хобби, использует точно такие же характерные фразы и язык жестов, — было бы немного жутковато. Ровно так же, мне кажется, нас несколько выведет из равновесия обнаружение планеты-клона, неотличимой от Земли.

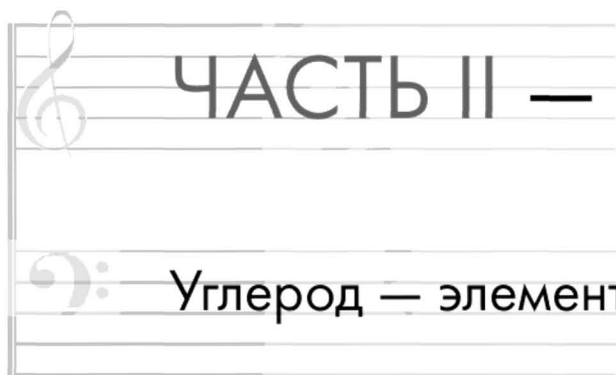
Но не нужно волноваться, этого не произойдет. Поэтому, находясь в смелом поиске все более подобных нашему дому планет, мы можем быть абсолютно уверены, что есть только одна планета, поистине идентичная Земле.

КОДА — Вопросы без ответов

Углерод, этот феерически разносторонний элемент Земли, поведал нам многое о нашем мире. Мы зарегистрировали сотни углеродсодержащих минералов из десятков тысяч мест. Мы научились производить тысячи синтетических аналогов этих минералов, многие из которых еще ждут своего промышленного или технологического применения. Мы даже частично предсказали, какие еще неизвестные минералы углерода можно обнаружить в земной коре и гораздо, гораздо глубже в недрах нашей планеты.

Однако все то, что мы знаем о земном углероде, меркнет по сравнению с тем, чего мы еще не знаем. Какие новые необычные минералы ожидают нас в коре, в гораздо более глубоких слоях? Каковы структуры и свойства этих неизвестных соединений? Как они могут повлиять на нашу жизнь? Сколько углерода скрыто в глубинах планеты, если 99% его может быть сосредоточено в ядре Земли? Мы, ученые, с энтузиазмом продолжаем поиск ответов. В грядущие десятилетия нас поглотят эксперименты, размышления и наблюдения за миром природы.

Мы также не имеем пока представления о том, как углерод перемещается из одного резервуара в другой, особенно при движении из глубоких недр на поверхность и обратно. Для этого нам придется посмотреть на небеса — защитный воздушный покров Земли — и на углерод, элемент глобальных циклов.



ЧАСТЬ II — ВОЗДУХ:

Углерод — элемент глобальных циклов

*Земля обрамляет нашу жизнь. Именно на Земле мы
выращиваем культуры,
Строим дома, проживаем жизнь и хороним умерших.
Углерод в своих бесконечно разнообразных кристаллических
формах, в богатстве своего минерального царства
и в открытиях новых материалов представляет суть Земли.*

*Земля не существует в изоляции. Твердую Землю
окружает, обволакивает мягкая, легкая, невесомая сфера,
называемая Воздухом.
Воздух появляется как ребенок Земли. Газы
из вулканических ран выходят в небо — прозрачный
голубой защитный покров.
Воздух защищает нас от ужасающей пустоты космоса,
сохраняя температуру нашей планеты и поддерживая жизнь.
Но вызванные человеком изменения, возможно, влияют
на Воздух неизвестным пока образом.*

*Изумление и беспокойство — конфликтующие чувства,
которые мы испытываем, размышляя о прошлом,
настоящем и будущем нашей планеты.*

ИНТРОДУКЦИЯ — До воздуха

Углерод циклично перемещается от одной сферы Земли к другой в бесконечном танце. Атмосфера, гидросфера, биосфера, литосфера — все содержат свою долю шестого элемента и все участвуют в глобальном цикле углерода. Так происходило на протяжении более чем 4,5 млрд лет, хотя природа и масштаб цикла за это «глубокое время» изменились и многие подробности перемещения углерода остаются скрытыми из вида.

Сегодняшняя Земля — знакомый нам «бело-голубой мраморный шарик»*, живой мир, — мало напоминает планету в ее детстве. Юной Земле, ее разрушенному каменистому ландшафту не хватало обволакивающей колыбели воздуха. Наш дом был рожден из пыли — широко разлетевшейся и разреженной и едва ли являющейся тем материалом, из которого вы бы решили создать приличную каменистую планету¹. Но космос располагает огромным количеством пыли, а пыль имеет тенденцию скапливаться (если вы время от времени убираете за шкафом или под кроватью, вам это хорошо известно). Так вот, по мере того как Прото-солнце разгоралось, посылая внутрь Солнечной системы

* Имеется в виду знаменитая фотография земного шара, сделанная 7 декабря 1972 г. экипажем космического корабля «Аполлон-17» и названная The Blue Marble. — *Прим. науч. ред.*

облагораживающие импульсы тепла, первичная пыль переплавлялась в крошечные капли, называемые хондрами, как уже говорилось выше. Когда эти липкие капли стали объединяться, родилось первое поколение космических каменных тел. Из пыльной туманной среды образовались галька размером с виноградину, булыжники размером с кулак и более крупные камни, соизмеримые с автобусами или даже зданиями. Вокруг слабого молодого Солнца вращались бесчисленные камни, сталкиваясь и группируясь в более крупные зарождающиеся миры.

Во всем этом солнечном царстве господствовала гравитация. Большие массы неумолимо притягивали меньшие, захватывая их в свои гравитационные колодцы и проглатывая целиком, слизывая подчистую свободные космические пончики. Вращаясь на расстоянии 145 млн км от все еще растущего Солнца, Протоземля оказалась самой крупной из этих соревнующихся планетезималей. Какое зрелище должна была представлять собой зарождающаяся Земля! Более 4,5 млрд лет назад на растущий мир, который станет нашим домом, падали дождем бесчисленные камни. Несясь быстрее пули, эти камни при каждом столкновении выделяли кинетическую энергию, которая преобразовывалась в обжигающее тепло и ослепительный свет, разбрызгивая огромные фонтаны раскаленной магмы высоко над огненно-красной расплавленной поверхностью. В растущую раскаленную сферу подбрасывались неровные куски железо-никелевого сплава, горы силикатов, огромные пушистые, насыщенные водой снежки и отдельные черные, обогащенные углеродом каменные глыбищи.

Грандиозные физические процессы с понятными лишь избранным названиями — аккреция и дифференциация, фракционирование и конденсация, кристаллизация и конвекция — преобразовали новорожденную Землю,

представлявшую собой похлебку из всякой всячины, в более «целесообразный», химически упорядоченный земной шар. Дифференциация под управлением гравитации привела Землю в состояние слоеного структурированного мира, самые плотные компоненты которого — главным образом смесь расплавленных железа и никеля — погрузились в центр, чтобы сформировать ядро. Углерод, возможно, все еще играл некоторую роль в той глубокой и полностью недоступной области, сглаживая огромную разницу в плотности между ядром и мантией и изменяя физическое состояние того скрытого царства, но мы даже близко не представляем себе деталей этой истории. Однако можем быть уверены, что углерод ядра, если он на самом деле присутствует там, на глубине более 5000 км, не играет особой роли в воздухе, которым мы дышим.

Толстая каменная мантия Земли окружает железное ядро, как сочная мякоть персика — его твердую косточку. Минералы, насыщенные более легкими элементами — кремнием, магнием и кислородом, преобладают в верхних 3220 км Земли. При экстремальных условиях в самой глубине мантии, где давление превышает 1 млн атм, мантийные породы плотнее, нежели их близповерхностные эквиваленты. Тем не менее эти породы «плавают» по поверхности гораздо более плотного жидкого металлического внешнего ядра, подобно тому как галька легко плавает по лужице плотной жидкой ртути.

Прерывистое, частично отражаемое прохождение высокоскоростных звуковых, или сейсмических, волн сквозь твердую породу указывает на наличие большего количества скрытых слоев. В направлении от ядра к поверхности Земли мантия разделена на три широкие сферические зоны. Почти недоступная нижняя мантия простирается вниз с глубины примерно 670 км до границы ядра и мантии на глубине

почти 2900 км и занимает более половины объема Земли. Переходная зона средней плотности — слой Голицына — образует сравнительно узкую оболочку на глубинах от 410 до 670 км, а верхняя мантия доходит почти до поверхности Земли.

Внешние оболочки Земли — кора, океаны и атмосфера — ее тончайшие зоны, вроде скорлупы на яйце. В совокупности они занимают менее 160 км при 6371-километровом радиусе Земли и содержат в себе только порядка 1% ее массы. Зато эти поверхностные слои отличаются наибольшим химическим разнообразием, так как концентрируют многие из тех редких элементов, которые не находят удобного кристаллического дома в более глубинных минералах. Эти внешние слои также самые разнообразные по толщине. Океаническая кора простирается местами всего лишь на 8–9 км вглубь, в то время как толщина континентальной коры под самыми высокими горными хребтами может составить более 80 км.

Исследовать недра на глубинах более нескольких километров напрямую оказывается не под силу ни одной из современных технологий, но ученые изобрели другие средства, чтобы понять Землю. Мы собираем камни, зачерпываем воду и берем образцы воздуха во время наших экспедиций — полевых работ — на всех континентах, от экватора до полюсов. И каждый уголок земного шара повествует об одном и том же: камни, вода, воздух и жизнь эволюционировали совместно в течение миллиардов лет истории Земли. И каждая из этих материальных сфер является важным местом привала, на который располагается углерод во время своего динамичного глубинного земного цикла.

АРИОЗО — Происхождение земной атмосферы

Атмосфера согревает Землю. Она защищает нас от жесткого солнечного излучения. Она поддерживает нас, обеспечивая кислородом, которым мы дышим, и водой, которую мы пьем. Воздух также хранит огромные запасы углерода, используемого растениями, которые мы едим. Но Земля при рождении и в младенчестве не имела атмосферы. Воздух должен был появиться, вырасти из ничего. Как?

Чтобы узнать это, давайте перенесемся на 4,5 млрд лет назад — в эпоху, когда планеты все еще формировались, Солнечная система пребывала в хаосе, а углеродный цикл Земли только начинал складываться.

Земля получает углерод из космоса

Итак, мы на 4,5 млрд лет в прошлом. Протоземля образовалась как единое целое. Начала формироваться ее многослойная структура, состоящая из ядра, мантии и коры. Вместе с каменным дождем на Землю попали десятки химических элементов, большинство из которых — редкие². В смеси компонентов доминируют несколько минералобразующих элементов: железо, кремний, магний и самый

распространенный из них, дающий 90% общей массы, — кислород. Кальций, алюминий, никель и натрий составляют 90% остального. Прочее богатство Периодической таблицы встречается в меньших количествах — несколько атомов на тысячу азота и фосфора, несколько атомов на миллион лития и фтора и несколько атомов на миллиард бериллия и золота.

Земля и другие планеты земной группы — Меркурий, Венера и Марс — сформировались ближе всех к Солнцу, безжалостный жар которого испарил большинство газов. Потому-то эти каменные внутренние планеты предпочли элементы, из которых могли образовываться твердые минералы. Самые же распространенные элементы космоса — газообразные водород и гелий — были в основном отброшены мощными солнечными ветрами далеко (на расстояние более 0,5 млрд км) от Солнца: в область газовых планет-гигантов Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна.

В космическом масштабе водород и гелий всегда составляют самую большую долю — 99% всех атомов. Из оставшегося 1% атомного вещества, которое формирует каменные планеты, ключевую роль играют атомы углерода. Из атомов, не являющихся водородом или гелием, каждый четвертый — атом углерода. Только железо и кислород более распространены среди планетообразующих остатков. Однако в отличие от железа и кислорода большинство атомов углерода на ранних этапах истории Вселенной оказались заперты в маленьких летучих молекулах — углекислого и угарного газов, а также метана. В результате получилось, что запасы земного углерода скудны, но не понятно насколько: наше наиболее вероятное предположение — не более одного атома на сотню.

Весь углерод Земли пришел из космоса, из трех главных источников. Некоторое его количество было привнесено

солнечным ветром, обогащенным углеродсодержащими газами Солнца. Более заметная доля пришла на Землю в составе черных богатых углеродом метеоритов, которые до сих пор время от времени падают с неба³. Эти удивительные камни доставили сюда также все виды органических молекул: нефтеподобные углеводороды и спирты плюс основные биомолекулы, а именно аминокислоты, сахара, пурины и пиримидины, которые играют существенные роли в ДНК и РНК, — все в собранном виде, готовые к химическим преобразованиям. Но самый важный вклад в растущие запасы земного углерода внесли кометы, исключительно богатые небольшими молекулами газов, в частности угарного и углекислого. Нельзя не упомянуть также, что кометы принесли и огромное количество воды, из которой образовались земные океаны.

Значительная часть этих запасов углерода циркулировала в составе флюидов глубоко под поверхностью, подвергаясь там температурам, достаточным для разделения большого скопления разных атомов на их простейшие молекулярные компоненты — азот, воду и углекислый газ. Так начался круговорот земного углерода. Поскольку горные породы в твердом состоянии не могут долго удерживать горячие, находящиеся под давлением подвижные флюидные потоки, те начали пробиваться к поверхности всевозможными путями. Они продвигались, растворившись в расплавленной породе — раскаленной магме, которая прокладывала себе путь наверх, используя любую трещину или щель. Недалеко от поверхности — возможно, на глубине 1 км или меньше, где давление падает ниже критического значения, — горячие потоки преобразовывались во взрывообразно расширяющийся газ. Подобно шампанскому из откупоренной бутылки, газы и измельченные в порошок камни вырывались наружу, создавая горячие

фонтаны золы и воздуха. В более холодных зонах эти легкие подвижные молекулы также должны были подниматься сквозь кору, находя любой путь и постепенно заполняя огромные пространства покорной Земли. Освобожденная при этом вода стала первыми океанами, а газы — первым воздухом.

Никто не знает состава первичной атмосферы Земли⁴. Химически нейтральный газ, который доминирует в нынешнем воздухе, — изначально азот в форме молекул N_2 с небольшой примесью аргона — безусловно, присутствовал с самого начала. Атмосфера Земли должна была подождать более 2 млрд лет, пока не накопится благотворный для жизни химически активный кислород O_2 , другой ее главный современный компонент. В первоначальной смеси должны были содержаться и зловонные вулканические, содержащие серу газы, такие как сероводород (H_2S) и сернистый газ (SO_2). В раннюю атмосферу Земли вошли также газы, насыщенные углеродом.

Углерод атмосферы сконцентрирован в составе трех простых молекул. Углекислый газ CO_2 в наши дни заслужил множество публикаций в прессе (в большей их части он плохой). Это простая молекула — атом углерода в ней встроен в середину аккуратного ряда между двумя атомами кислорода. При низких температурах внешнего космоса углекислый газ, замерзая, может образовывать чистые бесцветные кристаллы, известные как сухой лед. На Земле CO_2 — доминирующий в атмосфере углеродсодержащий газ. Его концентрация составляет, согласно последним измерениям, 400 частей на миллион и продолжает повышаться с каждым годом.

Вдали от звезд и планет, в глубоком космосе, где изолированные атомы находят друг друга лишь изредка, единственный атом кислорода может соединиться с единичным

атомом углерода в угарный газ CO — одну из самых распространенных молекул космического пространства. Угарный газ всегда был второстепенным компонентом атмосферы Земли — менее одной части на миллион в воздухе, которым мы дышим сегодня. В нашей повседневной жизни угарный газ представляет реальную опасность, потому что он легко образуется при неполном сгорании углеродных видов топлива. При сгорании такого топлива углерод всегда соединяется с кислородом, но если перекрыть поток воздуха к вашей печи или камину, то кислорода для образования углекислого газа окажется недостаточно и ваш дом наполнится угарным газом. Последствия станут катастрофическими.

Угарный газ коварен, потому что он бесцветный и не имеет запаха, вследствие чего наши тела принимают его за кислород O_2 . Но, в отличие от кислорода, который мы быстро усваиваем при вдохе, угарный газ блокирует человеческое дыхание. Нехватка кислорода вызывает медленную потерю сознания. Мозг умирает, а затем умираете вы.

Третья простая углеродсодержащая молекула в атмосфере Земли — это метан CH_4 , который вы оплачиваете как «природный газ», когда готовите еду или отапливаете свой дом. Это изящная маленькая молекула с центральным атомом углерода, окруженным пирамидой из четырех атомов водорода. Современная атмосфера Земли содержит лишь следы метана — всего две части на миллион, но, как мы увидим, этого достаточно, чтобы были последствия.

Воздух — пуск остановлен

В каком-то смысле все равно, смесь чего была в самой древней земной атмосфере, поскольку в одно шокирующее мгновение почти 4,5 млрд лет назад защитное воздушное покрывало нашей планеты оказалось стерто с лица Земли.

В самой глубокой древности история атмосферы Земли была наполнена драмой. Огромные вулканы выбрасывали из глубоких недр пар и воздух даже в те времена, когда из космоса дождем сыпались обогащенные летучими веществами кометы. По мере того как толщина окутывающего планету газового слоя увеличивалась, на атмосферу обрушивались удары гигантских камней из космоса, время от времени разрушая внешние границы Земли. Эти стремительные космические камни, диаметр которых иной раз доходил до сотни километров, возможно, крушили и перемешивали внешние слои Земли, но были не в состоянии остановить неуклонную дифференциацию тверди, воды и воздуха.

Но одно столкновение стало исключительным — гораздо большим по площади и намного более разрушительным, чем любое другое событие в истории Земли. В течение десятков миллионов лет, в те времена, когда планеты Солнечной системы образовывались и соревновались за орбитальное пространство, у Земли был достойный соперник планетарных масштабов — имя ему дали Тейя в честь древнегреческой богини, матери Луны. Будучи, возможно, крупнее Марса, но гораздо меньше все еще растущей Земли, Тейя боролась за то же орбитальное пространство, что и наша планета. Какое-то время — может быть, даже несколько десятков миллионов лет — Земля и Тейя исполняли свой опасный танец на расстоянии. Прохождение же поблизости друг от друга, вероятно, вызвало смещение их орбит-близнецов, что привело к неизбежной последней дуэли⁵.

Законы гравитации, диктующие эволюцию солнечных систем, гласят, что две планеты никогда не могут делить одно орбитальное пространство. В какой-то точке они подойдут слишком близко друг к другу, и, когда это произойдет, уверенно делайте ставку на более крупный объект.

В один трагический день — наша планета тогда была еще младенцем около 50 млн лет от роду — Тейя ударилась о Землю. Некоторые модели этого события предполагают прохождение по касательной. Но даже этот почти скользящий удар оказался фатальным для Тейи. Итогом стало ее полное уничтожение: будь у этого планетарного спектакля космический свидетель, наблюдающий с безопасного расстояния, его бы заворожило зрелище того, как Тейя развалилась на части и в основном испарилась, раскаленная добела в смертельных муках.

Вам вполне можно простить, если, наблюдая такую катастрофу, вы бы и не заметили, что еще одной жертвой столкновения стала разреженная атмосфера Земли. Все молекулы воздуха были вытеснены, главным образом выброшены глубоко в космос, чтобы никогда больше не вернуться к уже выигравшей поединок третьей от Солнца планете. Более заметным оказалось огромное светящееся облако испарившихся от удара горных пород — смесь раскаленных обломков мантий Тейи и Земли. Значительная доля этого месива упала обратно в омывающий Землю океан магмы в виде проливных дождей из раскаленных докрасна расплавленных капель. Оставшаяся часть улетела на орбиту, чтобы вскоре собраться в спутник Земли Луну*.

Пришло время начинать все сначала. Гигантская кнопка перезагрузки, при нажатии которой образовалась Луна, также запустила заново и образование атмосферы Земли. И вот тогда-то глубинный углеродный цикл заработал всерьез.

* В мае 2020 г. в журнале *Science Advances* вышла статья японских исследователей, в которой авторы подвергают сомнению предлагаемую в книге теорию происхождения Луны как раз в связи с регистрируемыми выбросами ионов углерода с поверхности нашего спутника. См.: Shoichiro Yokota, Kentaro Terada, Yoshifumi Saito, Daiba Kato, Kazushi Asamura et al. "KAGUYA observation of global emissions of indigenous carbon ions from the Moon" *Science Advances*. Vol. 6, no. 19, eaba1050. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba1050>. — Прим. ред.

Подсказки о самой древней атмосфере Земли

Процесс формирования атмосферы происходил более 4 млрд лет назад. Геологи недаром называют неустоявшиеся первые полмиллиарда лет Земли гадейским эоном*. Если бы вы отважились оказаться на той обновленной поверхности Земли, у вас бы создалось непреодолимое ощущение неумолимо жестокой и враждебной среды. Сложно сказать, чего стоило опасаться больше — непрекращающегося каменного дождя с неба или беспощадного взрывного вулканизма из глубины. Тем не менее два этих бедствия в совокупности доставили в воздух углерод и запустили углеродный цикл Земли. Новая атмосфера буквально пролилась с небес и изверглась из глубин.

Есть ли у нас возможность узнать природу той эфемерной атмосферы, которая окутывала Землю более 4 млрд лет назад? С тех далеких времен до сегодняшнего дня дожили лишь редкие бесценные микроскопические песчинки отдельных минералов, а также совсем небольшое количество горных пород возрастом более 3,5 млрд лет, сохранившихся в удаленных регионах Австралии, Канады, Гренландии и Южной Африки. Но эти разрозненные кусочки ничего не могут рассказать о природе древнего воздуха.

Тем не менее подсказки о древнем воздухе существуют. О том, что же там могло быть, нам намекают три линии свидетельств от трех разных научных областей — астрофизики, геохимии и планетологии.

* Гадес (Аид) — в греческой мифологии бог подземного мира, царства мертвых. — *Прим. науч. ред.*

Согласно принятой в России геохронологической шкале этот эон называется «катархей». — *Прим. ред.*

Подсказка №1 — Слабое молодое Солнце⁶

Первая раскрывающая суть подсказка о гадейской атмосфере Земли пришла из источника, кажущегося не очень-то вероятным: от физиков, которые изучают эволюцию звезд. Специалисты по астрофизике звезд сообщают нам, что Солнце, как и многие другие звезды, находится сейчас в середине периода стабильности. В течение этого периода, продолжающегося миллиарды лет, звезды наслаждаются спокойствием, размеренно потребляя водород, который в реакциях ядерного синтеза преобразуется в гелий. Взгляните на ночное небо. Девять из каждых десяти звезд, которые вы видите, сжигают водород в реакциях ядерного синтеза, при этом лишь доля процента их водородной массы преобразуется в тепло и свет. Результат этих реакций — именно то, что мы видим и ощущаем как солнечный свет.

Но тут есть загвоздка. Сжигающие водород звезды меняются так медленно, что их сияние остается неизменным долгое время. Изменения невозможно заметить не то что за сотни — за миллионы лет. Тем не менее за миллиарды лет Солнце стало гораздо ярче. Более 4 млрд лет назад наша звезда излучала только 70% сегодняшней мощности. Это огромная разница; если бы такое уменьшение излучающей энергии Солнца произошло в наши дни, оно имело бы немедленные и катастрофические последствия. Земля бы замерзла, лед распространился от полюсов к экватору. Жизнь почти прекратила бы свое существование, остались бы только небольшие локальные колонии простых организмов, впившиеся в теплые влажные зоны рядом с горячими вулканическими жерлами.

В размышлениях о временах того слабого Солнца 4 млрд лет назад нам бы следовало удивляться, как это Земле удалось не покрыться льдом. Те несколько минералов и каменных

обломков, которые дожили до нашего времени с первого полумиллиарда лет Земли, определенно не указывают на замерзший мир.

Самым правдоподобным объяснением представляются парниковые газы. Аналогично тому как теплица у садовника может оставаться теплой даже в холодные зимние дни, некоторые атмосферные газы обладают способностью поглощать и захватывать солнечную энергию, уменьшая количество тепла, излучающегося обратно в холодный космос. Водяной пар и облака всегда были частью парникового баланса; сегодня на Земле они отвечают почти за половину жизненно важного парникового эффекта, который сейчас не дает нашей планете замерзнуть. Но одних только молекул воды недостаточно, чтобы компенсировать слабость молодого Солнца. Чтобы захватить достаточно тепла, Земля нуждалась в других молекулах — углеродсодержащих.

Подсказка № 2 — Геохимия

Если более 4 млрд лет назад Земле не давали стать замерзшей планетой большие запасы парниковых газов, то где они сейчас? Геохимики, проводящие глобальную инвентаризацию химических элементов Земли, указывают на распространенные сегодня на всех континентах огромные залежи карбонатных минералов, которые не образовались бы в таком изобилии 4 млрд лет назад. Между карбонатами и атмосферным CO_2 долгое время существовало равновесие: каждая молекула карбоната в коре — это минус одна молекула углекислого газа в воздухе. Вывод таков: 4 млрд лет назад, когда карбонатных минералов было меньше, большая часть углерода сидела взаперти в молекулах CO_2 атмосферы, а давление воздуха, возможно, в несколько раз превышало нынешние значения.

Некоторые геохимики подозревают в этом сценарии небольшую проблему: они считают, что насыщенная углекислым газом атмосфера была основательно дополнена метаном — газом, который мог быть гораздо более распространен в атмосфере до того, как 2,5 млрд лет назад в ней вдруг резко увеличилось содержание кислорода. Метан — это мощный парниковый газ, каждая молекула которого во много раз эффективнее молекулы CO_2 . Это изобилие метана могло бы купаться в космических лучах, инициируя различные органические химические реакции и образуя молекулярную дымку, которая, возможно, придавала юному небу Земли отчетливый оранжевый оттенок — такой, как наблюдается на спутнике Сатурна Титане сегодня.

Если бы такая плотная атмосферная смесь углекислого газа и метана внезапно окружила сегодняшнюю Землю, климат бы резко изменился, приблизившись к небывалым условиям оранжереи. Это вопрос равновесия. Парниковый эффект необходим для жизни — без него современная Земля замерзла бы от полюсов до экватора. Но слишком много парниковых газов означает, что удерживается слишком много тепла. Есть вероятность, что мы достигнем атмосферного переломного момента, когда потепление будет освобождать все больше и больше метана и углекислого газа из почвы и пород, что в свою очередь приведет ко все большему потеплению: возникшая положительная обратная связь может спровоцировать возникновение необратимого и неконтролируемого парникового эффекта.

Что бы произошло, если бы все карбонатные минералы в земной коре преобразовались в атмосферный углекислый газ? Что бы произошло, если бы этот огромный резервуар с более чем 200 млн млрд т углерода — в 100 000 с лишним раз больше его содержания в современной атмосфере — внезапно превратился в газовый? Ответ очевиден: Земля

стала бы подобна Венере⁷. Венера во многих отношениях является планетарным близнецом Земли — тот же размер, та же плотность и тот же основной химический состав. Но сочетание двух факторов — ее орбиты, расположенной на 40 млн км ближе к ослепительному Солнцу, и плотной существенно углекислой атмосферы, давление которой в 90 раз больше, чем на поверхности Земли, — привело к бесконтрольному парниковому эффекту. Средняя температура поверхности Венеры составляет 480 °C — вполне достаточно, чтобы расплавить свинец.

Возможно, Земле просто повезло. (Поэтому мы и называли свою зону обитаемости планетой Златовласки*.) Если это так, то углерод был главной тому причиной.

Подсказка №3 — Метеориты с Земли⁸

Третья, гораздо более умозрительная, линия свидетельств — метеориты с древней Земли — может выявить тонкие детали ранней земной атмосферы. Эта идея не такая сумасшедшая, как выглядит со стороны. Более сотни метеоритов были идентифицированы как пришедшие с Марса, поскольку, когда столкновения с большими кометами или астероидами разрушают ландшафт Красной планеты, камни с ее поверхности разлетаются во все стороны. Неоспоримым свидетельством того, что эти довольно невзрачные булыжники образовались на Марсе, а не были частью астероида или другого объекта, является характерное сочетание молекул газов, сохранившихся в миниатюрных воздушных карманах. Эта

* Златовласка — героиня популярной английской сказки, аналога русской сказки «Три медведя». «Зоной Златовласки» астрономы называют зону вокруг звезды, в которой возможно существование жизни, т. е. не слишком близко к светилу, где горячо, но и не слишком далеко от него, где холодно. — *Прим. науч. ред.*

смесь точно соответствует соотношению газов, измеренному зондами NASA в марсианской атмосфере.

Итак, представьте себе последствия одного из таких гигантских столкновений астероида с Землей более 4 млрд лет назад. Обломки выбитых с поверхности камней должно было выбросить в космос. Эти куски породы содержат крошечные пузырьки древней атмосферы Земли. А они должны все еще находиться внутри защищающих их минералов. Поэтому все, что нам нужно сделать, — это отправиться на Луну и найти там парочку из бесчисленных тысяч метеоритов с Земли, которые должны были упасть на поверхность нашего светящегося поблизости спутника. На самом деле многие из нас думают, что сбор земных метеоритов — одна из самых веских причин вернуться на Луну и снова пройтись по нашему ближайшему небесному соседу.

Собрать немножко древнего воздуха Земли — это было бы ого-го!

ИНТЕРМЕЦЦО — Глубинный углеродный цикл

 рогуливаясь по сельским холмам Кальдары ди Манциана в Центральной Италии, в окружении лесов, цветов и поющих птиц, вы явно не ожидаете наткнуться на предупредительные знаки, украшенные черепом со скрещенными костями и извещающие вас о смертельной опасности? Что это может быть? Забор под напряжением? Стрельбище? Бродячие медведи?

А затем вы вступаете в небольшую долину — безжизненную низину, полосу оголенной почвы, ярко контрастирующую с зеленой возвышенностью. Что здесь происходит?

Источник этой опасности — углекислый газ. Он течет из земли, невидимый, бесцветный... Будучи тяжелее воздуха, CO_2 прижимается к земле, заполняя низины. Когда дует ветер, он не страшен. Поток подземного газа быстро и без неприятных последствий рассеивается. Но в спокойный безветренный день этот более плотный углекислый газ в высокой концентрации вытесняет воздух, которым можно дышать, запуская смертельный сценарий. Жертвами становятся охотники. Их собаки, поскольку они ближе к земле, падают замертво первыми. Если охотник мчится на помощь своему верному спутнику и наклоняется к пораженному животному, его тоже может подстеречь смертельная опасность, о которой он и не ведает.

Углерод перемещается. Как компонент мигрирующей океанической земной коры, он погружается с освещенной солнцем поверхности в глубокие недра в процессе субдукции. А как важный компонент глубинных мантийных флюидов, он высачивается из породы или почвы и выбрасывается из извергающихся вулканов. Атомы углерода сначала осаждаются в виде твердых горных пород из океанов и воздуха, а потом выветриваются из этих твердых пород, чтобы вернуться в океаны и воздух. Однажды высвободившись, атомы углерода омывают Землю в неторопливых океанических течениях и дрейфуют по земному шару в составе изменчивой атмосферы. В то же время живые клетки — от микробов до растений и людей — снова и снова используют атомы углерода, причем со скоростью, которая намного превосходит циркулирование шестого элемента в любом известном неживом мире. Редко найдешь атом углерода, который хоть на недолгое время оставался бы исключенным из этого глобального круговорота длительностью 4,5 млрд лет.

Описанные выше итальянские насыщенные углекислым газом вулканические эманации — убивающие время от времени собак и их хозяев — выходят, когда из глубин поднимается раскаленная углеродсодержащая магма. Какие-то порции этой магмы взаимодействуют с погребенными толщами карбонатных минералов, которые распадаются под действием высокой температуры, при этом происходит смешение углекислого газа мантии и коры. И это тоже часть большого углеродного цикла Земли — цикла, который создал атмосферу и продолжает ее пополнять.

У всех химических элементов Земли есть циклы, и углерод не исключение. Цикл углерода — главная тема ознакомительных курсов и научно-популярных веб-сайтов — это совокупность различных резервуаров атомов углерода, а также перемещений этих атомов между резервуарами¹⁰.

Поищите словосочетание «изображения углеродного цикла» на YouTube, и поиск выдаст вам океаны и атмосферу, известняк и ископаемое топливо, животных и растения — все с маленькими стрелочками, показывающими, как углерод движется от одного резервуара к другому. К некоторым из этих изображений также добавлен дымящийся вулкан, намекающий на более глубокие процессы, но глубинный углерод Земли — основной источник атмосферного — редко рассматривается подробно.

Причины такого пренебрежения легко понять. По сравнению с быстрым оборотом углерода возле поверхности Земли глубинный цикл этого элемента медленный. Пройдет много миллионов лет, прежде чем атом углерода погрузится глубоко в недра планеты и снова вернется на поверхность, а подробности этих процессов остаются во многом скрытыми и непонятными. Никто не знает, сколько углерода там, внизу, нет у нас и никакой определенности по поводу разнообразных форм, которые он принимает.

Что нам действительно известно — так это грандиозный глобальный механизм, посредством которого углерод циркулирует из воздуха глубоко в Землю и обратно. Черные базальты и другие породы, выстилающие дно земных океанов, — холодные и плотные, плотнее, чем горячая мягкая мантия под ними. Когда огромные плиты океанической земной коры опускаются в процессе субдукции на сотни километров, неся с собой слои осадочных отложений и базальта, насыщенные карбонатными минералами и разлагающимися органическими остатками, побеждает гравитация. Углерод неумолимо уносится с поверхности, погружаясь все глубже и глубже в недоступные недра Земли.

Если бы перемещение поверхностного углерода происходило только таким образом, без пополнения его резервуаров, земная кора могла бы полностью лишиться шестого

элемента за несколько сотен миллионов лет. Понесшая такую утрату, зависимая от углерода биосфера разрушилась бы. К счастью для нее, то, что уходит вниз, потом поднимается вверх. Когда насыщенные углеродом субдуцирующие породы нагреваются, карбонатные минералы и органические вещества начинают распадаться на углекислый газ и другие небольшие молекулы. Некоторые из них освобождаются из своих каменных гробниц, образуя восходящие флюиды, которые меняют курс и поднимаются к поверхности Земли. Извергающиеся вулканы — самые очевидные места высвобождения этих глубинных газов, но еще больший их поток может быть связан с широко распространенным рассеянным просачиванием глубинного углерода из недр в воздух, пусть даже объем его сложно оценить — и поэтому он до сих пор не определен.

Понимание этого глобального углеродного цикла, который в основном сокрыт от глаз, было одной из основных целей Обсерватории глубинного углерода с самого ее основания¹¹. Это насыщенная и разнообразная работа, в которой участвуют сотни ученых, решающих разноплановые и бросающие нам вызов проблемы на полевых станциях и в лабораториях по всему миру. Целью их исследования активного глубинного углеродного цикла являются ответы на три вопроса: что уходит вниз? Что происходит с углеродом там, внизу? Что возвращается обратно вверх?

Что уходит вниз?¹²

Подавляющее большинство атомов углерода на Земле — более 99,9% — погребено под поверхностью и заперто на миллионы лет в коре и мантии. Многие атомы углерода хранятся в огромных слоистых залежах известняка, иные — в похороненной биомассе угля, нефти или еще каких-то черных

насыщенных углеродом отложениях. А подвижная доля этого скрытого углерода заключена в базальтах и осадочных отложениях дна океанов, погружающихся глубоко в мантию Земли в зонах субдукции.

Как же так получается, что атомы углерода с изменчивой, залитой солнцем поверхности Земли, некогда столь подвижные в воздухе, или в океанах, или в живых клетках, оказываются запертыми в твердом камне, неумолимо уходящем вглубь? Дело в химических реакциях — как абиотических, так и связанных с жизнью. Об абиотических идет речь, когда углекислый газ атмосферы и океанов с готовностью вступает в реакции с атомами кальция и магния в только что излившемся вулканическом базальте и других породах, образуя карбонатные минералы. Эти реакции обычно проходят невидимо для глаз глубоко в океане или под почвами, но там, где поверхностные воды богаты кальцием или магнием, время от времени можно наблюдать, как кристаллы карбонатов растут в реальном времени, по мере того как углекислый газ жадно забирается из воздуха.

Жизнь научилась этому приему — создавать карбонатные минералы — сотни миллионов лет назад. Какое-то время карбонатная биоминерализация происходила исключительно в мелких прибрежных водах, рядом с надежными источниками питательных веществ для минералов. Кишащие кораллами, моллюсками и другими несущими раковины животными массивные рифы, простиравшиеся на сотни километров, пленили огромное количество углерода. Когда клетки погибали и захоранивались на суше или в море, атомы углерода обособливались в биомолекулах и продуктах их распада.

Жизнь за свою историю, хорошо задокументированную в окаменелостях и осадочных отложениях, где они упокоились, неоднократно наблюдала драматические изменения

в природе и размахе углеродных захоронений. Расцвет фотосинтезирующих водорослей 2,5 млрд лет назад, вероятно, вызвал первый крупный всплеск накопления биомассы в отложениях, когда водорослевые маты, цветущие в мелких, пронизанных солнечным светом водах, умирали и погружались на дно океана. Появление карбонатных раковин более полумиллиарда лет назад внесло свою лепту в запасы углерода, захороненного на дне моря.

Новые повороты подповерхностного углеродного цикла связаны с жизнью, которая вышла на сушу более 400 млн лет назад. Деревья и другие растения содержат много углерода; когда они захораниваются, то образуют толстые залежи насыщенных углеродом торфа и угля. Корневые системы, будучи сами составной частью глубокой, скрытой биосферы, разрушают твердые горные породы, превращая их в глинистые минералы. Мельчайшие чешуйчатые частицы глины, настолько крохотные, что их трудно разглядеть даже в самый мощный оптический микроскоп, вырабатывают поверхностные электростатические заряды, которые притягивают и связывают биомолекулы. В силу этого поверхности глин покрываются насыщенной углеродом пленкой. Ставшие углеродсодержащими глинистые минералы вымываются из почвы, уносятся потоками и реками и в конечном счете прибывают в океаны, где формируют толстые осадочные дельты. Похоже, земная биосфера нашла множество способов захоронить углерод.

Двести миллионов лет назад, примерно в то время, когда на суше начиналось владычество динозавров, еще одну уловку для задержания углерода придумали микроскопические организмы¹³: свободно плавающие в земных океанах клетки развили способность создавать себе тончайшие защитные карбонатные пластинки, извлекая углекислый

газ и кальций из окружающей их среды. Этот смысленный планктон с карбонатным покрытием, в огромных количествах населяющий воды океана и осаждающийся на его дно после смерти, заметно поменял правила игры. Впервые в истории Земли карбонаты начали образовываться в освещенном солнцем приповерхностном слое глубочайших океанов, а не только на рифах вдоль побережья. Эти мертвые клетки, погружающиеся на океаническое дно, стали источником погребенного углерода в тех отложениях, в которых до этого не было карбонатных минералов.

Последствия «среднемезозойской революции», как называет то событие геолог Энди Риджуэлл из Бристольского университета, весьма серьезные. До того как 200 млн лет назад началась эта революция, жизнь создавала карбонаты исключительно на мелких континентальных шельфах; протяженные известняковые рифы росли или уменьшались в зависимости от изменчивого уровня моря. В более теплые времена, когда глобальное оледенение было минимальным, а уровень моря — относительно высоким, на широких затопленных прибрежных равнинах могли формироваться очень крупные рифы. Такой усиленный рост карбонатных кораллов и раковин уменьшал концентрацию кальция в океанах — ключевой фактор, определяющий изменчивость кислотности морской воды.

В более холодные периоды — с широким распространением полярного льда и оледенения, когда уровень моря был необычно низким, а континентальные шельфы в основном находились на воздухе, — реализовывался противоположный сценарий. В это время не могло образовываться много рифов. Поскольку биологические способы производить известняк отсутствовали, кальций в морской воде накапливался до состояния пересыщения, заодно меняя и химию океанов. Риджуэлл делает вывод, что химический состав

океана на протяжении последних 200 млн лет поддерживался карбонатообразующим планктоном, процветающим независимо от уровня моря.

Земной углерод в огромных количествах извлекается из воздуха и воды и постепенно захоранивается в земной коре. Вулканические породы вступают в реакцию с углекислым газом, образуя карбонатные минералы. Биогенные карбонаты слагают рифы на окраинах континентов и сыплются на дно в открытом океане. Биомасса захоранивается на суше и в море, а глинистые минералы поглощают фрагментированные биомолекулы и еще добавляют углерода накапливающимся осадочным залежам. Все эти углеродные потоки несложно увидеть и измерить.

Менее наглядна та доля погребенного углерода, которая продолжает свое путешествие вниз, погружаясь глубоко в мантию в процессе субдукции. Попытки измерить изменчивый вклад субдуцирующего углерода полностью захватили Терри Планк из Обсерватории Земли Ламонт — Дорти Колумбийского университета¹⁴.

Стиль поведения Планк — спокойный и безмятежный, и вам ни за что не догадаться о ее полной яркой событийной карьере или «гранте для гениев», полученном ею от фонда Макартуров. Вулканы интересуют исследовательницу как окна в мир глубинного углеродного цикла. Пытаясь понять, что же из них извергается, Планк решила каталогизировать углерод и другие химические элементы океанической коры — изучить тот материал, который затягивается в мантию при субдукции. Сравнивая элементы-примеси в опускающихся плитах с извергающейся магмой, она в поразительных подробностях смогла показать, что эта переработанная кора и есть главный компонент многих вулканических систем.

Количество уходящего в мантию углерода остается спорным вопросом. Планк считает, что ответ во многом зависит от того, куда именно вы смотрите. «Одни зоны субдукции получают много карбонатов, другие — нет, одни — много органического углерода, другие — мало», — замечает она. Также исследовательница делает вывод, что доставка углерода в глубины Земли может быть весьма сложным процессом. Карбонаты и биомасса не такие плотные, как базальт, и имеют тенденцию накапливаться в верхних слоях погружающейся плиты — в той части, которая вряд ли сильно опустится в глубокие темные недра. Планк делает вывод: «Субдукция углерода зависит от случая».

Короче говоря, то, «что уходит вниз», содержит много углерода, отложившегося в коре в виде биомассы и карбонатных минералов, причем значительная его часть, похоже, возвращается обратно наверх. Но самый завораживающий и загадочный этап углеродного цикла — это приключения той доли шестого элемента, которая предпринимает долгое глубокое путешествие в мантию Земли.

Что происходит с углеродом там, внизу?

По мере того как влажные плиты, погружаясь, уносят богатые углеродом минералы и черную биомассу все глубже и глубже, температура становится все выше. Биомолекулы распадаются на более мелкие фрагменты — в основном углекислый газ и метан. Карбонатные минералы также распадаются, отпуская углеродсодержащие молекулы в горячие водные флюиды. Глубинный углерод никогда не остается в одиночестве. Он всегда смешивается с кислородом и водородом; обычно в этой смеси присутствует также некоторое количество натрия, хлора, серы и других элементов.

Вот в чем, однако, загвоздка. Понимание того, что происходит с углеродом в мантии, зависит в первую очередь от понимания того, как ведет себя вода при высоких температурах и давлениях. Но десятилетие назад, когда Обсерватория глубинного углерода только начинала свою работу, вода в мантии была *terra incognita*. Никто не знал в точности свойств H_2O в условиях экстремальных температуры и давления на глубине сотен километров.

Неизвестным параметром — причем единственным, блокирующим наш путь вперед, — была диэлектрическая постоянная воды, величина ее полярности. Молекулы воды принимают V-образную форму. Центральный атом кислорода соединяется с двумя атомами водорода, расположенными, как уши у Микки Мауса. Водородная сторона молекулы несет положительный электрический заряд, а кислородная заряжена отрицательно, в результате получается полярная молекула. Многие наиболее характерные свойства воды — в частности, ее способность растворять поваренную соль и целый ряд других химических веществ, легкость формирования дождевых капель, твердость льда, капиллярные процессы в стеблях растений — как раз результат этой полярности. Диэлектрическая постоянная — это величина силы разделения на положительный и отрицательный заряд, которая диктует поведение воды.

Мы знали, что диэлектрическая постоянная воды резко меняется в зависимости от температуры и давления, но в начале смелого проекта DCO мы не знали насколько. Без этих сведений было невозможно вычислить основные аспекты глубинных флюидов, например растворимость соли, электрические заряды растворенных молекул или кислотность растворов. Не было возможности также спрогнозировать поведение углерода или любого другого растворенного элемента в мантии Земли. В итоге на майском семинаре 2008 г.,

который положил начало DCO, было сделано публичное заявление о необходимости восполнить этот пробел в наших знаниях¹⁵. Автором заявления стал Димитри Сверженски, профессор геохимии в Университете Джонса Хопкинса.

Речь Сверженски продолжалась всего пять минут, но она произвела сильное впечатление. Вскоре состоялся ланч, и за стол рядом со Сверженски села Изабель Даниэль, профессор геохимии из Лионского университета — 1*. Ее думы тоже были захвачены свойствами мантийной воды, и она поделилась свежими данными о поведении карбонатных минералов в воде при экстремальных температурах и давлениях — сведениями, которые давали намек на диэлектрическую постоянную воды. Объединившись, Сверженски и Даниэль составили впечатляющий план исследований, который убедил DCO выделить часть ресурсов на изучение глубинной воды. Десятилетие спустя их инициатива привела к революции в нашем понимании глубинного углерода.

Глубинная вода

Определение диэлектрической постоянной воды при высоких давлениях и температурах мантии Земли — сложная задача, требующая усилий и на теоретическом, и на экспериментальном фронте. Исследования 2012 г., проведенные Джулией Галли и ее аспирантом Дином Пэном на базе Калифорнийского университета в Дэвисе, затрагивали теоретическую часть¹⁶. Используя квантово-механическую модель, ученые рассчитали, что диэлектрическая постоянная воды растет до давления в 100 000 атм — значение, при котором

* В настоящее время Лионский университет имеет три самостоятельных подразделения, каждое носит свое имя (имени Клода Бернара, имени братьев Люмьер, имени Жана Мулена), но принято также называть их по номерам — 1, 2 и 3 соответственно. — *Прим. ред.*

карбонатные минералы, стабильные в земной коре, начинают растворяться в мантии. Этот важный результат указывает на то, что именно растворенный в воде углерод и может оказаться основным фактором глубинного углеродного цикла.

Тем временем Изабель Даниэль и ее группа в Лионе решили экспериментально проверить расчетные данные Галли. Используя замысловатую нагретую ячейку с алмазными наковальнями, исследователи определили, как карбонатные минералы растворяются в мантийных условиях¹⁷. Эксперименты и расчеты дали весьма сходные результаты, и это указывало на непредвиденные ранее сложности в поведении глубинного углерода.

Модель глубинной воды Земли

Вычисление значения диэлектрической постоянной воды в условиях мантии стало лишь началом понимания скрытого глубинного углеродного цикла. Новые оценки диэлектрической постоянной нужно было ввести в общую модель флюидов при высоких температурах и давлениях. Создателем этой вдохновляющей модели, получившей название «Глубинная вода Земли» (*англ.* DEW, от Deep Earth Water), и стал Димитри Серженски¹⁸.

Мало кто оказал столь же глубокое влияние на мою карьеру ученого. Мы со Серженски впервые встретились более двух десятилетий назад в кампусе Университета Джонса Хопкинса, в его тихом офисе с окнами, выходящими на лесной ручей. Я обратился к нему за помощью, чтобы разобраться в сложном поведении биомолекул, взаимодействующих на поверхностях минералов, — непростой вопрос, который может оказаться чрезвычайно важным для понимания происхождения жизни. Он заинтересовался, но предусмотрительно оговорился, что разработанная им теория

взаимодействий на поверхностях минералов хорошо подходит для отдельных, похожих на мячи, атомов металлов, а в решении гораздо более сложной проблемы молекул, с их сложными трехмерными формами, он еще не преуспел.

Перенесемся в 2006 г., когда уже сам Сверженски связался со мной. Он разобрался с проблемой молекулярной адсорбции, ему предстоял годичный творческий отпуск, и он хотел провести его в моей Геофизической лаборатории. Я был в восторге. Мы организовали лабораторию по изучению поверхностей минералов и следующее десятилетие радовались стабильному потоку прекрасных студентов, десяткам исследовательских работ и достаточному государственному финансированию. И по ходу дела мы оба оказались глубоко вовлеченными в проект DCO¹⁹.

Мы с Димитри Сверженски быстро подружились — эта симпатия объяснялась, в частности, взаимной любовью к музыке. Сын «великого Сверженски», самого обожаемого преподавателя фортепиано по всей Австралии, он родился и вырос в Сиднее. Димитри — необыкновенный ученый. Скромный в своей сути исследователь с тихим голосом, он при этом блестящий творец, дотошный и скрупулезный, а еще Димитри весьма сдержан и не склонен к преувеличениям. Однако не будет преувеличением сказать, что его модель DEW сияет в венце главных достижений DCO — это успех, который продолжит приносить плоды еще долгое время по окончании программы²⁰.

Базирующиеся на модели DEW открытия, которые делаются во все возрастающем темпе, раскрывают поразительные факты о глубинном углеродном цикле Земли. Согласно предыдущим моделям, глубинные флюиды представляли собой просто смесь воды и углекислого газа, но Сверженски обнаружил, что атомы перестраиваются и формируют новые типы молекул, растворенных в сложном подземном

супе. Многие из них — это ионные формы с положительными или отрицательными электрическими зарядами; следовательно, карбонатные минералы растворяются подобно соли, пуская в оборот углерод на глубине.

Также Сверженски убедительно продемонстрировал, что мантия Земли — это фабрика для синтеза органических молекул на основе углерода, тех молекул, что должны были сыграть свою роль в происхождении жизни²¹. При определенных условиях в глубинах Земли образуется уксусная кислота, но, если температура или кислотность поменяются, в смеси станут преобладать природный газ и другие углеводороды. Недавние эксперименты, которые провела Изабель Даниэль, дают понять, что образуются гораздо более крупные углеродсодержащие молекулы, в том числе и экономически значимые компоненты нефти. Все эти результаты указывают на богатую и сложную глубинную органическую химию, о которой мы только сейчас начинаем узнавать.

Самое поразительное открытие Димитри Сверженски связано с происхождением алмазов, которые, как все думали, образуются, когда атомы углерода подвергаются экстремальному давлению, а вода в этом процессе не играет особой роли²². Работая с аспирантом Фан Хуаном, Сверженски обнаружил, что алмазы столь же легко образуются в водных мантийных флюидах вообще без какого-либо изменения давления. В действительности к появлению кристаллов алмаза приводит простое повышение кислотности находящегося под давлением обогащенного водой раствора. На самом деле процессы, которые соответствуют ранее необъяснимым картинам роста природных драгоценных камней, — циклы роста и растворения алмаза — могли вызываться естественными колебаниями кислотности глубинной воды.

Эти и другие открытия указывают нам на активную область на глубине немногим более 100 км под нашими

ногами — скрытое царство химических процессов, которое миллиарды лет играло важнейшую роль в глубинном углеродном цикле Земли. Но как мы можем убедиться в этом? Какими доказательствами на поверхности Земли могут подтвердиться смелые утверждения Сверженски?

Загадка глубинного метана²³

Одно из самых дерзких и многообещающих открытий DEW — наглядная демонстрация того, что метан может в огромных количествах подниматься из мантии Земли, формируя гигантские резервуары в коре. Геологи в других частях света, особенно в России и Украине, долгое время настаивали на глубинном абиотическом происхождении большей части природного газа и других углеводородов. Однако многие геологи-нефтяники Соединенных Штатов и других нефтедобывающих регионов были категорически против этого представления: они указывали на большие резервуары, однозначно образовавшиеся из погибших растений, животных и микробов. Некоторые из нас долгое время подозревали, что этот спор, возможно усиленный враждой холодной войны и профессиональным соперничеством, является ложной дихотомией. Не исключено, что оба лагеря правы и метан может образовываться по-разному. DCO надеялась исследовать оба варианта.

Как нам проверить эти две соперничающие гипотезы происхождения метана — глубинное абиотическое против поверхностного биотического? Какая доля метана, если она вообще есть, образуется в результате химических процессов в горячей мантии в противоположность микробиологической активности гораздо более холодной коры? Как мы сможем распознать разницу? Разве все молекулы метана не одинаковы?

Все молекулы метана действительно имеют формулу CH_4 , но оказывается, что С и Н образуют пары с разными «изюминками» — разными изотопами, которые делают исследование метана намного более интересным. Вспомните, что углерод, у которого всегда ровно шесть протонов (это уникальная характеристика углерода, которая отличает его от любого другого элемента), может иметь шесть или семь нейтронов, чтобы образовывать более распространенный углерод-12 (также пишут ^{12}C) или несколько более тяжелый углерод-13 (^{13}C). У водорода — первого элемента Периодической таблицы — всегда один протон, а нейтронов обычно нет. Однако примерно один из 6420 атомов водорода в океанической воде имеет-таки один нейтрон в более тяжелом изотопе водорода — дейтерии, который обозначается D.

Порядка 99 из каждых 100 молекул метана содержат один атом углерода-12, окруженный четырьмя обычными атомами водорода. Это самая естественная форма метана. Примерно одна молекула из 100 обладает более тяжелым углеродом-13, и только одна из 1500 содержит один атом дейтерия. Все становится еще увлекательнее, когда два тяжелых изотопа замещаются, образуя или $^{12}\text{CH}_2\text{D}_2$, или $^{13}\text{CH}_3\text{D}$. Таких редких «дважды замещенных» молекул метана буквально одна на миллион. Так что, если вы тоже считали варианты, мы приходим к существованию пяти разновидностей метана, отличающихся изотопами.

Потрясающая новость для ученых DCO заключается в том, что прояснить происхождение метана могут как раз соотношения этих разных сочетаний изотопов. Важную роль в этих соотношениях играет температура, а также биологическая история образца. Теоретики предполагают, например, что метан, образовавшийся при более высокой температуре, будет содержать немного больше $^{12}\text{CH}_2\text{D}_2$, а в метане, образованном микробами, обычно относительно мало $^{13}\text{CH}_4$ ²⁴.

Чтобы узнать побольше о происхождении метана, все, что нам нужно сделать, — это измерить соотношения пяти разных его видов в любом образце.

Ключ к тайнам метана — его молекулярная масса. У каждой из пяти разновидностей метана она своя, немного отличающаяся от других. В теории мы могли бы измерить массы миллионов отдельных молекул метана, чтобы определить их относительное количество и таким образом узнать их происхождение. На практике это не так-то просто.

Многие лаборатории обычно определяют распространенность $^{12}\text{CH}_4$ и $^{13}\text{CH}_4$, которые различаются по массе примерно на 6%. Это относительно легкое лабораторное исследование. Но, когда мы в 2008 г. основали Обсерваторию глубинного углерода, еще не было методов измерения крошечного количества $^{12}\text{CH}_2\text{D}_2$ или $^{13}\text{CH}_3\text{D}$ в образце; это представляло огромную техническую проблему, поскольку две редкие разновидности метана отличаются друг от друга по массе менее чем на 0,01%. Никакой существующий на тот момент инструмент не обладал достаточной чувствительностью для проведения подобных измерений, так что еще в самом начале программы мы решили создать новый прибор.

Руководство взял на себя Эдвард Янг из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе, а работал он с инженерами британской компании Nu Instruments из Рексема в Северном Уэльсе²⁵. Разработчики использовали традиционный подход на базе масс-спектрометрии, которая основана на разделении разных видов молекул метана с помощью магнитов. Метод заключается в том, чтобы ионизировать метан — поместить электрический заряд на каждую молекулу для ее ускорения в электрическом поле, а затем изменить траектории этих ускорившихся молекул с помощью мощного магнита. Более тяжелые молекулы метана перемещаются медленнее и отклоняются слабее, нежели их менее массивные компаньоны.

Янг с коллегами довели эту технологию разделения по массе до предела возможностей. Чтобы достичь требуемых разделения и чувствительности, они разместили пару больших изогнутых металлических пластин и трехтонный магнит в тандеме, породив этим чертовски сложную проблему для ионной оптики. Магниты, электромагнитные линзы и фильтры нужно было выстроить таким образом, чтобы ионизированные молекулы $^{12}\text{CH}_2\text{D}_2$ и $^{13}\text{CH}_3\text{D}$ пролетели через вакуум по изогнутой траектории и поразили различные цели. Получившаяся в итоге машина размером с комнату, названная «Панорама», оказалась очень рискованным предприятием, стоившим Эду Янгу и его коллегам нескольких лет работы и более 2 млн долларов. Но это сработало²⁶.

Шестого ноября 2014 г. ученые DCO провели в уэльском центре разработки первый успешный эксперимент, в котором одновременно определили молекулы $^{12}\text{CH}_2\text{D}_2$ и $^{13}\text{CH}_3\text{D}$. «Панорама» прекрасно выделила два крошечных изотопных пика из образца промышленного уэльского угольного газа. Вскоре прибор перевезли в Калифорнию; первые исследования природных образцов и первые публикации появились в 2015 г. Некоторые из нас немного нервничали по поводу больших вложений, но Эд Янг оставался невозмутимым. «Я знал, что это сработает», — вспоминает он. Эд относится к «Панораме» философски: «Люди любят говорить, что хорошая наука не должна зависеть от приборов, но время от времени прорывы в инструментарии продвигают нас вперед в нашей науке. Я думаю, разработка этого инструмента как раз такой случай».

Лазеры

Несмотря на то что DCO поддерживала разработку «Панорамы», мы подстраховались. Сюей Оно, только

что назначенный ассистент-профессором в Массачусетском технологическом институте и специалист по работе на традиционных масс-спектрометрах, в течение нескольких лет пытался разработать радикально новый вид измеряющей изотопы техники, основанный на лазерной спектроскопии²⁷.

Сюхей научился объяснять принцип квантово-каскадной лазерной спектроскопии лаконично, всего в нескольких элегантных слайдах в PowerPoint. Молекулы газа вроде метана поглощают узкополосный свет сотен различных длин волн. Это является следствием точно настроенных колебаний электронов. На определенных гармонических частотах будут резонировать как струны скрипки, так и электроны атомов. Эти длины волн чрезвычайно чувствительны к изотопному составу молекулы. Замените ^{13}C на ^{12}C или D на H, и резонансы сильно изменятся.

Используя мощный настраиваемый лазер, Оно полагал, что сможет вычислить отношение нормального метана к $^{13}\text{CH}_3\text{D}$. Если бы ему удалось измерить интенсивность поглощенного света достаточно чувствительным спектрометром, который разделял бы характеристические длины волн разных видов метана, то у нас появилась бы альтернатива в выборе инструментария. Более того, лазерная установка гораздо дешевле и ее можно в конечном счете уменьшить до сравнительно портативной версии, возможно даже такой, которая могла бы слетать когда-нибудь на Марс.

На бумаге идея была отличной, но разработка новых приборов требует денег, а традиционные спонсирующие организации как-то неохотно инвестировали в неопробованное спектроскопическое устройство. В 2012 г. DCO выделила Сюхею скромный грант в 100 000 долларов. Этого было недостаточно, чтобы создать новый инструмент, но оказалось достаточным стимулом, чтобы привлечь других людей. За год Сюхей создал свой прибор и получил первые результаты.

Устройство работало даже лучше, чем он себе это представлял. Острые пики позволяли разделить изотопные разновидности метана, а интенсивность этих пиков соответствовала относительным количествам. Теперь в нашем распоряжении имеются две взаимодополняющие техники и исследования изотопов в небольших молекулах газа идут полным ходом. Новые результаты по кислороду и углекислому газу уже опубликованы, а перспективы постижения Земли и ее углеродного цикла никогда еще не казались такими ясными.

По мере того как поступает все больше данных, приходит понимание, что история метана сложна и полна нюансов²⁸. Некоторые образцы — преимущественно биотические и холодные, другие — глубинные и горячие. Но многие пробы метана, в том числе полученные из столь разных источников, как нефтяные скважины, глубоководные микробы и коровы, показывают распределение пяти разновидностей метана, предполагающее неравновесное смешение газа из разных источников. Это уже не вызывает у нас недоумения, поскольку мы в DCO сейчас понимаем, что изотопные варианты метана и многих других небольших молекул могут раскрыть такое богатство сведений о глубинном углероде, которое раньше и вообразить не могли.

Что возвращается обратно наверх?

Значительная доля углерода, уходящего вниз, в мантию Земли, в конечном счете возвращается обратно наверх. Некоторая его часть — в виде активных молекул углекислого газа — рассредоточенно просачивается наружу сквозь большие пространства суши над глубинными зонами, в которых тепло или флюиды медленно высвобождают углерод из горных пород. Земная кора выдыхает метан. Скрытые

и зачастую не отмеченные на карте залежи богатого метаном льда, частично погребенные в арктической многолетней мерзлоте, а частично (этих еще больше) залегающие среди осадочных отложений континентальных шельфов, высвобождают метан, когда тают при нагревании. Также небольшое количество метана вырабатывают микробы, термиты и коровы. Углекислый газ как побочный продукт метаболизма выдают на-гора все животные, которые дышат воздухом. Но перечисленные источники едва заметные и скромные даже на местном уровне, их сложно измерить и учесть в глобальном масштабе. Зато вулканы, в свою очередь, извергают очень много насыщенных углеродом газов.

Гора Этна на восточном побережье Сицилии — самый большой в мире точечный источник углекислого газа, выпускающий в среднем около 5000 т CO_2 в день, с отдельными выбросами, приближающимися к 20 000 т в день во время крупных извержений²⁹. Такое интенсивное выделение газов — следствие разложения плотных толщ известняка, сквозь которые проходит лава Этны.

Однако и многие другие вулканы — даже те, которые находятся далеко от карбонатных пород, — выпускают в воздух сотни тонн CO_2 в день, причем бóльшая часть этого углекислого газа образовалась в глубокой мантии. Все вулканы в совокупности, скорее всего, являются самым большим природным источником углекислого газа в атмосфере. Но насколько большим?

Вулканический углерод

Все вулканы вырабатывают углекислый газ, когда бурлят и выпускают пар, — одни меньше, другие больше. Но сколько всего CO_2 выбрасывается в небо? А скорость выхода постоянна или это что-то вроде обогащенной

углеродом вулканической икоты? И когда образуется больше углерода — при медленном и стабильном фоновом высвобождении или при случайном взрывном событии? Учитывая значение, придаваемое углекислому газу в воздухе, особенно той роли, которую играет человеческая деятельность в изменении состава атмосферы, не лучше ли нам узнать, чем же являются вулканы — преобладающим источником или просто всплесками на фоновом уровне?

С самого своего основания Обсерватория глубинного углерода предпринимала согласованные на глобальном уровне попытки регистрации выбросов вулканических газов. Ученые DCO поддерживали разработку новых приборов — легких портативных газовых сенсоров с круглосуточным радиослежением, лабораторных инструментов для химического и изотопного анализа газа и даже чувствительных к углероду дронов для доступа к опасным и удаленным местам. Скоординировав экспертов со всего мира, они учредили проект DECADE (Deep Earth Carbon Degassing)³⁰. DECADE объединил усилия с международным научным проектом NOVAC (Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change) — объединением местных организаций, которые оснастили исследовательской техникой более 40 вулканов на пяти континентах³¹. Увязать цели и интересы правительств на пяти континентах нелегко, но ставки в игре по мониторингу вулканов очевидны и высоки.

Достоверно измерить количество CO_2 , выбрасываемого вулканом, чрезвычайно сложно. Прежде всего потому, что атмосфера уже содержит около 400 молекул CO_2 на миллион, так что вклад вулканов заключается в лучшем случае в скромном локальном увеличении повсеместно высокого фона.

* Упомянутые проекты можно перевести как «Дегазация глубинного углерода Земли» и «Сеть наблюдения за вулканическими и атмосферными изменениями» соответственно. — *Прим. ред.*

Более того, вулканические газы весьма изменчивы. Они выбрасываются толчками снизу, кружат и носятся туда-сюда вместе с ветрами. В таких условиях прямые измерения общего CO_2 , поступающего из действующего вулкана, почти невозможны.

Гораздо более надежную оценку общего выбрасываемого углекислого газа можно получить, измерив соотношение CO_2 и еще одного газа — сернистого (SO_2), который в значительном количестве (и *очень* зловонно) выделяется из многих вулканов³². В общем и целом в земной атмосфере немного SO_2 , так что здесь нет соревнования с фоновым содержанием. Более того, SO_2 создает сильный сигнал поглощения, поэтому гораздо легче измерить общую эмиссию этого газа да к тому же измерения можно делать даже со спутников. Иными словами, если вы сможете определить соотношение молекул CO_2 и SO_2 рядом с вулканом плюс общее количество SO_2 , вам будет несложно вычислить количество углекислого газа, выбрасываемого этим вулканом.

Установить на действующий вулкан приборы отслеживания газа может быть непросто и опасно. Ядовитые выбросы горячего газа, обжигающие потоки лавы, кипящие озера и летящие во все стороны вулканические бомбы — обычные для такого вулкана явления. Чтобы зафиксировать аппаратуру, вулканологам приходится надевать защитные шлемы и газовые маски. Они тащат тяжелое оборудование и взбираются на самые кромки кратеров, расположенных на вершинах опасных активных вулканических построек. Ученых с их оборудованием испытывают на прочность ветер, другие погодные условия и едкие вулканические газы. Экспериментальная станция DCO на Вильяррике в Чили была уничтожена во время извержения вулкана в марте 2015 г. Через год были также уничтожены приборы на краю кратера вулкана Поас в Коста-Рике, но они успели послать данные

о стократном увеличении выбросов CO_2 за несколько дней до извержения.

Вулканы непредсказуемы: они могут спать спокойно долгое время — годы, десятилетия, а затем начать извергаться с внезапной яростью. Вулканологи стекаются в эти опасные зоны, особенно во времена повышенной активности. Неудивительно, что вулканология — одна из самых смертельно опасных областей науки. Небольшое сообщество вулканологов, состоящее всего из нескольких сотен исследователей, понесло более 20 утрат в период между 1980 и 2000 гг.

Спросите вулканолога, и он расскажет вам истории о погибших друзьях. Дэвид Джонстон из Геологической службы США погиб в возрасте 30 лет утром 18 мая 1980 г., когда его наблюдательный пост в 9 км от кратера вулкана Сент-Хеленс* накрыло огромное извержение³³. Его последними словами, переданными по радиосвязи, были: «Ванкувер! Ванкувер! Вот оно!». В тот роковой день Джонстон сменил на дежурстве своего коллегу Генри Гликена, 11 лет спустя тоже погибшего — при извержении вулкана Ундзэн в Японии. Его убил взрыв раскаленных газа и пепла, также унесший жизни французских вулканологов Кати и Мориса Крафт³⁴. Извержение вулкана Галерас в колумбийских Андах 14 января 1993 г. оказалось еще более смертоносным³⁵. В полевой экспедиции, которая должна была стать основной темой конференции по вулканологии, шестеро ученых и их спутники погибли под валом раскаленных булыжников, лавы и пепла, образованным внезапным извержением. Руководителя экспедиции, сорокалетнего Стэнли Уильямса из Университета штата Аризона, также чуть не убило. Один из летящих булыжников сломал ему обе ноги и почти оторвал правую ступню. Второй

* Расположен в штате Вашингтон, США. — *Прим. науч. ред.*

камень — размером с бейсбольный мяч — разбил ему череп, да так, что фрагменты кости застряли глубоко в мозге.

Почему же вулканологи отваживаются ступить на эти смертоносные территории, хорошо зная, что каждый их шаг в тени действующего вулкана может стать последним? Они вам это объяснят не колеблясь. Вулканы представляют собой одно из самых поразительных природных зрелищ, позволяющих заглянуть в глубокие активные недра Земли. Вулканологам доводится лицезреть самые отдаленные и красивые места на Земле; эти декорации, от которых захватывает дух, для некоторых становятся поистине духовным опытом, способным изменить их жизнь. Но вот что самое здесь важное: умение понимать поведение этих беспокойных гор, прогнозировать их извержения необходимо для более полумиллиарда людей, которые живут в шаговой доступности от действующих вулканов. И в этих поисках ключом является углерод.

Кора против мантии

Вулканолог Мари Эдмондс годами изучает действующие вулканы — а началось ее увлечение в 1980 г. с телевизионной передачи ВВС об извержении вулкана Сент-Хеленс³⁶. «Мне было всего пять лет, — рассказывает она, — но у меня остались яркие воспоминания о рядах поваленных деревьев, вырванных с корнем боковой ударной волной». Подбадриваемая своей семьей и преподавателями, Мари серьезно занималась наукой и музыкой (как концертирующая пианистка). Наука взяла верх, но тогда Эдмондс стала разрываться между изучением Земли и астрономией (Мари хотела стать астронавтом), пока геология не победила в предвыпускной год.

Работая ныне в Кембриджском университете, где в свое время она окончила бакалавриат, а потом получила и степень PhD, Эдмондс ведет жизнь, полную приключений. После

защиты диссертации Мари работала в вулканических обсерваториях на Карибах и Гавайях и участвовала в экспедициях на многие действующие вулканы: пробудившийся в 2004–2005 гг. Сент-Хеленс, извергавшуюся в 2006 г. Августину на Аляске и исключительно опасный Суффриер-Хиллс на карибском острове Монтсеррат. Полевая работа Эдмондс была временами весьма рискованной. Непредсказуемые взрывные извержения Суффриер-Хиллс были достаточно серьезными, но самую большую опасность представляли неисправные вертолеты. «Как-то дверь вертолета, которая была прямо рядом со мной, отвалилась и пролетела в десятке сантиметров от хвостового винта, чуть не задев его. В другой раз один из двигателей заглох. Мы делали много такого, чего я определенно не стала бы делать сейчас, когда у меня есть дети, которые во мне нуждаются!»

В своих изысканиях Эдмондс фокусирует внимание на том, что возвращается обратно вверх. В одном важном исследовании, опубликованном в журнале *Science* в 2017 г., Эдмондс работала с другой выпускницей Кембриджа — Эмили Мейсон (которая сейчас готовится к получению степени PhD), изучая углерод, выбрасываемый отдельным семейством островодужных вулканов — цепочки вулканических островов, которые формируются там, где сталкиваются две океанические литосферные плиты³⁷. Когда в зоне субдукции одна плита ныряет под другую, влажные погребенные породы нагреваются, частично плавятся и образуют магму, которая поднимается, выстраивая изогнутую линию вулканов; примером этого служат Алеутские острова на Аляске. Эта цепочка длиной в 1770 км включает в себя десятки вулканов, иные из которых извергаются чуть ли не каждый год. Все эти величественные пики испускают углекислый газ. Эдмондс и Мейсон захотели узнать его источник.

Исследовательницы сосредоточили свое внимание на изотопах. Я о них уже много говорил выше. Тяжелый углерод, в котором содержание углерода-13 выше среднего, происходит из карбонатных минералов, которые разложились до CO_2 под действием тепла. Более легкий углерод образовался, вероятно, биологическим путем — посредством разложения некогда живых клеток. Но сами по себе изотопы углерода не дают полной картины, поскольку все тяжелые карбонаты выглядят одинаково, будь то подвергшиеся субдукции, а затем вновь поднявшиеся из глубин, или гораздо более поверхностные, которые случайно оказались на пути горячей магмы.

Эдмондс и Мейсон решили проблему глубины происхождения карбонатов, взглядевшись в изотопы гелия: более легкий гелий-3 приходит из мантии Земли, тогда как гелий-4 сконцентрирован скорее в коре. Во многих вулканических зонах, включая Италию, Индонезию и Новую Гвинею, исследовательницы обнаружили характерные признаки тяжелого гелия, указывающие на известняк земной коры — т. е. не участвовавшие в субдукции карбонаты — как главный источник извергаемого углекислого газа.

Это очень важный вывод. Если солидная доля углекислого газа, выбрасываемого из вулканов, имеет поверхностное происхождение, тогда получается, что большое количество переработанного на глубине углерода не выходит обратно наверх через вулканы. А значит, в зонах субдукции погружается и изымается из оборота намного больше углерода, чем мы ранее думали. «Мы поймали немного углерода, которого не было в исходном уравнении, — объясняет Эдмондс. — Так что вывод такой: в мантию может возвращаться больше углерода, чем считалось раньше».

Предсказание извержений с помощью углерода³⁸

Сегодня Земля может похвастаться более чем 2000 вулканов, львиная доля которых классифицируется как спящие: это значит, что они время от времени выбрасывали лаву и пепел в течение минувших нескольких тысячелетий, но маловероятно, что снова взорвутся в ближайшее время. Нас больше заботят те 500 или около того действующих вулканов, которые извергаются регулярно: в некоторых случаях это ежедневные залпы пепла и пара, в других — страшные взрывные события раз в сотню-две лет. Они действительно опасны, но человеческая память коротка. Иначе зачем десяткам тысяч людей жить неподалеку от Неаполя в домах, выстроенных по склонам Везувия, — вулкана, который похоронил Помпеи под своим смертоносным пеплом 2000 лет назад? Зачем возводить жилые кварталы прямо по бокам вулкана Килауэа на крупнейшем острове Гавайев, где неумолимые потоки лавы регулярно ровняют с землей шикарные дома — последний раз это произошло весной и летом 2018 г.?

Еще страшнее взрывные извержения ядовитых газов и пепла — пирокластические потоки, которые могут хлынуть вниз по вулканическим склонам со скоростью, близкой к сверхзвуковой. Множество населенных пунктов и мест скопления людей — от жилых домов на Карибских островах и Филиппинах до международного аэропорта Сиэтл/Такома в штате Вашингтон — лежат прямо на пути хорошо описанных пирокластических потоков. Сотни миллионов людей по всему миру живут в смертельно опасных зонах действующих вулканов. Еще несколько сотен миллионов подвергаются более удаленной опасности в виде вулканических газов и пепла, которые влияют на качество воздуха и периодически прерывают авиасообщение.

С учетом столь угрожающих катастроф кажется вполне разумным присматривать за теми вулканами, которые имеют наибольший разрушительный потенциал. Поскольку очень многие из них подают признаки того, что вот-вот извергнутся, за самыми опасными постоянно наблюдают государственные службы и специализированные лаборатории. В набор типичных измерительных устройств входят сейсмологические приборы, распознающие подповерхностные движения магмы, которые предшествуют любому извержению; инклинометры, которые улавливают подъем кровли приповерхностных магматических камер в момент заполнения их расплавом; наконец, температурные датчики, которые регистрируют увеличение теплового потока, когда лава поднимается из глубин.

Вулканы изменяют окружающую среду и другими способами — обеспечивая нас при этом сигналами, которые, возможно, возвещают об извержениях. Одной из таких ключевых подсказок могут быть вулканические газы. Ученые из проекта DECADE обнаружили, что перед многими извержениями в этих газах резко возрастает отношение вулканического CO_2 к сере. Это открытие еще раз подчеркивает взаимосвязанность научных исследований: ученые хотели отследить выделение углекислого газа из вулканов, чтобы понять нечто фундаментальное об углеродном цикле Земли — процессе, который сформировал изначальную земную атмосферу и продолжает формировать ее сегодня, — а в итоге в ходе своих исследований нашли простой и действенный подход к предсказанию вулканических извержений.

Алмазные подсказки³⁹

Алмазы, как редкие большие, так и маленькие, представляют наименьшую долю того углерода, который поднимается

из глубин в процессе вулканических извержений. Однако, поскольку они такие упрямые и непроницаемые, растут в скрытой мантии Земли, а затем выносят признаки условий своего роста на поверхность, истории алмазов о глубинном углеродном цикле уникальны — и им придется рассказать нам эти истории.

Алмазы хранят в себе два убедительных признака циркулирования шестого элемента: газовой-жидкие включения и изотопы. Мы уже говорили о включениях крошечных зеленых, красных и черных минералов в алмазах, но не все включения кристаллические. Мельчайшие запечатанные капли богатых водой и углеродом жидкостей раскрывают природу флюидов, струящихся вниз с поверхности Земли и претерпевающих сложные реакции на глубине. Недавно обнаруженные такие включения подтверждают удивительные теоретические и практические открытия, свидетельствующие о том, что на мантийных глубинах образуются богатые углеродом флюиды новых типов. Причем подобно тому, как не смешиваются между собой нефть и вода, в одном включении могут сосуществовать два очень разных флюида. В алмазах присутствует недвусмысленное доказательство того, что некоторые похожие на нефть углеводороды образуются на глубинах в сотни километров, за пределами царства живых клеток.

Изотопы углерода, из которого состоят алмазы, также содержат указания на удаленные древние источники их атомов. Подавляющее большинство алмазов, возможно 90% проанализированных камней, имеют изотопный состав, типичный для мантийного углерода. Примечательно, что небольшая выборка относительно молодых алмазов (под «молодыми» я имею в виду те, возраст которых не превышает нескольких сотен миллионов лет) образовалась из легкого углерода, который не содержит тяжелый изотоп углерод-13⁴⁰. Для любого образца, найденного вблизи поверхности Земли,

такой признак будет считаться безошибочным свидетельством того, что эти атомы углерода по крайней мере единожды прошли через живые клетки. Но что насчет алмазов, обогащенных легкими изотопами? Они рассказывают ту же историю? Обитали ли когда-нибудь их атомы углерода в живых клетках, некогда погибших и захороненных, а затем погрузившихся в глубокие недра Земли и там преобразовавшихся в драгоценные камни? Вопрос все еще открыт, но «живой» источник углерода во многих алмазах не удивил бы тех из нас, кто начинает видеть отблески необыкновенного глубинного цикла углерода Земли.

Углерод в равновесии

Способ, которым жизнь изменяет глобальный углеродный цикл, по-прежнему в центре внимания. За миллиарды лет Земля, похоже, нашла баланс между тем углеродом, что погрузился глубоко в недра, и тем, что выделяется из вулканов, — это процессы, которые помогают стабилизировать климат и окружающую среду. Но насколько устойчиво это непрекращающееся циркулирование? Нет такого закона природы, который требовал бы, чтобы количество углерода, уходящего вниз, — запертого в горных породах, погребенного в осадочных отложениях и погрузившегося в процессе субдукции в мантию, — было бы точно равно тому количеству, которое возвращается на поверхность при вулканических извержениях или другими, более спокойными способами. Но нет и вопроса более насущного для Обсерватории глубинного углерода, чем этот баланс между тем, что уходит вниз, и тем, что возвращается обратно наверх.

Так в равновесии ли углеродный цикл Земли? Исследования Мари Эдмондс позволяют предположить, что многие зоны субдукции захоранивают большое количество своего

углерода в глубоких недрах. Терри Планк же делает противоположный вывод — обособить углерод посредством субдукции чрезвычайно сложно, это скорее исключение, чем правило. И кто прав?

В 2015 г. двое из наиболее широко мыслящих руководителей DCO — Питер Келемен из Колумбийского университета и Крэг Мэннинг из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе — попытались свести все данные в одну изящную диаграмму глубинного углеродного цикла, своего рода музыкальную фразу глубин Земли, составленную с использованием хрестоматийных численных значений углеродного цикла⁴¹. Эта стильная диаграмма снабжена полдюжиной красных стрелок, каждая из которых представляет собой важнейшие потоки углерода между поверхностью и глубинами, каждая сопровождается одним или несколькими прямоугольниками с величинами этих углеродных потоков в мегатоннах углерода в год. Иллюстрация эта, которая сейчас используется на сотнях семинаров и лекций DCO, стала иконографическим изображением того, сколько нам еще нужно узнать об углероде Земли.

Среди этих стрелок или прямоугольничков нет таких, которые были бы определены точно и однозначно. Келемен и Мэннинг оценивают общий углерод, выделяемый из срединно-океанических хребтов и океанических островных вулканов в диапазоне от 8 до 42 Мт в год; поток из вулканов островных дуг — между 18 и 43 Мт в год. Минимальная оценка количества погруженного при субдукции углерода, который быстро возвращается в кору и воздух, составляет 14 Мт в год, максимальная — почти в пять раз больше. И самое отрезвляющее: подсчитанный результирующий поток углерода с поверхности Земли в глубокие недра варьирует где-то между поразительно высокими 52 Мт в год и практически нулем — ничем!

Мы видим признаки того, что баланс земного углерода может смещаться. За 4 млрд лет наша планета остыла, поэтому карбонатные минералы, которые, вероятно, однажды разрушились под действием близповерхностного тепла, сейчас могут переживать субдукционное погружение при более прохладных современных условиях. Жизнь также меняет это равенство, она продолжает осваивать новые трюки, изолируя углерод в черных сланцах, ракушечнике, угле и планктонном иле. Меняется климат, меняется химия океанов, соответственно, меняются механизмы и скорости движения углерода.

Это просто удачное стечение обстоятельств, что в течение большей части истории Земли общий углерод, уходящий глубоко вниз при субдукции, более или менее уравновешивался тем углеродом, что выходил на поверхность из вулканов и других источников. Следовательно, жизнь никогда не оставалась внакладе, когда ей требовалось найти достаточное количество углерода для толстых водорослевых матов и густых тропических лесов.

Хотя вопрос еще находится в стадии обсуждения и требуется провести намного больше исследований, некоторые ученые приходят к взвешенному заключению, что сейчас этот баланс, возможно, сместился. Благодаря карбонатному планктону в осадочных отложениях океанов накапливается больше углерода, чем в большинстве предыдущих эонов. Некоторая часть этого углерода, возможно, уже начала долгое путешествие в скрытые глубины мантии. Плюс к этому из-за произошедшего за последние более чем 4 млрд лет охлаждения Земли погруженный при субдукции карбонат не так легко разрушается, чтобы произвести тот углекислый газ, который возвращается на поверхность через вулканы. Не все, что уходит вниз, обязательно возвращается наверх. Цифры неизвестны, но большая часть вычислений

указывает на то, что поверхностный углерод, возможно, захоранивается все быстрее и быстрее — со скоростью, которая может истощить территорию жизни всего за несколько сотен миллионов лет. Не теряйте сон из-за этой угрозы, это очень постепенные геологические изменения. Но урок ясен. Углеродный цикл Земли продолжает меняться и удивлять.

Это не значит, что мы можем игнорировать проблемы, связанные с углеродом. Если вы все-таки собираетесь потерять сон из-за изменяющегося углеродного цикла — смотрите не на Землю, а на себя.

АРИОЗО, ДА КАПО — Атмосферные изменения

Когда вы сжигаете что-то — Александрийскую библиотеку, кустарник в Калифорнии, здание в Дрездене, старые газеты, скрипку Страдивари, — неизбежным побочным продуктом будет углекислый газ. Тысячи лет с тех пор, как люди эпохи палеолита научились добывать огонь, наш вид сжигал топливо, чтобы согреть жилище, готовить еду и освещать путь сквозь ночную тьму. Долгое время углеродный «отпечаток» людей — вклад антропогенного углерода в атмосферу — был нейтральным. Мы сжигали дерево и производили углекислый газ, новые деревья поглощали этот углекислый газ и вырастало больше деревьев.

Равновесие начало рушиться с открытием находящегося на глубине богатого углеродом топлива. Некоторые количества торфа, битуминозного каменного угля и нефти использовались тысячелетиями, хотя и не в таких объемах, чтобы существенным образом изменить атмосферный баланс. Промышленная революция, за которой последовали революции в производстве электричества и механизированной транспортировке, — вот что изменило правила игры. Резко возросший спрос на энергию в совокупности с открытием нефти и антрацита наделил бурно развивающееся технологическое общество могуществом, сопровождавшимся процветанием и материальным комфортом.

За последние 200 лет мы добыли сотни миллиардов тонн богатых углеродом угля и нефти⁴². При сжигании этих угля и нефти в атмосферу ежегодно высвобождается около 40 млрд т углекислого газа — в 1000 раз больше, чем дают выбросы всех вулканов мира. Человечество радикально изменило ту часть уравнения, в которой отображается углерод, возвращающийся обратно наверх.

Правда

Нам не следует закрывать глаза на информацию об углероде и его роли в изменении климата. Вот четыре неоспоримых факта⁴³.

Факт первый. Углекислый газ и метан — сильнодействующие парниковые газы. Их молекулы поглощают солнечную радиацию, уменьшая количество энергии, излучаемой в космос. Чем выше концентрации углекислого газа и метана в атмосфере, тем больше солнечной энергии поглощается.

Факт второй. Количество углекислого газа и метана в атмосфере Земли быстро увеличивается. Убедительные доказательства этого поступают из разных источников, но пузырьки газа, вмёрзшие в полярный лед, — километровые образцы ледяных кернов, содержащие миллионы ежегодных слоев льда, — обеспечивают прямое и неопровержимое свидетельство того, что изменения в воздухе произошли недавно. В течение почти всех прошедших миллионов лет концентрация углекислого газа колебалась между 200 и 280 ppm, самые низкие значения приходились на эпизодические ледниковые периоды. В середине XX столетия содержание превысило

300 ppm, возможно впервые за десятки миллионов лет. В 2015 г. уровень CO_2 достиг 400 ppm. Каждый новый анализ показывает все ускоряющийся рост этого критического параметра — он происходит быстрее, чем когда-либо за многие миллионы лет.

Рост содержания атмосферного метана еще более резкий. Миллион лет концентрация метана колебалась между 400 и 700 частями на миллиард (ppb) — опять же в зависимости от периодов наступления и отхода ледников. За последние 200 лет это значение утроилось, взлетев почти до 2000 ppb. Как и в случае с CO_2 , содержание метана сейчас выше и поднимается быстрее, чем когда-либо ранее за прошедшие миллионы лет.

Факт третий. Человеческая деятельность — в первую очередь сжигание миллиардов тонн углеродного топлива ежегодно — является причиной почти всех изменений в составе атмосферы.

Факт четвертый. Земля начала нагреваться более столетия назад. Записи, которые ведутся с 1880 г., показывают, что 12 самых жарких лет за весь период наблюдений приходятся на последние два десятилетия. 2014 г. был жарче, чем любой из предшествующих ему, 2015-й стал жарче 2014-го почти на четверть градуса, 2016-й установил новый рекорд, а 2017-й оказался почти таким же жарким, что и 2016-й. В среднем за первые десятилетия XXI в. стало более чем на 1 °C теплее по сравнению с предыдущим столетием.

Почти все ученые, изучавшие эти убедительные и неопровержимые факты, приходят к одному и тому же однозначному выводу: человеческая деятельность вызывает

нагревание Земли. Заключение это — не чье-то личное мнение или домысел. Оно не обусловлено политикой или экономикой. Это не уловка исследователей, желающих получить больше спонсорской поддержки, или специалистов по окружающей среде, стремящихся завоевать внимание прессы.

Мы не всё знаем о Земле, но эта информация — чистая правда.

Последствия

Удвоение содержания углерода в воздухе и следующее за ним нагревание земного шара за такое короткое время беспрецедентны. Человечество проводит не имеющий аналогов геотехнический эксперимент безо всякой страховки, а нежелательные последствия уже начали проявляться.

С ростом концентрации атмосферного CO_2 предсказуемо и соответственно повысились уровень углекислого газа в океане и — пусть немного, но губительно — его кислотность, изменение которой ослабляет карбонатные раковины и убивает кораллы. Некоторые морские биологи опасаются повсеместного разрушения мелководных морских экосистем.

Рост температуры воздуха и морской воды приводит также к небывалой потере ледникового льда — как высокогорных ледников средних широт, так и льдов полярных регионов. Нам не избежать повышения уровня моря, уже заметного вдоль многих побережий, — возможно, на десятки сантиметров, а возможно, и гораздо, гораздо больше. Подобные изменения глубин не новы. За последний миллион лет уровень моря опускался на 30 и более метров во время по крайней мере десяти эпизодов оледенения, когда чуть ли не 5% воды Земли оказалось заморожено в ледовых шапках и горных ледниках. И порядка десяти раз, когда менее 2%

воды Земли было заперто во льду, уровень моря приближался к современному или был даже выше.

Сегодняшняя проблема заключается в небывалой скорости, с которой исчезают горные ледники и раскалываются шельфы Антарктического ледяного щита. Чем больше льда тает, тем глубже становятся океаны. Повышение уровня моря на 30 м в истории Земли тоже уже было. Но если текущая тенденция сохранится, сотням миллионов человек, живущих в прибрежных регионах, через несколько столетий, возможно, придется переехать. Целые штаты (например, Флорида и Делавэр) и страны (Нидерланды, Бангладеш и некоторые островные государства Тихого океана) могут практически исчезнуть.

Повышение температуры воздуха и океанов влияет еще и на климат. Частота атмосферных осадков меняется, и увеличивается интенсивность суровых штормов. Океанические течения, которые в некоторые части земного шара несут тепло, а другие охлаждают, также могут меняться. В исследовании 2017 г. Дэниел Скотт из Университета Уотерлу (Онтарио, Канада) смоделировал парадоксальный эффект последствий климатических изменений в 21 месте проведения уже минувших зимних Олимпийских игр⁴⁴. В XX столетии все эти территории были холодными достаточно, чтобы гарантировать с 90%-ной вероятностью, что во время проведения Игр температура будет ниже нуля. Модели Скотта прогнозируют, что к 2040 г. девять из этих олимпийских столиц, среди них Ванкувер в Канаде, Осло в Норвегии и Инсбрук в Австрии, окажутся не столь надежными — температура более четверти их зимних дней будет выше нуля. Еще критичнее ситуация в Сочи, столице зимних Олимпийских игр 2014 г., — здесь к 2040 г. температура большей части зимних дней станет положительной.

От разрушительного влияния климатических изменений страдают экосистемы по всему земному шару. Но нет

худа без добра. Жители арктических регионов Гренландии, которые в течение тысячелетия холодными и темными зимними месяцами кормились подледной рыбалкой, теперь наслаждаются водами, открытыми круглогодично. Фермеры Центральной Канады извлекают выгоду из более длинного вегетационного периода. Свободный ото льда Северо-Западный проход между Атлантическим и Тихим океанами способствует ускорению морских перевозок по всему миру. А горнорудные компании с наслаждением разведывают запасы полезных ископаемых там, где впервые за всю человеческую историю на поверхности показались породы, покрытые ранее льдом.

Но есть и иные последствия климатических изменений, которые только тревожат и никому не приносят пользы. Быстрое наступление Сахары в Африке угрожает стабильным некогда поселениям. Арктические биосообщества, условия в которых в течение бесчисленных столетий были слишком холодными для насекомых-вредителей, сейчас — впервые за всю известную нам историю — страдают в июле и августе от роев mosкитов и черных мух. Экозоны ежегодно смещаются на север на несколько километров — быстрее, чем могут приспособиться леса, поля и мигрирующие птицы.

Ученые способны предсказать, а возможно, даже и уменьшить влияние целого ряда из постоянно увеличивающегося списка изменений, вызванных нагреванием планеты. Чего мы не можем прогнозировать и где нам угрожает наибольшая опасность — это критические точки, положительные обратные связи, которые внезапно и фундаментально меняют скорость и последствия изменений⁴⁵. Не исключено, что самый большой риск в этом плане представляет метан — парниковый газ, действующий намного сильнее, чем углекислый. Почти весь метан Земли заперт в ее коре и хранится в виде огромных слоев насыщенного им льда под замерзшей

тундрой и континентальными шельфами. Точное его количество сложно оценить, но эксперты приходят к единому мнению, что запасы метана, заключенного во льдах по всему миру, в сотни раз больше, чем во всех других источниках, а объемы связанного с ним углерода, возможно, превышают общее содержание углерода во всех других видах ископаемого топлива. Тысячи лет этот метан был спящей, погребенной, пассивной составляющей углеродного цикла Земли.

Предельный катастрофический сценарий — критическая точка, мысль о которой заставляет некоторых из нас просыпаться ночью в холодном поту, — глобальная положительная обратная связь метана. Потепление вызывает таяние льда и высвобождение этого газа, что приводит к еще большему потеплению и еще большему таянию. Концентрация метана в атмосфере может повыситься, подняв вместе с собой и температуру. Мы не знаем, наступит ли эта обратная связь, но если да, то ее, скорее всего, уже будет слишком поздно пытаться остановить.

Можете не сомневаться. Что бы мы ни сотворили с планетой, какие бы изменения ни предстояли, жизнь продолжит свое существование, а углерод — свой цикл. Но готовы ли к грядущим изменениям мы?

Решения

Человечество без остановки вываливает огромные количества углекислого газа в небо — его нерегулируемый, невидимый поток представляет собой изменение, равного которому не было за миллионы лет истории до появления человека, т. е. в прямом смысле слова глобальное. Это не ложная тревога. Увеличивающееся количество CO_2 реально, и оно имеет последствия. Те, кто отрицает это, — люди невежественные либо алчные или одновременно и те и те.

Что же делать отдельно взятому человеку? Вести углеродно-нейтральный образ жизни в наше время довольно сложно, поскольку выбросы углерода пронизывают все наше общество и препятствуют многим нашим лучшим намерениям. Вы бы хотели построить гигантскую ветряную турбину для получения экологически чистой энергии? Но весьма вероятно, что в процессе строительства вам придется вырубить гектары зеленых массивов и вылить тонны испускающего CO_2 бетона для фундамента. Предпочли бы водить электромобиль? Но электричество, скорее всего, вырабатывается на электростанции, которая использует ископаемое топливо. Общественный транспорт, органическое земледелие, переработка алюминия, использование многоразовых подгузников вполне достойные способы уменьшить потребление энергии, но они все еще зависят некоторым образом от топлива, основанного на углероде. Независимо от того, где вы живете — в городе, на ферме да практически где угодно между ними, — в любом случае вы, по всей вероятности, производите парниковые газы.

Ученым свойственно быть оптимистами. Невзирая на глобальные изменения, которые могут привести к непреднамеренной катастрофе, мы ищем решения и видим возможности. Один такой оптимист — знакомый нам Питер Келемен. Он работает в уже упоминавшейся заслуженно уважаемой Обсерватории Земли Ламонт — Доэрти, принадлежащей Колумбийскому университету. Расположенная на знаменитых базальтовых утесах в районе Палисейдс-парк неподалеку от реки Гудзон, на противоположном берегу от главного манхэттенского кампуса Колумбийского университета и к северу от него, эта обсерватория — настоящий оазис исследований горных пород, океанов и атмосферы.

Отринув непосредственное соседство с прекрасными каменными образованиями, Келемен направил свой взор

на тысячу километров вдаль, в сторону величественной гористой местности Султаната Оман на Аравийском полуострове. Там, на выжженной солнцем территории, которая нагревается до 60 °С большую часть года, он изучает одни из самых странных горных пород Земли под названием офиолиты — это огромные куски земной мантии, которые должны находиться на глубине десятков километров, но каким-то образом оказались на высоте 3000-метровых пиков.

На первый взгляд Питер Келемен кажется беззаботным человеком. У него мягкая борода с проседью. Старому другу или новому знакомому он непринужденно улыбается, пожимая руку, тон его речи успокаивающий и уравновешенный. Он производит впечатление обычного парня, с которым вы хотели бы вместе прогуляться. Но это первое впечатление может оказаться обманчивым.

Проводить геологические исследования в Омане — занятие не для рядового специалиста. Культура Омана до определенной степени гостеприимна, но полевою геологию местные жители могут воспринять как экспансию. Когда иностранцы копают их земли, это уже вызывает недовольство. А Келемен хочет не просто отбить молотком несколько камней из придорожных обнажений. Он желает пробурить глубокие скважины и поднять километровую колонку породы — это уже критический геологический акт проникновения. Поэтому понятно, что возникают задержки и трудности. Разрешения министров по управлению земельными ресурсами, водными ресурсами и горными работами должны быть требуемым образом представлены и одобрены. Нужно пользоваться услугами местных буровых компаний Омана и платить соответствующие налоги. И поскольку никто никогда не пытался бурить в этих офиолитовых массивах, могут применяться новые правила и законы; по-видимому, никто из властей до конца не знает точно, какие.

Задержки означают, что исследования студентов находятся в подвешенном состоянии, экспедиции откладываются, а поездки планируются, однако потом отменяются. Принимая во внимание подобные бюрократические препятствия, многие ученые сдались бы. Но Питер Келемен настойчив, решителен, и у него есть то, что внешнему миру кажется бесконечным запасом терпения и спокойствия. В итоге после нескольких лет отсрочек Проект бурения в Омане* был запущен и приносит результаты исторического значения⁴⁶.

Исследование Келемена подтвердило кое-что из того, что мы уже знали. Офиолиты гор Омана представляют собой «неожиданный» блок земной мантии, который выдвинуло на лежащую выше базальтовую океаническую кору силами сходящихся литосферных плит. Этим мантийным породам, богатым магнием и кальцием, но практически лишенным кремния, химически некомфортно находиться в прямом контакте с атмосферой Земли. Особенно быстро они «реагируют» на углекислый газ, образуя изящные взаимопересекающиеся белые жилы карбонатов магния и кальция.

Келемен с коллегами обнаружил поистине необыкновенную скорость образования этих карбонатных минералов. Офиолит буквально высасывает углекислый газ из воздуха, создавая новые карбонаты с поразительной проворностью. Вы можете чуть ли не воочию наблюдать, как образуются и растут кристаллы в поверхностных водоемах, когда насыщенные минеральными компонентами подземные воды просачиваются из обнажений. В отличие от многих минералообразующих процессов, которые протекают быстро только при высоких температурах глубоких недр Земли, эти происходят при комнатной температуре (которая, впрочем, в среднем по Оману намного выше, чем в вашей гостиной). Кроме

* Oman Drilling Project. — *Прим. ред.*

того, новые минералы занимают значительно больший объем, чем старые. Возможно, расширением толщ можно объяснить, почему горы Омана все еще растут вверх на несколько миллиметров в год, несмотря на то что там почти нет местной сейсмической активности.

Келемен тут же делает вывод: углекислый газ потребляется горными породами в режиме реального времени. А в Омане объемы офиолитов огромны — их достаточно, чтобы поглотить весь углекислый газ, выработанный человечеством за сотни лет. В наши дни правительство Омана не хочет заниматься всякими там схемами связывания углекислого газа. Основа экономики страны — нефть, а не связывание углерода. Но камни никуда не денутся, и эта перспектива решения углеродного кризиса Земли ждет своего часа. Питер Келемен — терпеливый оптимист.

КОДА — Известное, неизвестное и непознаваемое

Из всей гаммы разнообразных проблем в многогранной науке об углероде нет вопроса более насущного для нашего будущего, нежели роль углерода как элемента циклов. Мы в состоянии измерить углерод в атмосфере с точностью, недостижимой для других резервуаров. С той же степенью достоверности нам удастся регистрировать колебания содержания шестого элемента и его недавно начавшийся тревожный рост. Ведущие роли углекислого газа и метана как парниковых газов и неизбежное потепление в планетарном масштабе, которое должно последовать за увеличением их содержания, — неоспоримы. Хорошо, если призывы отдельных людей и международные соглашения, направленные на снижение последствий и замедление этих изменений, найдут отклик в каждом гражданине мира. Ощущение срочности уже должно поистине пропитывать нашу жизнь.

И все же, несмотря на постоянно пополняющуюся таблицу угрожающих данных по углероду, несмотря на рост доказательств быстрых изменений и их потенциальных последствий, мы еще многого не знаем⁴⁷. Джесси Аусубел, руководивший созданием и развитием Обсерватории глубинного углерода со стороны фонда Слоуна, подчеркивает

предрасположенность ученых погружаться в безопасную науку. «Мы склонны заполнять конференции, журналы и радиоволны тем, что нам известно, — сетует он. — Мы гораздо реже исследуем и расширяем границы наших знаний».

Легко понять, почему научные работники, чья карьера зависит от получения грантов и публикации статей, стремятся исследовать проблемы и проводить эксперименты на безопасных и надежных окраинах известного, а не изучать природу и степень нашего незнания. Но уже от одной только четкой формулировки того, чего мы не знаем, — по ходу прочерчивания границ на карте знаний и планирования экспедиций для изучения этих «великих незнакомцев» — у любого истинного ученого должен участиться пульс.

Каковы границы познания? На какие вопросы легко ответить, на какие — тяжело и почему? Отходя от темы изменения климата и обозревая весь маховик глубинного углеродного цикла Земли за миллиарды лет, Аусубел перечисляет три присущие природе характеристики, которые вычлениют известное, неизвестное и непознаваемое.

«Глубокое время» — первое препятствие к знанию, оно очень хорошо знакомо ученым, изучающим планеты. История блекнет, буквально выветривается у нас из-под ног. Благодаря бесчисленным полевым экспедициям, которые принесли образцы со всего земного шара, и расширяющимся аналитическим возможностям исследовать эти образцы до отдельных составляющих их атомов и молекул, мы можем быть уверены в наших знаниях о том, как менялись близповерхностные условия Земли по крайней мере за последние десятки или даже сотни миллионов лет. Большинство минералов, образовавшихся за этот скромный с геологической точки зрения промежуток времени, сохранились до наших дней. Они содержат крошечные включения воздуха и воды,

которые рассказывают многое о недавней эволюции внешних слоев Земли — атмосферы и океанов.

Но свидетельства более глубокого прошлого — 4 млрд лет назад и больше — практически потеряны для нас. А ведь это крайне важный этап для понимания образования Земли и происхождения жизни. Все минеральные запасы тех изначальных гадейских времен сводятся, как уже говорилось выше, к нескольким зернам размером с песчинку. Не сохранилось ни дуновения древней атмосферы Земли, ни капли океанов. Чтобы сделать необходимые математические вычисления, нам придется довольствоваться умозаключениями и геохимической теорией. И все равно условия на Земле в начале ее существования остаются практически неизвестными, а возможно, так и останутся вовсе непознаваемыми.

Вторым препятствием к получению знаний является глубина. Глубочайшие шахты Земли проникают в недра не более чем на 3 км, самые глубокие скважины едва ли доходят до 13 км. Заглянуть в зоны, лежащие ниже, нам удастся только благодаря вулканам, которые извергают на поверхность глыбы мантийных пород и минералы, в частности алмазы, ряд которых образовался на глубине более 800 км. Эти глубинные породы указывают на природу и интенсивность циркулирования углерода между мантией, земной корой, океанами и воздухом. Но нижняя часть земного радиуса, составляющего почти 6400 км, навсегда останется недоступной — за пределами возможностей любой мыслимой технологии отбора образцов.

Мы можем, конечно, собирать подсказки о глубоких недрах по крохам. Сейсмические волны дают информацию о плотности и составе глубинных пород, а также о зонах плавления и движении. Магниторазведка отражает динамику расплавленного внешнего ядра Земли, в то время

как эксперименты с синтетическими породами и минералами воспроизводят диапазон экстремальных температур и давлений вплоть до тех, что в самом центре Земли.

Мы также в состоянии представить себе технологии будущего, которые позволят немного раздвинуть удручающие границы того, что сейчас, по сути, непознаваемо. Мой любимый футуристический инструмент — «абсорбционная нейтринная спектроскопия», основанная на астрономических количествах субатомных частиц, которые разлетаются от Солнца. Большинство солнечных нейтрино проходят Землю насквозь, но теоретики утверждают, что нейтрино определенных энергий должны избирательно поглощаться разными химическими элементами. Если бы мы смогли измерить энергию нейтрино (чего, по крайней мере пока, мы сделать не силах), тогда нам удалось бы смоделировать подробное трехмерное, как в компьютерной томографии, изображение глубоких недр.

К физическим преградам «глубокого времени» и пространства Аусубел добавляет третье препятствие исследованию неизвестного: проблему понимания и интегрирования отдельных драматических событий в истории Земли. Развивающиеся системы подвергаются внезапным разрушительным процессам, которые необратимо отделяют прошлое от будущего. Такими сингулярностями стали катастрофическое столкновение с Тейей, в результате которого образовалась Луна, когда Земле было всего 50 млн лет, появление жизни несколько сотен миллионов лет спустя и недавнее развитие технологий. Другие, пока не распознанные, менее драматичные критические моменты могли в прошлом и также смогут в будущем привести Землю к дальнейшему развитию по одному из двух еще неизвестных расходящихся путей. Подобные точки бифуркации в силу их природы сложно предсказывать хоть с какой-нибудь определенностью; между

тем они способны представлять собой неотвратимую угрозу для человеческого вида.

Из того ряда признаков, которые, как предполагает Джесси Аусубел, препятствуют открытию неизведанной Земли, три вышеописанных — «глубокое время», глубина недр и случайные единичные катастрофические события — свойственны физической природе нашего планетарного дома. Другие, не менее пугающие, препятствия касаются социального аспекта науки, а также человеческой природы. Наука ограничена тем, что мы можем узнать, поскольку мы, люди, ограничены своими способами постижения мира.

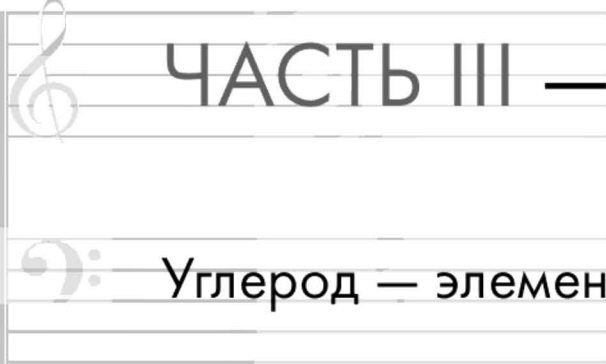
Наша ограниченность возникает из-за того, что мы недалёковидны, наши умы полны предрассудков и «зашорены». Возможно, вы уже заметили, что я минералог. Я рассматриваю почти все грани истории Земли — вулканы, глубокие недра, происхождение жизни, даже Большой взрыв — с искаженной, минералогической точки зрения.

Это относится ко всем нам как в науке, так и в любой другой человеческой деятельности. Пытаясь осмыслить сложность и хаос, мы видим мир в обманчивых, но обнадеживающе простых метафорах. Континенты на дрейфующих плитах на самом деле не сталкиваются. Разнообразие жизни в кембрийский период не было взрывным. И развитие биосферы включает в себя не только выживание сильнейших. Все это упрощения во времени и пространстве, низводящие сложные физические, химические и биологические процессы до обманчивых фраз, которые удобны в повседневной жизни.

Для нас существует вызов даже больший, чем борьба с нашими индивидуальными предрассудками, — это проблема интеграции знаний. Земля, космос, жизнь — любая научная область требует широко интегрированного взгляда.

Каждая значимая для человечества тема включает в себя и физический, и химический, и геологический, и биологический аспекты. Подумайте о самых животрепещущих наших опасениях: ухудшение окружающей среды, сокращение минеральных ресурсов, распространение инфекционных заболеваний, изменение климата, увеличение спроса на энергию, опасные ядерные отходы; вспомните о страдающих от нехватки воды, о голодающих. Подход ко всем этим проблемам требует комплексного междисциплинарного планирования, а решения должны подкрепляться полным набором научных свидетельств, свободных от множества политических, экономических, этических и религиозных ограничений.

Углеродоведение ничуть не лучше — это такая же смесь концепций и догм ото всех ветвей исследований. Вызов для нас состоит в интегрировании многих частей углеродной истории в единое целое. Так что, возможно, когда мы стремимся понять границы знания — природу непознаваемого, нам следует поместить наши собственные человеческие ограничения в самое начало списка препятствий.



ЧАСТЬ III — ОГОНЬ:

Углерод — элемент вещей

Богатые углеродом Воздух и Земля, один вверху, другая внизу, каждый играет свою уникальную роль в нашей жизни.

И все же, чтобы строить города, ездить на автомобилях, возделывать поля, готовить еду и изготавливать разного рода необходимые вещи, нам нужна энергия.

И поэтому у углерода — элемента вещей — есть другие тузы в рукаве.

Огонь — энергия — это валюта промышленности и торговли.

Огонь приводит в движение наши грузовики и автобусы, освещает наши улицы и здания, согревает наши дома, готовит нашу еду, собирает наши машины и производит множество продуктов для жадного, алчного мира.

Углеродные соединения зажигают эти огни.

Углерод, преобразованный огнем нефтеперерабатывающих заводов, является сырьем почти всего.

ИНТРОДУКЦИЯ — Материальный мир

Земли и Воздуха недостаточно. Общество требует изобилия всевозможных материальных благ: еды и одежды, домов и фабрик, машин и самолетов, телевизоров и смартфонов. Нам нужны вещи, и отнюдь не только самые необходимые: мощные спортивные двигатели, изысканное вино, удобные стулья, упругие бамперы, мягкое нижнее белье, надежные компьютеры, вкусные кексы, прочные рюкзаки, легкие кроссовки, разноцветные воздушные шары, поляризационные солнечные очки, пушистые подушки и добротные матрасы. Привередливые потребители требуют новинок: застежек-липучек, пластырей Band-Aid, самоклеящейся бумаги для заметок, суперклея, жидких гачных ключей, гигиенического бальзама для губ ChapStick, тефлона, жевательных Мишек Гамми — все это продукты изобретательной углеродной химии.

Чтобы создать вещество, вам потребуются атомы в различных трехмерных комбинациях: комковатые массы, гибкие пластины, тонкие волокна и разветвляющиеся массивы. Вам понадобятся молекулы всех мыслимых размеров и форм: цепочки из атомов, кольца из атомов, крепкие блоки из атомов и полые цилиндры из атомов. Наше общество создает материалы со всевозможными полезными свойствами, какие

только можно себе представить: шелковистые, упругие, прозрачные, душистые, поглощающие, разноцветные, изолирующие, абразивные, водоотталкивающие, непрозрачные, липкие, биоразлагаемые, защищающие от ультрафиолета, пряные, магнитные, легковоспламеняющиеся, плотные, ломкие, тепло- и электропроводные, сладкие и соленые, мягкие и безопасные.

Постоянно расширяющийся спектр общественных нужд и желаний создает бесконечный спрос на столь же разнообразные атомные структуры. Каждый материал нужно детально спроектировать, тщательно подогнать на атомном уровне для выполнения его специфической роли, поскольку основной принцип химической науки заключается в том, что свойства любого материала зависят от его атомов — от характерного для этого материала набора атомов, а также от того, как они связаны между собой.

В соединениях с другими атомами ни один химический элемент не играет свою роль лучше, чем углерод, химия которого столь неизмеримо богата, что для обозначения специальности ученых, посвящающих свою деятельность изучению углерода, придумали имя собирательное — химики-органики. Их международное сообщество насчитывает более миллиона членов-исследователей. Иными словами, химиков-органиков — специалистов, которые всю жизнь играют с углеродом, — намного больше, чем всех других ученых-химиков.

Правила электронов

Правила — особенно те, что основаны на числах, — часто кажутся спорными. Например, в спорте. В американском футболе было время (в 1880-е гг.), когда за филд-гол давали пять очков, а за тачдаун — только четыре¹. Тачдаун «повысили»

до пяти очков в 1897 г., филд-гол «понижили» до четырех в 1904-м, а затем до ставших сегодня привычными трех — в 1909 г. Тачдаун снова изменили уже на нынешнее его значение в шесть очков в 1912 г. За минувшее столетие похожие изменения претерпевали правила безопасности, а также дополнительные одно и два очка после тачдауна. В исторической перспективе правила начисления очков в американском футболе производят впечатление более чем замысловатых и преходящих, причем они неизбежно подвергнутся дополнительным корректировкам в будущем.

Химия тоже своего рода игра, в которой игроками являются атомы, исполняющие древний танец химических связей, где счет определяют электроны. Вот, навскидку: вы атом-победитель, если у вас в итоге оказывается 2, 10, 18 или 36 электронов. Почему именно эти значения? И что они — тоже спорные? А будут ли они такими же во вселенных, параллельных нашей? Физики придумывают замысловатые объяснения этим магическим числам. Это просто правила игры, но в данном случае правила встроены в саму ткань нашего космоса.

Некоторые атомы уже рождены счастливыми — как раз с двумя (элемент гелий), десятью (неон), 18 (аргон) или 36 (криптон) электронами. Эти особенные атомы ведут жизнь изолированных, свободно фланирующих индивидуалистов — инертных газов-отшельников, поскольку им нет нужды полагаться на какие-либо другие атомы, чтобы набрать победное число электронов. Другие атомы немного промахиваются мимо магического числа. Натрий — 11-й элемент — изначально владеет 11 положительно заряженными протонами и 11 отрицательно заряженными электронами, но он с готовностью отдает один электрон и становится катионом натрия. Хлор — со своими 17 протонами и 17 электронами — с той же готовностью забирает этот

нежелательный электрон у натрия и становится анионом хлора. Положительные ионы натрия притягивают отрицательные ионы хлора, чтобы, соединившись, создать восхитительные изящные кубики кристаллов поваренной соли — хлорида натрия.

В Периодической таблице много элементов-неметаллов, подобных хлору или кислороду (у которого восемь электронов, т. е. ему недостает двух до магических десяти), жаждущих отхватить себе электрон-другой у «перегруженных» электронами металлов вроде натрия или магния (у которого 12 электронов). Большинство элементов Периодической таблицы перенимают эту стратегию отдачи или захвата электронов, чтобы победить в игре связей. И это хорошо. Если бы все атомы были одинаково счастливы со своим исходным количеством электронов, то не было бы причины присоединять их или делиться ими, оказалось бы невозможным образование химических связей и мы бы никогда не пришли к нашему буйному разнообразию материального существования.

В этом мире взаимовыгодного бартера электронов и (обычно дружеских) слияний углерод занимает уникальное место, будучи элементом № 6, т. е. находясь в середине периода на полпути между магическими двумя и десятью электронами. Подобно уставшему пловцу на озере, который оказался на равном расстоянии от двух берегов, углерод просто не «знает», что ему делать. Должен ли он устремиться в одну сторону и искать еще четыре электрона, чтобы обладать магическими десятью? Или ему следует направиться в прямо противоположном направлении и отдать четыре электрона, чтобы в итоге у него оказались магические два?

Эта неоднозначность дает углероду преимущество для образования связей, неизвестное большинству других элементов. В отличие от натрия, который неизменно отдает

один электрон, или хлора, который столь же охотно хватается этот дополнительный электрон в борьбе за атомное счастье, шестой элемент наслаждается сразу многими контрастными химическими ролями — то забирает, то отдает, то делится электронами во взаимодействиях, которые ведут к образованию намного большего веера химических соединений, чем у всех остальных ста с лишним элементов, вместе взятых. Поэтому углерод способен создавать как самые твердые из всех известных материалов, так и самые мягкие, как самые яркие и разнообразные цвета, так и самый черный из наичернейших, как самые скользкие смазки, так и самые липкие клеи.

Горючий углерод²

Нам нужны материалы, но, чтобы их создать, требуется много энергии. Зачастую эта энергия приходит от тепла сжигаемого углеродного топлива. Мы везунчики, поскольку у Земли богатые запасы маленьких горючих углеродсодержащих молекул — углеводородного топлива, куда входят уголь, нефть и природный газ. Углеводороды, эти несложные продукты органической химии, встречающиеся повсеместно на Земле и в космосе, представляют собой молекулы, каждая из которых создана из прочного скелета соединенных атомов углерода и декорирована оторочкой из атомов водорода. В природном газе, или метане, — простейшем углеводороде — один атом углерода окружен пирамидой из четырех атомов водорода. Вклад углерода — шесть электронов, каждый из атомов водорода добавляет еще по одному для магической суммы в десять электронов.

Когда друг с другом соединяются два атома углерода, окруженные шестью атомами водорода по периферии, появляется новое соединение — топливо под названием этан.

В этой простой горючей молекуле оба атома углерода используют свои электроны совместно с четырьмя соседями, в итоге каждый атом углерода наслаждается десятью электронами, а в то же время каждый атом водорода получает желаемое дополнение для обладания двумя электронами. В этане все атомы довольны.

Давайте продолжим строить: три подряд атома углерода обеспечивают скелет для пропана — распространенного в сельской местности топлива, которое хранится в больших белых цистернах. В пропане небольшой ряд из трех атомов углерода окружен восемью атомами водорода.

Если атомов углерода — четыре, то появляется кое-что новенькое: эти четыре атома имеют возможность выстраиваться двумя разными способами в виде двух изомеров. Четыре атома углерода бутана могут образовывать аккуратный коротенький ряд (это бутан-топливо, оно используется в большинстве одноразовых зажигалок), или же они формируют Т-образную молекулу — изобутан, который находит повседневное применение в качестве безопасного хладагента. Пентан с пятью атомами углерода и 12 атомами водорода умеет формировать цепочку из пяти углеродных атомов, цепочку из четырех атомов с одной боковой ветвью, а также симметричный крест. У октана, компонента бензина из восьми атомов углерода, существуют 18 замечательных изомеров с различной топологией (один изомер, «основа» октанового числа бензина, имеет цепочку из пяти атомов углерода с тремя небольшими ответвлениями). Парафины развивают эту тему, гордясь углеводородной цепочкой, в которой от 20 до 40* атомов углерода — чем их в цепочке больше, тем выше точка плавления.

* Согласно отечественной номенклатуре, количество атомов углерода в парафинах варьирует от 18 до 35. — *Прим. ред.*

С пятью или более атомами углерода у вещества возникают новые возможности: эти атомы способны кружиться в хороводе элегантных кольцеподобных молекул³. Бензол, некогда используемый в качестве промышленного чистящего средства, ныне же известный как опасный канцероген, образует кольцо из шести углеродных атомов с отходящими от него подобно спицам в колесе шестью атомами водорода. Иногда кольца углерода сцеплены вместе — этот рисунок обнаруживается в большинстве частиц черной сажи. Нафталин, наиболее широко известный полициклический углеводород, соединяет в пару два таких кольца. У антрацена, распространенного компонента черного дыма, образующегося при сгорании древесного угля и дымлении дизеля, в молекуле прямая линия из трех связанных гексагональных колец, а пирен, еще один компонент сажи, представляет собой плотный кластер из четырех колец.

Иногда молекулы образуют изящные конструкции с причудливыми комбинациями цепочек, ветвей и колец — подобные структуры наблюдаются во многих жизненно важных молекулах от стероидов и витаминов до кирпичиков генетических молекул ДНК и РНК. Эти основанные на углероде молекулы могут расти все дальше и дальше, образуя десятки пяти- и шестичленных колец, связывающихся в цепи, другие кольца и кластеры. На самом деле разнообразию углеводородных молекул буквально нет конца, и более того, большинство из них горят.

Уголь, нефть и природный газ — все они изначально образуются из углеводов. Эти ископаемые виды топлива преобразили человеческое общество и, к счастью или несчастью, продолжают оставаться нашими самыми дешевыми и самыми распространенными источниками химической энергии. Не так уж много планет помимо Земли, где углеводородные молекулы оказались способны создать

хоть паршивенькое горючее. Поверхность гигантского холодного Титана (спутника Сатурна) подвергается воздействию углеводородных дождей, которые бомбардируют ее в периоды мощных циклонов⁴. Реки Титана и его огромные озера наполнены метаном и этаном. Вам удалось бы проплыть на лодке по метановым озерам Титана, но, если бы вы захотели зажечь там спичку (чего вы не смогли бы сделать, потому что там нет кислорода, порождающего огонь), ничего бы не случилось. Из-за отсутствия химического окислителя в атмосфере Титана углеводородный дождь просто погасил бы любое пламя.

Основной отличительный признак Земли — обилие атмосферного кислорода, угрожающе химически активного побочного продукта фотосинтеза. Кислород — элемент, исключительно жадный на электроны. В противоположность любой другой планете или ее спутнику в нашей Солнечной системе, если зажечь спичку здесь, на Земле, поблизости от летучих углеводородов, таких как природный газ, возникнут драматические и опасные последствия. В бурной взрывной окислительно-восстановительной химической реакции молекулы углеводородов стремятся отдавать электроны, вступая в контакт с кислородом, чтобы образовать два знакомых простых вещества: углекислый газ и воду. При этих быстро «вспыхивающих» химических реакциях вырабатывается много тепла и света — парадокс пламени как «хорошего слуги», но «плохого хозяина»*. Тысячи лет люди жили с одновременными существенными преимуществами и повсеместной опасностью открытого огня.

Тепло — это ключ к созданию новых материалов, а ископаемые виды топлива — жизненно важный источник

* Автор здесь обыгрывает расхожее выражение “Fire and water are good servants but bad masters” — дословно: «Огонь и вода — хорошие слуги, но плохие хозяева». — *Прим. ред.*

преобразующего тепла. Большинство углеводородных видов топлива горят при высоких температурах — близких к 2000°C , если речь идет о природном газе в конфорке вашей кухонной плиты или о бутане в вашей зажигалке (ваша индейка на День благодарения, напротив, печется в духовке при жалких 200°C). Некоторые специфические задачи, такие как сварка и обрезка металла, требуют гораздо более горячего пламени в 3300°C , которое вырабатывается кислородно-ацетиленовой горелкой. Тем не менее насыщенные углеродом ископаемые виды топлива мы извлекаем из земли не только ради их горения, но и для создания из них различных материалов. Уголь, нефть, битуминозные пески и природный газ часто являются исходным сырьем для изготовления большинства вещей, окружающих нас в повседневной жизни.

Такой разный углерод

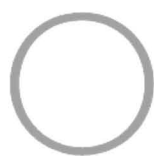
Углеводороды населяют лишь крошечную область в обширном царстве органической химии. Земля производит миллионы разных видов богатых углеродом молекул, но на чем основано такое изобилие? Ответ лежит в уникальной способности углерода соединяться со многими химическими элементами — десятками разных обитателей Периодической таблицы, в том числе с самим собой. Большинство углеродных соединений в вашем теле содержат кислород. Азот, сера и фосфор также типичные компоненты самых важных кирпичиков жизни. Углерод с готовностью соединяется с металлами, такими как железо, титан и вольфрам, чтобы стать материалом для изготовления прочных твердосплавных деталей машин и абразивов, а также с неметаллами вроде фтора и хлора.

Получающиеся в результате углеродсодержащие химические вещества обеспечивают основу современной

промышленности, которая базируется на углеводородах как наиболее существенном сырье. И здесь мы приходим к важному осознанию: рано или поздно нам придется прекратить сжигать уголь и нефть. Можно упомянуть окружающую среду, если хотите, — и будьте уверены, беспокойство по поводу воздействия на нее горящих ископаемых видов топлива вполне обоснованно, — но сущая правда заключается в том, что углерод-углеродные соединения в угле и нефти в конечном счете станут слишком ценными, чтобы их спалить. Эти вездесущие связи между атомами углерода — самая главная химическая характеристика нашего материального мира. Они лежат в основе почти каждого продукта, который мы потребляем в повседневной жизни. Наша планета обеспечила нас многими альтернативными видами энергии: в изобилии присутствуют солнечный свет, непрекращающиеся ветры, возобновляемые виды биотоплива, бьющиеся о берег волны, неистощаемое геотермальное тепло и полные сил ядерные реакции радиоактивного урана. А виды топлива, основанные на углероде, напротив, представляют собой незаменимое сырье для нашего процветающего материального мира.

СКЕРЦО — Полезные вещества

Горячие



гонь, круто! Огонь — это ключ к переработке угля и нефти, которые сами по себе не более чем богатые остатки погребенной жизни, высушенные и сжатые в сложные смеси бесчисленных тысяч различных молекул⁵. Большинство молекулярных компонентов — невелики по размеру, это знакомые нам горючие углеводороды: метан, этан, пропан, октан. Другие — крупные сложные молекулы, которые могут похвастаться десятками атомов углерода в соединении с кислородом, азотом, серой и другими элементами.

Суть переработки заключается в нагревании этого зловонного черного химического рагу в высоком сегментированном цилиндре, который гораздо горячее снизу, чем сверху. Вы замечаете эти бросающиеся в глаза ректификационные колонны каждый раз, когда проезжаете мимо химических предприятий, ошестинившихся рядами металлических труб, часть которых пылает сверху — это сжигаются небольшие излишки метана, т. е. то количество природного газа, которое инженеры-химики считают слишком скудным для получения прибыли. В каждой из этих башен проходят многочисленные этапы химического процесса сепарации.

Когда смесь ингредиентов в колонне нагревают, каждый молекулярный компонент достигает своей точки кипения на разной высоте. На следующих один за другим уровнях из колонны выступает сложная система труб — каждая труба «извлекает» и собирает свой продукт, таким образом дистиллируя разнородную черную жидкость поэтапно. Меньшие молекулы обычно кипят при более низких температурах, поэтому они собираются в верхней части колонны — пропан и бутан поблизости от наиболее холодной верхней ее оконечности, бензин и керосин — в середине колонны, а плотный тягучий жидкий асфальт и парафины сливают с более горячего ее дна. Нефтеперегонные заводы соединяют ректификационные колонны в тщательно продуманном химическом танце, где каждая колонна выполняет отдельный этап основной задачи отбора и концентрации важных органических химических веществ.

После того как все эти разнообразные углеродсодержащие молекулы проходят перегонку и очистку, к ним применяется множество химических трюков для получения новых соединений: различные химические вещества сливают в большие чаны и реторты, перемешивают, сжимают, добавляют необходимые реактивы, возможно, даже щепотку катализатора, а затем «варят» при нужной температуре. Разные рецепты складываются в целые кулинарные книги, полные предложений полезных синтетических блюд.

Для современной жизни крайне важны из них полимеры — пластики под названиями ПЭТФ и ПВХ, синтетические волокна нейлон и вискоза, краски, клеи, резина и сотни других химических продуктов, которые играют самые разнообразные роли в нашей повседневности.

Все эти материалы содержат бесчисленные небольшие молекулы, связанные друг с другом и формирующие длинные цепи с углеродными «хребтами». Жизнь тоже научилась этим химическим приемам: кожа, волосы, мышцы,

сухожилия и связки — все это биополимеры. То же верно для листьев и стеблей, корней и древесины, волокон водорослей и нитей паутины. А ловкие химические манипуляции добавляют в копилку мириады углеродсодержащих соединений, таких как воск и резина, жиры и растительное масло, смазки и клеи, косметика и лекарства.

Взгляните на упаковку ваших любимых снеков. Все, что мы едим, содержит множество углеродсодержащих молекул: среди них аминокислоты — структурные элементы белков; липиды — компоненты жиров и растительных масел; углеводороды, куда входят сахара, крахмал и пищевые волокна. Углерод обеспечивает нам шипение газированной воды и алкогольное опьянение от выпивки.

Давайте исследуем некоторые свойства углеродных соединений, которые делают их такими важными для повседневной жизни.

Холодные

Химия углерода, которая предлагает нам самое жаркое пламя, также является самым эффективным портативным источником холода. Углекислый газ CO_2 сублимируется при $-78,5\text{ }^\circ\text{C}$, превращаясь в бесцветное твердое вещество, уже упоминавшийся сухой лед. Этот лед называется сухим из-за своего необычного свойства превращаться из твердого тела сразу в газ. В отличие от воды, у углекислого газа нет жидкой фазы, по крайней мере при атмосферном давлении. Так что вам не удастся перелить холодный углекислый газ из одного контейнера в другой, но вы можете переносить его в виде удобных замороженных кубиков.

Сухой лед достаточно широко применяется, в основном в пищевой промышленности. Холодильник даже не нужен — чтобы замораживать пищу, газировать напитки, делать

мороженое и перевозить скоропортящиеся продукты, вы можете использовать CO_2 . Замороженный углекислый газ находит оригинальное применение и в борьбе с насекомыми, потому что ледяной CO_2 привлекает комаров и постельных клопов, они собираются вокруг кусочка сухого льда и замерзают до смерти. Водопроводчики используют переносные упаковки сухого льда, чтобы обкладывать медные трубы, таким образом создавая пробки из замерзшей воды, когда нет запорного клапана. Врачи замораживают и удаляют бородавки, специалисты по охране окружающей среды замораживают и ликвидируют утечки нефти, пожарные используют гранулы сухого льда и огнетушители на углекислом газе, чтобы бороться с пожарами, одновременно охлаждая и подавляя пламя.

Замороженный углекислый газ также играет свою уникальную роль во время сценических шоу, порождая таинственную пелену. Бросьте кусочки сухого льда в воду, и вы создадите плотный, стелящийся по земле туман, идеальный для зловещих ночных эффектов. Чего зрители не видят, так это каким промозглым может быть подобное явление, когда холодный сублимирующийся CO_2 понижает значение точки росы и насыщает более плотный холодный воздух водяным паром. Я помню, как однажды играл в небольшом оркестре во время такого шоу, когда слишком сильный эффект сухого льда вызвал обильный туман, который перелился через край сцены и быстро заполнил оркестровую яму. Какое-то время мы играли буквально вслепую. Липкий насыщенный влагой воздух конденсировался на всем, оставляя скользкий мокрый след на полу, стульях, пюпитрах и инструментах.

Клейкие

Свойства материалов зависят от составляющих их атомов и того, как они соединяются друг с другом. Возьмем,

например, клей. Признак хорошего клея — прилипание практически ко всему. На уровне атомов — большинство свойств материала берет начало именно здесь — прилипание заключается в сильном притяжении положительных и отрицательных электрических зарядов. Молекулы клея должны иметь необычайно сильные поверхностные заряды, зачастую реализуемые сильным отрицательным электростатическим зарядом гидроксильных групп OH^- , которые соединяются с атомами углерода. Когда у углеродсодержащей молекулы много выступающих наружу гидроксильных групп, то они могут вызвать аналогичной силы положительный заряд почти на любой поверхности. Положительное притягивает отрицательное, и — вуаля! — молекулы прилипают.

Природа полна липкости, а липкие вещества неизменно имеют у себя углеродную основу⁶. Гекконы взбираются на стены с помощью лап, покрытых гидроксильной группой. Венерины мухоловки выделяют липкую, покрытую гидроксидом слизь, на которую ловятся насекомые. Мидии и усоногие раки прикрепляются к корпусу кораблей во многом таким же образом, что обходится корабельным компаниям в целое состояние из-за ежегодной чистки, не говоря уже о потерянном времени простаивания в порту дорогостоящих судов. Каждый год для морских судов выпускаются новые краски с противодействующими налипанию молекулярными составами, которые ограничивают, но никогда не могут полностью устранить эти электростатические фокусы.

Клейкость — это большой бизнес. Клеевая промышленность ежегодно подпитывает своей продукцией многомиллиардный рынок, на котором потребителями выступают производители самолетов и автомобилей, строительные компании, розничные торговцы в интернете и медицинские работники. Высокотехнологичные клеи и герметики

сейчас заменяют металлическую сварку, таким образом ускоряя строительство и уменьшая вес конструкций и опор. Они удерживают на месте окна небоскребов и лобовое стекло вашей машины. Покупатели полагаются на клейкие вещества в таких продуктах, как одноразовые подгузники, зубные протезы, лейкопластырь Band-Aid, средства защиты органов слуха, почтовые марки, конверты и клеящиеся листочки Post-it, а также в решении десятков повседневных задач — от упаковки подарков ко дню рождения до склеивания сломанной мебели.

Суперклеи как нельзя лучше отражают причудливую природу открытий в мире клеящих веществ⁷. Химик-органик Гарри Кувер-мл. и группа исследователей из компании Goodrich наткнулись на первый из семейства суперклеев — небольшую углеродсодержащую молекулу, которую называли «цианоакрилат», в 1942 г. в ходе работ для нужд фронта. Они пытались разработать улучшенный прицел из прозрачной пластмассы; цианоакрилат, который прилипал ко всему, чего касался, сразу же отвергли.

Промотаем вперед, до 1951 г. В этом году Кувер перешел в компанию Eastman Kodak и, работая с химиком Фредом Джойнером, осознал, что суперлипкий цианоакрилат может оказаться ценным клеем. Компания Kodak согласилась с ним, и первый суперклей поступил в продажу в 1958 г. под названием Eastman #910. Вскоре появились многочисленные разновидности и конкурирующие бренды; все они, однако, были основаны на свойстве молекул цианоакрилата оставаться в жидкой форме, пока хранятся в запечатанном контейнере, но крепко объединяться при соприкосновении с водой или влагой атмосферы.

Нетоксичные суперклеи, с их способностью прилипать ко многим видам поверхностей и затвердевать в разных средах, нашли десятки новых способов применения помимо

всем знакомой починки сломанных предметов или соединения частей. Морские биологи и аквариумисты-любители используют суперклей, чтобы прикреплять фрагменты живых кораллов к скалам. Пары суперклея прилипают к жирным пятнам на гладких поверхностях, в результате чего получаются четкие отпечатки пальцев для судебной экспертизы. Также суперклей стал одним из лучших веществ для применения на коже и костях. Его часто используют для обработки и лечения костных мозолей у спортсменов, скалолазов и музыкантов, играющих на струнных инструментах. А врачи и ветеринары используют суперклей для заделывания трещин в костях и закрытия ран, особенно при чрезвычайных ситуациях, когда склеивание быстрее и безопаснее, чем традиционное наложение швов или скоб.

Скользкие

Скользкие молекулы, в противоположность липким, минимизируют свои поверхностные заряды. Без электростатического притяжения молекулы просто плавают друг над другом, как еще не сварившиеся рисинки. Скользкими поверхности становятся из-за воска, жиров и растительных масел, потому что они образованы из молекул углеводорода — атомов углерода, окруженных атомами водорода. Каждый атом в молекуле углеводорода полностью удовлетворен своим магическим числом электронов. Ни один из атомов масла или жира не ищет другие атомы, чтобы с ними соединиться.

У каждого из нас есть свои примеры неудачного скольжения — необратимые мгновения, когда случилось что-то плохое. Я вспоминаю один такой яркий момент из своего музыкального прошлого. Место действия — Театр Сандерса (Кембридж, штат Массачусетс), февраль 1975 г. — третья или четвертая сыгровка нового камерного произведения

«А, Джо?» гарвардского профессора композиции Эрла Кима⁸. У этой ужасно сложной пьесы — три части медных духовых и три части струнных (попытайтесь сбалансировать эти инструменты!) плюс голос, который должен был справиться с монотонной декламацией Сэмюэля Беккета. Двенадцать часов репетиций ради 20-минутной пьесы. Мы сидели полукругом: трубач Кен Пуллиг и тромбонист Стэн Шульц слева от меня, невероятно талантливый студент-виолончелист Йо-Йо Ма непосредственно справа от меня, дирижер Ким и солистка-рассказчица Лоис Смит — напротив. Пьеса оказалась сложной, привередливой. Из-за предстоящих выступления и записи репетиции были долгими и напряженными.

Примерно через час репетиции, когда мы проходили все вместе один причудливый пассаж, возможно уже пятый или шестой раз, на сцене раздался оглушительный шум справа от меня. Мы перестали играть. Что произошло?

Затем мы увидели 40-сантиметровый металлический гаечный ключ. Как оказалось, он выскользнул из сальной руки осветителя, который работал высоко над нами на лестнице, прикрепляя прожектор в неудобном положении, — и тут гравитация вкупе с кожным жиром его подвели.

Массивный гаечный ключ приземлился в 15 см правее Йо-Йо. Мы все пребывали в состоянии шока, концентрация была потеряна из-за почти фатального сбоя. Нас в буквальном смысле трясло, и мы не могли продолжать. Репетицию пришлось закончить, поскольку нам напомнили о необратимости случайного очень плохого момента — неизбежности и непредсказуемости смерти. Мы покинули сцену, отголоски пессимистической пьесы Беккета звучали у нас в головах.

Йо-Йо Ма был заметно ошарашен. Дрожащим голосом студент тихо сказал: «Он чуть не задел мою виолончель!»

ТРИО — Наноматериалы

Новые

Изменение, преобразование и бесконечное разнообразие — вот отличительные черты химии углерода. Рассмотрим графит с его крошечными плоскими треугольниками атомов, которые формируют суперкрепкие атомные слои. Они практически неразрушимы, показывая определенное сходство с тонкими и прочными листами пластика, но связи между соседними слоями слабые, и те с готовностью распадаются. В результате графитовые слои скользят друг по другу так же легко, как разбрасываются дуновением ветра листы бумаги, лежащие стопкой на вашем столе.

Хотя сам графит — один из самых мягких известных нам материалов, его отдельные углеродные слои — в ряду самых крепких и упругих. Но какая польза от одинарного слоя атомов углерода? Как вы можете ухватить и изучить такой наноразмерный материал? Десятилетия назад, задолго до того, как у ученых появился образец, который можно изучать в лаборатории, исследователи размышляли об уникальных электронных и механических свойствах этого загадочного вещества, названного «графен». Способен ли графен способствовать стать полупроводником, или у него необычные магнитные свойства, или это суперпрочный материал

для нанотехнологий? Но только в 2004 г. исследователи из Манчестерского университета Андрей Гейм и Константин Новоселов совершили прорыв в области использования графена. И каким же было их заслужившее Нобелевскую премию высокотехнологичное решение изолирования отдельных углеродных слоев? Лента-скотч!⁹

Сейчас кто угодно способен отделять друг от друга и изучать слои графена. Начните с симпатичного плоского кристалла графита. Прикрепите кусочек скотча к плоской поверхности, а затем резко оторвите. Скорее всего, удалятся несколько слоев графита, но повторное применение клейкой ленты улучшит результат. В конечном счете останется лишь один атомарный слой. Удалите клейкое вещество, и в вашем распоряжении идеально плоский единичный слой атомов углерода.

Последовавший поток открытий (более 10 000 научных публикаций в год), который продолжает быстро увеличиваться, обещает нам массу революционных технологий¹⁰. Слои графена прозрачны и крепки, поэтому они могут играть роль микроскопических окон в наноразмерных устройствах, композитов при разработке искусственной кожи и костей, а также материалов для нового поколения ультратонких презервативов. Слои нерастворимы в воде, так что графеновые покрытия способны защитить поверхность растворимых или легко ржавеющих устройств. Интересно, что вода все же в состоянии «намочить» поверхность покрытого графеном объекта, поскольку молекулы H_2O могут взаимодействовать через поры в этом единственном слое атомов углерода. Таким образом, графен помог бы обезопасить широкий спектр датчиков качества воды, датчиков влажности и биологических датчиков.

Возможности для применения графена в электронике не менее интригующи. Полупроводники контролируют

электроны, меняя скорость их потока при переключении с одной траектории на другую. Наш современный электронный век полностью зависим от устройств, сделанных в основном из кремниевых полупроводников — диодов, транзисторов и интегральных микросхем. Графен постепенно идет на смену кремнию. Первый графеновый транзистор — основная рабочая лошадка электронного века — был продемонстрирован в 2004 г. Затем быстро последовали новые разработки. В 2008 г. группа немецких исследователей сконструировала графеновый транзистор шириной всего в десять атомов — наименьший из существующих на тот момент и находящийся близко к теоретическому пределу. Вскоре последовали разнообразные интегральные микросхемы, а также крошечные транзисторы с переключением скоростей более быстрым, чем у кремниевых. Мало того, оказалось возможным изготавливать такие устройства с помощью 3D-принтера: они гибкие и способны функционировать даже под водой. Некоторые поклонники графена предсказывают, что вскоре он сможет заменить традиционные кремниевые полупроводники во многих устройствах.

Новые идеи текут полноводной рекой. Графен обладает высочайшей теплопроводностью, поэтому его можно использовать в тех устройствах, где электрические цепи нуждаются в охлаждении. Прозрачность и электропроводность этого материала идеально подходят для гибких сенсорных экранов и дисплеев. Уже изучается возможность других его применений: в топливных элементах, батарейках, высокотехнологичных линзах, сенсорах давления и фильтрах для воды. Новые варианты графена в виде стопок из двух или трех углеродных листов — или «бутербродов», в которых графен чередуется с другими слоистыми материалами, — обладают уникальными свойствами, предоставляющими еще больше возможностей для дальнейших открытий.

А одна исследовательская группа даже разрабатывает основанные на графене краски для волос, которые помогут охладить голову в летнюю жару¹¹.

Полые

Возможно, самая очевидная характеристика графена — его потрясающая прочность на разрыв. Прочность материалов бывает трех видов: «на сжатие» характеризует сопротивление сдавливанию, «на сдвиг» — сопротивление изгибанию, а «на разрыв» — сопротивление растягиванию. Некоторые объекты, скажем столбик кирпичей или штабель пиломатериалов, прочны при сжатии, но проявляют слабость, когда их изгибают или растягивают. Другие предметы, такие как стальная цепь или нейлоновая веревка, — крепкие при растягивании, но не имеют буквально никакой прочности при сжатии или изгибе. Некоторые всем известные композитные материалы вроде железобетона, стекловолокна или фанеры сочетают характеристики двух или более материалов, и это позволяет добиться роста всех трех видов сопротивления.

Плоские листы графена не могут выдержать изгибания и легко складываются, когда их сжимают, но при растяжении графен бесподобен: он в сотни раз прочнее, чем крепчайший стальной провод, и обладает пределом прочности на растяжение вдвое большим, чем алмаз. Причина этих экстремальных характеристик графена лежит в природе связей углерод-углерод. Алмаз, в котором каждый атом углерода делится своими электронами с четырьмя соседями, — наиболее крепкий из известных трехмерных кристаллов. Атомы углерода упакованы в алмазе в такой «тесноте», что наблюдаемая здесь плотность электронов (электроны суть основа химической связи) — самая высокая из известных, выше, чем у любого другого материала на поверхности Земли. Расстояние

между соседними атомами углерода составляет всего 0,154 нм, оно гораздо меньше, чем в большинстве других кристаллов. Поэтому алмаз такой жесткий и твердый. Но в слое графена это расстояние еще короче — всего около 0,14 нм. Это потому, что каждый атом углерода делится своей квотой из четырех связывающих электронов только с тремя соседями. Электроны в слоях упакованы даже плотнее, а получающиеся в результате связи еще крепче и короче, чем в алмазе.

Превосходную прочность графена на разрыв можно ловко использовать в углеродной наноинженерии. Листы графена плохо подходят для производства веревок или проводов, но что, если вам удастся свернуть углеродный лист в рулон и сделать из него крошечный полый цилиндр? Тогда у вас получится прочная углеродная нанотрубка¹². А уж здесь множество вариантов: можно изготовить трубки с разными диаметрами, а также одиночные, двойные или вложенные, состоящие из множества концентрических цилиндров.

Углеродные волокна разных видов были известны и изучались по крайней мере с 1950-х гг., но массовые исследования начались после того, как в 1991 г. японский физик Сумио Иидзима получил множество углеродных нанотрубок, пропустив сильные электрические токи через графит. На основе этого нового надежного метода было написано более 100 000 научных статей и подано порядка 10 000 заявок на получение патента.

Прочность полых углеродных нанотрубок потрясающая: нить диаметром всего 0,1 мм может удерживать более 10 т неподвижного груза. Инженерный потенциал для проектирования легковесных мостов, зданий, самолетов и композитных материалов нового поколения поразителен. Писатели-фантасты воспользовались этой идеей, описывая космические лифты на кабелях из углеродных нанотрубок, которые перевозят людей и грузы на закрепленные

на орбите платформы, расположенные в сотнях километров над поверхностью Земли. Даже с учетом таких футуристических перспектив привлекательность нанотрубок не ограничивается их крепостью. Армия ученых по всему миру продолжает думать над их использованием в промышленности, энергоснабжении, электронике и медицине.

Умные¹³

Графеновые слои и нанотрубки дают нам понять, что могут существовать и другие формы углерода. Запечатав концы нанотрубки, вы сможете создавать различные закрытые формы: напоминающие футбольный мяч 60-атомные бакиболы или продолговатые молекулы наподобие мяча для американского футбола с 70 или более атомами углерода. Все эти элегантные формы шестого элемента знакомы нам как фуллерены — их так называли в честь геометрически с ними схожих геодезических куполов, придуманных американским архитектором Бакминстером (Баки) Фуллером.

Существование фуллеренов предсказывали еще за полстолетия до того, как в 1985 г. группа ученых из английского Университета Сассекса и Университета Райса в Техасе описала воспроизводимый путь их синтеза и анализа¹⁴. За этим открытием, получившим Нобелевскую премию, последовали открытия фуллеренов в копоти свечей, дыме лесных пожаров, разрядах молнии и даже в космической пыли, окружающей далекие богатые углеродом звезды. Интенсивное исследование этих похожих на птичью клетку молекул привело к открытию многочисленных новых форм: нанолуковиц, содержащих вложенные структуры типа «клетка в клетке»; гантелей с двумя бакиболами, связанными углеродной цепью, и углеродных контейнеров, содержащих множество меньших атомов или молекул.

Исходя из основных форм плоских графеновых слоев, полых нанотрубок и замкнутых фуллеренов, легко представить себе более экзотические геометрические конструкции. Нанопочки выглядят как небольшие бугорки на нанотрубке или более крупном фуллерене. Нанотрубки способны состыковываться друг с другом под прямым углом, образуя наносоединения, или же могут выступать вертикально из графенового слоя подобно наностолбам. Бакиболы умеют заполнять нанотрубки как горошины — стручок, а вложенные друг в друга нанотрубки могут растягиваться или сжиматься наподобие ручки зонтика-автомата. Вы можете даже теоретически допустить существование изогнутых нанотрубок, образующих идеальный молекулярный тор — структуру в форме пончика.

Вооруженные таким набором форм, ученые и изобретатели мечтают о новом поколении молекулярных машин, имеющих наноразмерные рычаги, блоки, колеса и оси¹⁵. Благодаря нанотехнологии углерода моторы, электрические цепи и электронные компоненты атомарного уровня, которые требуются для следующего поколения имплантируемых медицинских устройств, микроконтейнеров для таргетной доставки лекарственных средств и компьютеров молекулярного масштаба, находятся, похоже, уже на расстоянии вытянутой руки.

СКЕРЦО, ДА КАПО — Истории

«ластики!» — вот то «одно слово», которое прошептал безалаберному персонажу Дастина Хоффмана Бену мистер МакГуайр в фильме Майка Николса 1967 г. «Выпускник»¹⁶.

— Что конкретно вы имеете в виду? — спрашивает Бен.

— У пластиков великое будущее. Подумай об этом. Ты подумаешь об этом?

Эта незабываемо занятная и непонятная сцена содержит больше чем просто зерно истины. Пластики, или полимеры, изменили мир. Полимеризация — это химическая реакция, при которой многочисленные небольшие молекулы, или мономеры, соединяются в цепь или сеть, образуя макромолекулу — единую протяженную молекулу с тысячью атомов и почти всегда со скелетом из атомов углерода. Природные полимеры есть у всего живого: это, к примеру, древесина, волосы и шерсть, мышцы, паутина, кожа, листья, сухожилия — список можно продолжать. Учитывая повсеместность этих соединений в биологии, химики не спешили соревноваться с природой и в конечном счете пытаться ее улучшить.

Каучук, который впервые начали использовать в его природной форме еще в мезоамериканских культурах более 2000 лет назад, стал одним из первых полимеров,

привлекших внимание химического сообщества¹⁷. Натуральный каучук получают из млечного сока каучукового дерева — необычного продукта, который, затвердевая, превращается в эластичный водонепроницаемый материал, способный принимать форму пластин, шаров и других полезных предметов. Но в своем необработанном состоянии, полученном прямо из рук природы, этот материал обладает множеством нежелательных свойств: натуральный каучук слишком липкий и слишком пахучий, он становится текучим, когда слишком жарко, и хрупким (трескается), когда слишком холодно. Причины всех этих свойств — как желательных, так и нежелательных — кроются в структуре каучукового полимера. Длинные прочные углеродные цепочки молекул каучука могут скользить друг по другу, обеспечивая и крепость, и гибкость, но только в узком диапазоне температур.

Современная индустрия полимеров, куда входит обширный и постоянно расширяющийся тип материалов, называемых пластиками, начала развиваться с изобретения в 1830-х гг. вулканизации — инновации, заявленной соперничающими американскими и британскими химиками. Вулканизация — это химический процесс, при котором сера или другое химическое вещество, добавленное к полимеру, устанавливает крепкие поперечные связи, своего рода молекулярные поперечные распорки. В результате получается гораздо более твердый и прочный материал (и менее пахучий вдобавок). Что касается резины, то процесс добавления серы к клейкому соку каучукового дерева и тепловой обработки смеси привел к получению значительно улучшенных продуктов, которыми мы пользуемся сегодня: это перчатки, галоши, ластики для карандашей, шланги, ленты-резинки, воздушные шарики, надувные лодки и, конечно, шины для любого транспортного средства на колесах. Еще ряд добавок

обеспечивает гораздо более твердые варианты резины — для изготовления футбольных шлемов*, колес скейтборда, шаров для боулинга и недорогих кларнетов.

Неспокойные годы после Первой мировой войны стали свидетелями потрясающей трансформации химии: химики все больше начинали думать о материалах на уровне атомов — исходя из молекулярной структуры материалов. В 1920 г. немецкий химик Герман Штаудингер открыл, что полимеры представляют собой гигантские молекулярные цепи, прочный скелет которых образуют атомы углерода. За это исследование спустя три десятилетия он получил Нобелевскую премию по химии¹⁸. Выявление Штаудингером различных природных биополимеров, в частности каучука, белков, крахмала и целлюлозы, доказало, что макромолекулярные вещества распространены повсюду. Ученый также предсказал, что когда-нибудь будут разработаны синтетические полимеры, по свойствам конкурирующие с природными материалами.

Несмотря на открытия Штаудингера и его верное предвидение будущего, химики, занимающиеся синтетическими материалами, поначалу находились в тупике. В середине 1920-х гг. у исследователей все еще не получалось создавать макромолекулы длиной более нескольких десятков мономеров — это слишком «коротко» для любого практического применения. Но по правде говоря, несколько новинок все же появилось. Бельгийско-американский химик Лео Бакеланд экспериментировал с нагретыми смесями распространенных химических веществ фенола и формальдегида, чтобы создать синтетический шеллак (вещество, которое раньше получали почти исключительно из экскрементов насекомых — лаковых червецов)¹⁹.

* Речь идет об американском футболе. — *Прим. ред.*

В 1907 г. Бакеланд усовершенствовал методы синтеза и получил свой первый пластик, впоследствии названный бакелитом — продукт, использовавшийся в скромных количествах для разноплановых нужд, включая изготовление ставших ныне коллекционными объектами разноцветных кухонных принадлежностей, игрушек и украшений. Через пять лет швейцарский химик Жак Бранденбергер представил миру целлофан — гибкую водонепроницаемую пленку, полученную в ходе воссоздания целлюлозы деревьев и других растений. Коммерческий успех к целлофану пришел, когда конфетная компания Whitman's решила заворачивать в него отдельные шоколадки для комплектации своих знаменитых коробок конфет Whitman's Samplers. Тем не менее фундаментальные достижения в исследовании полимерной химии запаздывали, пока взрыв открытий в 1930-х гг. не привел к появлению новых материалов, которые изменили мир.

Полимеризация (Упрочнение)

Мягкие и блестящие

В те годы, когда работал блестящий молодой химик Уоллес Карозерс, в химии царила атмосфера оптимизма и открытий²⁰. Карозерса, имевшего за плечами ученые степени Иллинойского университета и год преподавания в Гарварде, пригласили в исследовательские лаборатории химического гиганта DuPont в Уилмингтоне, штат Делавэр. Руководство DuPont, убежденное в том, что коммерческий успех основан на фундаментальных исследованиях, в 1928 г. предложило Карозерсу вести группу, задача которой состояла в «инновационных исследованиях» полимерной химии. Карозерс и его коллеги быстро добились успеха, создав в 1930 г. первую синтетическую резину «неопрен», ныне всем известный

материал для изготовления эластичных наколенников и гибких гидрокостюмов.

Наиболее значимый прорыв Карозерса произошел в феврале 1935 г., когда он изобрел нейлон — необыкновенный полимер, который можно нагреть, расплавить и сформировать из него волокна, пленки и множество других форм. Как новое вещество нейлон дебютировал в виде щетинок сувенирных зубных щеток, поступивших в продажу в 1938 г., а затем стал материалом для женских чулок, представленных на Всемирной выставке в Нью-Йорке в 1939 г. Однако по-настоящему широкое применение нейлон получил в армии во время Второй мировой войны, прежде всего в качестве заменителя парашютного шелка. Поскольку сфера использования материала резко расширилась, нейлон принес DuPont сотни миллиардов долларов прибыли.

Но Уоллес Карозерс этого успеха уже не увидел. Страдая от депрессии, переживая смерть своей сестры, чувствуя, что личная жизнь не сложилась и химическое вдохновение исчерпалось, он покончил с собой, проглотив цианистый калий через два дня после своего 41-го дня рождения.

Карозерс был дотошным химиком. Годами он носил капсулу цианида прикрепленной к цепочке часов. Он хорошо знал, как происходит отравление этим ядом: цианогруппа $C\equiv N$ блокирует поступление кислорода в клетки тела. Такая простая молекула: два атома — углерод и азот, оба необходимые для жизни. Но атом углерода, соединенный тройной связью с атомом азота, вызывает смерть после того, как сердце и центральная нервная система отказывают. Будучи химиком-творцом, Карозерс растворил капсулу цианида в лимонном соке — кислоте, которая ускоряет воздействие яда.

Пенистые

Читая в Университете Джорджа Мейсона курс научной грамотности для студентов, я демонстрирую им простую полимеризацию с помощью безопасного и дешевого химического набора, имеющегося у любого представителя армии поставщиков образовательных материалов²¹. Поликонденсация — распространенная промышленная химическая реакция, когда многочисленные мономеры, каждый из которых представляет собой небольшую углеродсодержащую молекулу, соединяются концами друг с другом, формируя длинный, похожий на цепочку, полимер. В случае поликонденсации образование каждой новой химической связи высвобождает небольшую молекулу (обычно это вода или углекислый газ).

И все прошло бы хорошо, если бы я следовал инструкциям.

Сначала налить две жидкости — одну бесцветную, другую янтарного цвета — в пластиковую чашку. Затем тщательно перемешать их. Подождать две-три минуты. Реакция начинается медленно, с постепенным образованием мягкой желтой пены, но она ускоряется, когда пена поднимается куполом над краями чашки, переполняет ее, заливает стол и прилипает ко всему, чего коснется (в том числе и к пальцам). Пена рождается из молекул углекислого газа, которые высвобождаются при реакции поликонденсации. Всё это липкое месиво постепенно затвердевает в округлый прочный комок полиуретана — материала, идеально подходящего для безопасной упаковки хрупкой электроники, а также — в виде монтажной пены — для заполнения труднодоступных трещин и полостей.

Оглядываясь назад, я понимаю, что смешивать жидкости в пластиковой бутылке и закручивать на ней крышку было

очень плохой идеей — особенно потому, что я не пробовал это делать раньше. Эксперимент начался хорошо, но, когда обычное пенообразование замедлилось, а потом и прекратилось, меня осенило, что в тонкой пластиковой бутылке, должно быть, увеличивается давление. По сути, я собрал перед аудиторией небольшое взрывное устройство и давление в нем быстро возрастало.

Это было глупо. Не пытайтесь повторить эксперимент дома.

Что же следовало сделать? Мне представлялось логичным уменьшить давление как можно быстрее, так что я начал откручивать крышечку и... БАХ! Открученная крышечка выстрелила прямо в потолок, отскочила от него и приземлилась в полуметре слева от меня. За этим метательным снарядом последовал потрясающий выплеск полиуретана, внезапно освобожденного из-под давления. Желтая масса выстрелила вверх метров на восемь и забрызгала плитки потолка кусками липкой желтой пены. (Последствия этого казуса все еще оставались там, когда я в последний раз проверял лекционный зал № 80.) К счастью, никто не пострадал, хотя нескольких студентов в первых рядах неожиданно разукрасили маленькие желтые комочки липкой пены.

Ошибочные

Белки — это распространенные биополимеры, состоящие из линейной цепочки аминокислот, каждая из которых представляет собой небольшую углеродсодержащую молекулу. Структура белка определяется в основном точной последовательностью 20 разных аминокислот, используемых биологическими системами. Соединенные концами в эту последовательность, аминокислоты могут формировать плоские листы (как в хрящах), прочные волокна (волосы

и сухожилия) или же более случайно закручивающиеся формы. Эти 20 аминокислот, сотнями или тысячами связанные вместе, способны образовывать белки почти всех размеров и форм, какие только можно себе представить.

Если речь идет о белке длиной в 147 аминокислот, то может показаться, что одна маленькая ошибка — например, валин вместо глутаминовой кислоты в шестом положении — не играет особой роли²². Но форма белка — это всё, и каждая аминокислота вносит свой вклад в эту форму. Соберите белковый полимер неправильно — замените глутаминовую кислоту валином в шестом положении бета-цепи гемоглобина эритроцитов — и, если провести аналогию с зигзагом, дефектный полимер сделает «зиг» вместо «зага». В данном случае последствием станет серповидноклеточная анемия — разрушительная болезнь крови, которая поражает одного из каждых 500 афроамериканцев. Кровяные клетки неправильной формы переносят меньше кислорода, чем нормальные, а сцепление между собой их серповидных форм приводит к тому, что они застревают в узких капиллярах. Страдающие серповидноклеточной анемией могут испытывать множество симптомов, подрывающих жизненные силы, включая усталость и бессилие, хроническую боль и сердечные приступы.

Подобные точечные мутации являются причиной десятков других генетических заболеваний: муковисцидоз вызывает скопление слизи и приводит к хроническим легочным инфекциям; болезнь Тея — Сакса разрушает нервные клетки в спинном и головном мозге; еще ряд мутаций являются причиной разнообразных нарушений зрения, которые вызывают дальтонизм. Некоторые ошибки в последовательности белковых аминокислот — как наследственные, так и приобретенные в течение жизни под воздействием физических и химических факторов риска — могут приводить к разным видам рака.

Если мы проживем достаточно долго, то испытаем на себе — причем все — воздействие таких губительных белковых ошибок.

Деполимеризация (Ослабление)

Разлагаемые

Пластики определенно стали чудом нашего материального века, поспособствовав появлению целого спектра дешевых универсальных продуктов, которые имеют отношение ко всем сторонам повседневной жизни. Проблема в том, что мы производим гору пластика и слишком много его беспечно выбрасывается. Бесчисленные миллионы тонн пластика — от километров замусоренных берегов вдоль Мексиканского залива до гигантских плавающих массивов в Тихом океане и «украшенных» пластиковыми пакетами неряшливых кустов в открытой ветрам сухой пустыне Сахара в Марокко — уродуют некогда девственный ландшафт. Что же делать?

Предпочтительная стратегия — разрабатывать пластик, который самоуничтожается, постепенно распадаясь, когда его срок годности заканчивается²³. Идея заключается в том, чтобы использовать деполимеризацию — распространенный тип химической реакции, при которой полимерные связи разрушаются. Когда полимерная цепочка или сеть распадается на меньшие, не соединенные части, растворимые фрагменты молекул могут просто вымываться и возвращать атомы углерода в их природный цикл. Новые виды пластика обладают этой способностью, особенно те полимеры, которые могут разрушаться голодными микробами.

В некоторых случаях биоразложение пластика нас не устраивает. В конце концов, вы же не хотите, чтобы насыщенные микробы разъели поливинилхлоридные трубы,

подключенные к вашему туалету? Но многие другие продукты — магазинные пакеты, одноразовые стаканчики и соломинки, упаковка для еды, подгузники и тысяча других недолговечных вещей — используются один раз и выбрасываются. Из более чем 300 млн т производимого ежегодно пластика перерабатывается только около 10%. Было бы здорово, если бы переработанное исчезало с суши или из океана как можно быстрее. Особенно хорош пластик нового поколения, основанный на крахмале — полимере, который распадается в течение нескольких месяцев после компостирования. Но пластикового мусора по-прежнему слишком много, и здесь на помощь должна прийти инженерная мысль.

Другие проявления деполимеризации более проблематичны, даже опасны. Нейлон — как раз такой случай: он разлагается под действием солнечного света в течение длительного времени²⁴. Этот процесс медленный; каждый раз, когда случайная волна ультрафиолета разбивает связь, разрывается лишь одно из бесчисленных триллионов звеньев в постепенно слабеющей полимерной цепи. Кроме того, процесс этот практически невидим: вы, возможно, никогда и не заметите изменения прочности нейлоновой веревки на атомном уровне.

Мой коллега и друг Фил Раппапорт, тоже выпускник Гарварда, любил альпинизм. Он всегда использовал одну и ту же «счастливую веревку» — которая годами подвергалась прямому солнечному свету в погожие дни восхождений. Когда Фил разбился в Уэльсе солнечным днем 1974 г., он упал с высоты всего 10 м. Но это было неудачное падение, и Фил умер мгновенно.

Аль денте

В Италии паста вкуснее²⁵. Дело не в том, что вы едите ее в Италии, а в основном в том, что итальянцы по-другому

делают пасту и затем готовят ее до приятно-твердого состояния — аль денте, или «на зуб».

Для лучших макарон ручной работы характерны три фактора. Первое главное отличие отменной итальянской пасты обеспечивают ингредиенты. Государственный контроль диктует использование 100%-ной белой муки из твердой пшеницы, известной в Соединенных Штатах как семолина*. Этот предпочтительный сорт муки имеет высокое содержание белков (известных нам под общим названием «глютен»), обеспечивающих эластичную структуру первоклассного теста макаронных изделий.

Второй фактор — тщательная подготовка теста, отработанная столетиями последовательность действий, сложившаяся как путем проб и ошибок, так и на основе результатов научных исследований. В воде глютен образует объемную полимерную сеть белков, которые при замешивании теста крепко связываются с частицами крахмала (он и сам является сложным полимером молекул сахаров). Большое значение имеет время: тесто нужно месить не менее 20 мин, чтобы максимально увеличить контакт семолины с холодной водой. Затем пасту с силой продавливают через специальные головки с отверстиями (их сотни видов), чтобы получить нужную форму: ракушки, бантики, спиральки, короткие толстые трубочки, срезанные под углом короткие трубочки и десятки других. Старомодные бронзовые головки предпочтительнее тефлоновых, потому что металл придает пасте более шероховатую поверхностную текстуру, на которой лучше удерживаются соусы. Наконец, в отличие от макаронных изделий массового производства, паста ручной работы сохнет день или два при скромной температуре 50 °C — достаточно

* В России аналогом семолины является пшеничная крупа тонкого помола — манная крупа марки «Т». — *Прим. науч. ред.*

низкой, чтобы полимеры белка не распались, а между глютенom и крахмалом образовались прочные связи. Полученная в результате сухая и хрупкая паста-полуфабрикат легко упаковывается и развозится по домам и ресторанам.

Приготовление — третий ключ к получению отличной пасты. Нагревание при варке разрушает полимеры. Это хорошо, когда вы имеете дело с жестким куском мяса или волокнистыми сырыми овощами. Того же результата можно добиться путем маринования, «размягчая» (т. е. деполимеризуя) еду чисто химическими средствами. Но — будь то овощи, мясо или паста — между слишком жестким и слишком мягким существует золотая середина. По мере того как пасту варят на слабом огне, она размягчается, поглощая все больше воды, при этом глютен и крахмал начинают деполимеризоваться. Хорошая паста требует достаточно долгой варки, чтобы достичь состояния аль денте, но все же не слишком длительной — чтобы не превратиться в кашу.

Хрупкие (opus 64, № 5)²⁶

Скрипач Фред Шуп — долгожитель на сцене любительской камерной музыки Вашингтона (округ Колумбия), «аксакал» более чем пяти десятилетий музицирования, в частности импровизаций. Долгие годы выступлений выдает обширная нотная библиотека Фреда; особенно заслуженной выглядит его концертная партитура 68 струнных квартетов Гайдна. На недавней репетиции «Жаворонка»^{*} потрепанные и пожелтевшие листы с партией первой скрипки Фреда (издание середины XIX столетия, сейчас уже переплетенное в прочную серую крапчатую обложку с красным тканым

^{*} Это собственное название Квартета № 53 ре мажор — опуса, упомянутого в заголовке раздела. — *Прим. ред.*

корешком) буквально рассыпались на части. Когда музыкант быстро перевернул первую страницу во время короткого перерыва, хрупкая бумага растрескалась, как тонкая стеклянная тарелка. Деполимеризация снова нанесла удар.

Это был не первый и не последний раз, когда Фред Шуп попросил паузу, чтобы осторожно выровнять и склеить скотчем обрывки. Кусочки бумаги, потерянные безвозвратно, оставили маленькие угловатые дырочки там, где должны быть ноты. Фред играл это произведение достаточно часто, чтобы заполнять пробелы по памяти.

Четыре толстых тома музыки — партии первой и второй скрипки, альты и виолончели — уже были древними и выглядели подозрительно, когда Фред купил их полстолетия назад в немецком Штутгарте. Десятилетия его касаний смычком и дотошных пометок карандашом, многие из которых были стерты, а потом сделаны заново, навредили и без того ослабленным страницам. Обветшание столетней бумаги, болезненно знакомое библиотекарям и коллекционерам рукописей и редких книг, — непреднамеренное последствие промышленного века, когда повышенный спрос на дешевую бумагу привел к автоматизированному производству.

Бумага — это всего-навсего проклеенное переплетение биополимера целлюлозы, самой распространенной биомолекулы на Земле. Волокна целлюлозы — главной составляющей древесины, стеблей, корней и листьев — представляют собой полимерные цепочки из сотен и тысяч молекул глюкозы, сахара с кольцом из шести атомов углерода. Прочность бумаги зависит от ее толщины и длин молекул целлюлозы. Усовершенствованные промышленные процессы производства этого материала за последние 150 лет привели к выпуску более тонкой и непрочной бумаги с более короткими, механически перетертыми нитями целлюлозы. Использование в массовом производстве кислот при промывке

и переплетении бумаги ускоряет процесс разложения целлюлозы — деполимеризацию, которая еще больше ослабляет листы. Целые библиотеки желтой прессы, комиксов и бульварных романов XIX и XX вв. превращаются в пыль.

Тем не менее сложно не заметить в старении нот Фреда Шупа аналогию для всех нас. Мы все деполимеризуемся: стареющие кожа, волосы, мышцы и кости — все ослабевает, по мере того как цепочки углеродсодержащих молекул распадаются.

КОДА — Музыка

Химия углерода пропитывает нашу жизнь. Почти каждый предмет, который мы видим, каждая вещь, которую мы покупаем, каждый кусочек пищи, который мы съедаем, основан на шестом элементе. Углерод влияет на все виды деятельности и события — работу и спорт, сон и ходьбу, рождение и смерть.

Вы уже наверняка заметили, что музыка — моя неистовая страсть, и за это я должен благодарить углерод. Симфонический оркестр — каждая секция, каждый инструмент — поет песнь углерода. Струнные инструменты — скрипки и альты, виолончели и контрабасы — состоят почти полностью из углеродных соединений: деревянный корпус, гриф, дужка, колки и струнодержатель, жильные струны, смычок из конского волоса и пластиковая подставка для подбородка. Им также нужны смазка для колков и вязкая канифоль для смычка.

Деревянные духовые? Название говорит само за себя: дерево образует корпус гобоя, кларнета и фагота. Бамбук используется для их язычка, пробка — для уплотнительных прокладок изящных составных корпусов. Даже металлическим флейтам нужны смазочное масло и герметичные кожаные подушечки для их поразительного ряда клапанов.

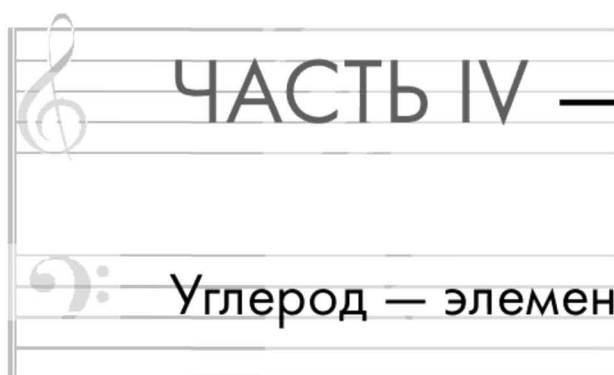
Группа ударных инструментов стучит и звенит благодаря изобилию углерода — ясеньевые барабанные палочки и корпуса барабанов, обтянутые телячьей кожей, тиковые ксилофоны и эбеновые клавиши пианино*, кастаньеты и тамбурины, деревянные коробочки и клавесин, маракасы и маримбы, барабаны конга и бонго.

С фортепиано практически та же история: деревянная рама, обитые войлоком молоточки и резиновые клапаны — все это спрятано в фигурный корпус, деликатно обработанный углеродсодержащими красками, красителями и лаком. А когда-то все 85 клавиш каждого пианино были покрыты прочными пластинками из слоновой кости — это дорогая отделка, которая стоила жизни тысячам слонов в год. Одного бивня хватало на 45 клавиш; тонкие пластинки, по три прямоугольника на клавишу, тщательно обрезались и затем раскладывались на солнце на несколько недель, чтобы получить предпочитаемый «белый» оттенок клавиш. Сегодня добротную синтетическую замену обеспечивают крепкие пластмассы — полимеры цвета слоновой кости, которые заменяют запрещенный углеродсодержащий биоматериал.

Ну ладно, скажете вы, а что насчет медных духовых? Конечно, трубам и горнам, тромбонам и тубам не нужен углерод. Покрытые серебром мундштуки, медные вставные трубки, стальные вентили-пистоны, бронзовые детали, U-образные кулисы и раструбы — все они цельнометаллические. Но лишь раз забудете смазать ваши вентили или кулисы, и через неделю все, что у вас останется, — это бесполезный кусок холодного металла.

Без углерода все бы молчало.

* У пианино — ударный способ звукоизвлечения. — *Прим. ред.*



ЧАСТЬ IV — ВОДА:

Углерод — элемент жизни

Земли, Воздуха и Огня достаточно для величественного мира, достаточно для благоприятной окружающей среды, достаточно для богатых запасов материальных благ, но не хватает ключевой сущности — Воды. Углерод еще и элемент живого мира.

Были созданы элементы Периодической таблицы. Взорвались звезды. Образовались планеты, и появилось множество химических соединений — кристаллов, жидкостей, клубящихся газов. Земля готова совершить свое самое созидательное действие. Вот-вот появится основанная на углероде жизнь.

Эволюция и излучение приносят инновацию за инновацией — собирают атомы углерода, подключают солнечный свет, создают твердые богатые углеродом раковины, пробуют силы на суше.

Жизнь эволюционирует и тем самым навсегда изменяет цикл углерода планеты, когда сферы Земли, Воздуха, Огня и Воды эволюционируют совместно.

ИНТРОДУКЦИЯ — Первозданная Земля

 редставьте себе Землю 4,5 млрд лет назад — чужой, негостеприимный мир, бомбардируемый камнями из космоса, опаляемый потоками лавы и обжигаемый выделяющимся из недр паром, пронизываемый смертельным, прямым ультрафиолетовым излучением молодого Солнца. Разве что-нибудь живое могло появиться, а тем более выжить в условиях такой экстремальной угрозы окружающей среде? Но, невзирая на безжалостные вспышки гнева юной Земли, все сырьевые компоненты для жизни уже были готовы к использованию.

Вода? Есть. Биосфера зависит от воды. Клетки более чем наполовину состоят из воды по весу, и практически все сценарии происхождения требуют водного контекста. Вода — универсальный биологический растворитель, среда, в которой клетки появляются, благоденствуют и размножаются.

Энергия? Есть. Все формы жизни требуют надежных ее источников, будь то химическая энергия пищи или энергия солнечного света. И если бы этих надежных и проверенных источников оказалось недостаточно, то и у самой древней Земли было чем похвастаться — неисчерпаемой энергией внутреннего геотермального тепла, импульсной энергией

молний и проникающей ядерной энергией радиоактивного распада.

Углерод? Есть. Углеродсодержащие молекулы жизни падали на юную Землю постоянным потоком углистых метеоритов. А еще более богатые источники компонентов для жизни появлялись из самой Земли — ее атмосферы, океанов и горных пород, по мере того как наша планета становилась двигателем молекулярной новизны.

Сцена была подготовлена. Земля, Воздух, Огонь и Вода приготовились организовать во что-то новое: Жизнь.

ВСТУПЛЕНИЕ — Происхождение жизни

История происхождения и эволюции жизни — это эпическое сказание, которое лучше всего излагать языком химии углерода. Единственным поистине переломным моментом в истории Земли стало появление биосферы. Мы знаем, что это СЛУЧИЛОСЬ: ведь мы здесь. Поэтому хотим понять, КАК это случилось. Но эта сага зарождения останется лишь невнятным рассказом, по большей части скрытым в тенях «глубокого времени». Целая (пусть и небольшая) армия ученых — исследователей, ведомых любопытством и желанием узнать то, чего никто пока не знает, — посвящает этому поиску всю свою профессиональную жизнь. Мы принимаем вызов без какой-либо гарантии, что убедительное решение будет найдено, прежде чем мы умрем, поскольку это путешествие к открытию уже заняло столетия: квест, в котором вопросов намного больше, чем ответов.

Происхождение жизни —
пять главных вопросов

Решительный репортер жаждет расследовать пять главных загадок любой истории: кто, что, где, когда и почему.

Добавьте к этому списку «как», и вы получите всеобъемлющий перечень сложных вопросов, стоящих перед исследователями происхождения жизни. На эти классические вызовы нам удастся ответить с разной степенью уверенности в своей правоте, хотя ни одна из этих загадок пока не решена полностью.

Кто и почему?

«Кто?» и «почему?» в контексте происхождения жизни — вопросы, более подходящие философам и теологам, чем ученым-практикам. Убедительных, даже категорических мнений великое множество, но наука должна оставаться нейтральной в отношении вопроса «почему?», поскольку он тесно связан с исконным вопросом о смысле и цели жизни. Наука, в отличие от философии и теологии, полагается на независимо воспроизводимые наблюдения, эксперименты и математическую логику — это эпистемология. Но наука, безусловно, дает информацию философии: в конце концов, как мы можем понять смысл и цель Вселенной, не зная основных правил космической игры? Тем не менее ученые не в состоянии рассказать нам, почему космос, со всеми своими разнообразными живыми и неживыми элементами, вообще существует.

«Кто?» — аналогичный вопрос, на который невозможно ответить с помощью какого-либо строго определенного научного метода, он требует объективных, независимо проверяемых результатов. Если мы не получим доказательств, что жизнь на Землю целенаправленно занес инопланетный разум — есть такая любопытная концепция, называемая направленной панспермией, со своей занимательно-умозрительной литературой, — вопрос «кто?» также останется за пределами узкой компетенции науки.

Когда?

У нас намного больше уверенности в ответе на вопрос, когда появилась жизнь, поскольку мы обнаружили два строгих ограничения — что-то вроде книгодержателей. С одной стороны, Луна появилась в результате впечатляющего столкновения Земли и Тейи, от которого оба мира разрушились около 4,5 млрд лет назад, на что указывает изотопный возраст, измеренный по самым старым лунным кристаллам². Даже если какая-либо форма примитивной жизни и появилась до того катастрофического образования Луны, океан магмы, заливший весь земной шар после столкновения с Тейей, уничтожил бы любое живое царство на Земле. Образование Луны привело к повсеместному стерилизующему «обнулению» океанов, атмосферы и жизни.

С другой стороны, окаменелости (несистематические ископаемые остатки из некоторых самых древних земных формаций горных пород в Гренландии) указывают на то, что микробная жизнь уже всюду существовала около 3,7 млрд лет назад. Эти характерные строматолиты — напоминающие холмики структуры, образованные напластованием микроскопических слоев минералов, отложенных микробами, — говорят нам о том, что клеточная жизнь уже была сильно развита. Отсюда мы должны сделать вывод, что жизнь появилась задолго до этих самых древних окаменелостей.

Когда точно между 4,5 и 3,7 млрд лет назад это произошло — остается неизвестным. Некоторые эксперты утверждают, что Земля была обитаемой, покрытой океанами и окруженной атмосферой уже 4,4 млрд лет назад; быстрое появление жизни говорит в пользу такой ранней даты. Другие специалисты склонны считать, что жизнь зародилась ближе к 3,9 млрд лет назад, через некоторое время после предполагаемого промежутка интенсивного разрушения

под градом больших астероидов и комет. Прямые свидетельства тех бомбардирующих земной шар ударов полностью стерлись с быстро восстановившейся коры Земли, но время и интенсивность так называемой Великой бомбардировки* запечатлелись на рубцеватой поверхности Луны. Во всяком случае мы можем с уверенностью утверждать, что Земля была миром жизни более 80% своей динамичной истории.

Где?

Вопрос «где?» в контексте происхождения жизни очень интересен, так как здесь речь идет о непознаваемых местах, которые давным-давно стерты с лица нашей планеты. Если, как полагает большинство из нас, жизнь появилась на Земле, а не на каком-то далеком космическом теле и если она появилась быстро (в течение нескольких миллионов лет после катастрофического столкновения, которое уничтожило внешние слои Земли и привело к образованию Луны), тогда в качестве самых вероятных мест появления жизни мы должны рассматривать более холодные полярные регионы Земли.

Горные породы на полюсах, которые, очевидно, затвердели первыми, были наименее подвержены огромным приливным силам, вызванным находящейся поблизости только что образовавшейся Луной. Вращаясь очень быстро, молодая Луна проходила известную нам ныне последовательность лунных фаз за несколько дней. Через несколько тысячелетий после своего образования Луна представляла собой огромный шар в небе, находящийся от Земли на расстоянии менее одной десятой от нынешнего. По непрерывно разрушаемой поверхности земного шара должны были прокатываться

* Чаше употребляется термин «Поздняя тяжелая бомбардировка». — *Прим. науч. ред.*

тысячметровые приливы. И только более холодным стабильным полюсам Земли глубокое разрушительное влияние ранней Луны 4,4 млрд лет назад практически не угрожало.

Если мы допустим более свободные временные рамки для происхождения жизни, — скажем, несколько сотен миллионов лет после образования нашей планеты, когда она остыла, а Луна отступила на безопасное расстояние, — тогда вопрос о том, где на земном шаре зародилась жизнь, уходит на второй план. Полюса, средние широты, экватор — это не имеет значения, мы никогда не сможем указать точные GPS-координаты.

Но вопрос «где?» усложняется своими интригующими поворотами. Возможно, жизнь зародилась на какой-то другой планете и Земля была засеяна извне. Эта умозрительная, непроверенная идея имеет по крайней мере два различных варианта. Более «научная» версия указывает на ближайшую планету, почти наверняка Марс, где благоприятные для жизни теплые и влажные условия могли существовать за десятки, сотни миллионов лет до того, как Земля стала обитаемой³. Если жизнь — это космический императив, который быстро возникает в любом пригодном для обитания мире, тогда микробы на Марсе, скорее всего, возникли первыми. Некоторые из этих отважных микроскопических букашек, надежно угнездившихся в защитном слое камней, могли прокатиться на марсианских метеоритах, выбиваемых в пространство сильными ударами астероидов, которые должны были испещрять поверхность Марса регулярно.

Может показаться парадоксальным, но математические модели больших столкновений указывают на то, что огромные фрагменты поверхности могли улетать в космос без значительных повреждений составляющих их пород и заключенных в них микробных сообществ. После относительно недолгого путешествия до Земли эти микробы-авто-стопщики, возможно, и стали первыми колонизаторами,

родоначальниками всей сегодняшней жизни. Пусть это звучит несколько натянуто, но одна из причин NASA для продолжения исследований Марса — поиск в защищенных под нынешней высохшей красной поверхностью планеты экосистемах микробов, аналогичных земным. Если они будут обнаружены и если окажется, что у этих микробов те же биохимические особенности, что и у жизни на Земле, тогда многие из нас сделают вывод, что Марс всех опередил и мы произошли от марсиан.

На заметку: некоторые ученые говорят о более далеком происхождении жизни. Уже упоминавшийся астрофизик Фред Хойл, ставший знаменитым после открытия тройного альфа-процесса, в ходе которого в звездах образуется углерод, был явным сторонником версии панспермии, в соответствии с которой первую жизнь на Землю занесли кометы, несущие вирусы⁴. Более того, он утверждал, что кометы продолжают инфицировать планету новыми вирусными болезнями, которые дождем просыпаются на нас из космоса. Большинство ученых считают такой сценарий абсурдным.

Другие исследователи рассматривают возможность того, что жизнь пришла из иной звездной системы, причем возможно даже, что она была искусственно создана и ее намеренно высевали в ходе направленной панспермии. Подобную гипотезу — по крайней мере на данный момент — невозможно проверить научными методами. Эта псевдонаучная идея также интеллектуально слаба, поскольку она просто переводит вопрос происхождения жизни в другое место и время. В конце концов, кто тогда спроектировал проектировщиков?

*Что такое жизнь?*⁵

Ну и наконец, сводящий с ума вопрос «что?». Если мы хотим решить загадку древнего происхождения жизни, тогда

нам бы нужно, вероятно, знать, что такое жизнь. Но мы не знаем.

Мы почти всегда узнаём жизнь, когда ее видим, но, как ни удивительно, биологи пока не смогли создать универсально приемлемого определения. Этот лексический недостаток происходит не из-за сложности распознавания прыгающих лягушек или качающихся берез, а, скорее, от нашего относительного незнания космических возможностей: у нас есть только одна биосфера для изучения, только один образец «жизни». С одной стороны, если покрытая зеленью Земля — единственный живой мир в космосе, тогда мы смогли бы легко составить приемлемый список химических особенностей и физических характеристик, уникальных для нашей биосферы. Если мы действительно одиноки в необъятном пространстве, тогда наша земная таксономия обеспечила бы всеобъемлющее определение жизни. Мы указали бы на главные химические ингредиенты, такие как углерод и вода, повсеместно распространенные молекулярные модули вроде белков и ДНК, характерные структуры, включая рибосомы и митохондрии, заключенные в микроскопические клетки — самые фундаментальные общие единицы разнообразной биосферы Земли.

С другой стороны, если во Вселенной существует бесчисленное множество других живых миров (как подозревают многие из нас — тех, кто изучает космическую историю), тогда было бы самонадеянно определять жизнь в таком узком «землецентричном» ключе. Вот почему ученые, пытающиеся отличить живое от неживого, прибегают к перечням более общих характеристик и поведения. Все вообразимые формы жизни должны иметь способность — если не индивидуально, то коллективно — воспроизводиться, расти, реагировать на изменения окружающей среды и развивать новые свойства. Управление NASA, в долгосрочную миссию

которого входит и поиск жизни на других планетах, делает специальную оговорку, что жизнь должна быть химической системой, состоящей из взаимодействующих атомов и молекул. Соответственно, компьютерная электронная «форма жизни» — растущая, эволюционирующая данность из нулей и единиц, удерживаемая кремниевыми полупроводниками например, — была бы чем-то совершенно иным, требующая новой таксономии и других организационных правил.

Вопрос «что?», таким образом, содержит в себе неоднозначность строгого определения сути жизни. Ученые подходят к этой таксономической проблеме с осторожностью и уважением, поскольку в настоящий момент у нас в наличии один-единственный пример живого мира. Это состояние незнания может измениться в любой момент — вместе с переломным открытием инопланетной жизни одним из наших планетарных зондов или при непосредственном контакте с далекими инопланетными видами. Но на сегодняшний день у нас нет научной основы для каталогизации целого ряда явлений природы, которые можно было бы назвать термином «живое» (несмотря на бесконечно творческие идеи писателей-фантастов).

Каким бы ни было все еще недоказанное космическое разнообразие жизни, попытки понять ее происхождение (или происхождения) сфокусированы на наиболее доступной и известной нам биологии — основанной на земном углероде жизни. Исследование давнего перехода от безжизненного геохимического мира к планете, богатой биохимическими процессами и явлениями, представляет собой одну из самых сложных научных проблем. Этот древний преобразующий прыжок бесконечно сложен, чтобы его можно было объяснить какой-либо одной теорией или исследовать единственной последовательностью экспериментов. Лучше разделить эту историю на множество доступных для понимания

глав, каждая из которых будет добавлять ступеньку в структуру и хитросплетения эволюционирующего мира химии углерода.

И на сладкое у нас остается *ба-а-альшой* вопрос: «Как зародилась жизнь?»

Происхождение жизни: основные химические правила

Когда берешься за одну из величайших загадок природы, лучше начинать с изучения базовых правил. Рамки исследования происхождения жизни определяются тремя основными допущениями. Первое состоит в том (и с этим согласится большинство исследователей), что планеты сами обеспечивают себя всеми исходными материалами — океанами, атмосферой, множеством пород и минералов. Кроме того, многие из нас делают вывод, что происхождение жизни потребовало некоторой последовательности химических этапов, каждый из которых добавлял свою степень сложности и функциональности — это второе допущение. И наконец, третье — главное — допущение практически каждого исследования происхождения жизни заключается в центральной роли углерода. Углерод — основной элемент жизни на Земле сегодня, поэтому большинство из нас в игре по поиску происхождения жизни исходят из того, что так должно было быть с самого начала. Но есть ли у нас такая уверенность?

Сотворение жизни: почему углерод?

Углерод — элемент кристаллов, циклов и вещества. В составе множества твердых, жидких и газообразных форм углерод играет бесчисленные химические роли, которые касаются всех аспектов нашей жизни. А как насчет живых организмов,

структуры и функции которых намного сложнее, чем у любого неживого природного или промышленного материала? Какой элемент обеспечит необходимую искру жизни?

Чтобы стать главным для происхождения жизни, этот химический элемент обязан соответствовать некоторым основным ожиданиям. Безусловно, любой важный для жизни элемент должен быть достаточно распространенным и весьма доступным в коре, океане и атмосфере Земли. Этому элементу важно иметь потенциал для участия во многих химических реакциях — нельзя же быть настолько инертным, чтобы просто сидеть здесь и ничего не делать. При этом ключевой элемент жизни не должен быть слишком химически активным — ему «не следует» самовозгораться или взрываться при малейшей химической провокации.

И даже если элемент обладает той самой средней химической активностью — в идеальном диапазоне между взрывной и пассивной, он обязан участвовать более чем в одной химической реакции. Он должен уметь образовывать прочные и стабильные структурные оболочки и волокна — кирпичики и цемент жизни. Он должен уметь хранить, копировать и интерпретировать информацию. А еще этот особенный элемент — в сочетании с другими повсеместно распространенными первичными строительными материалами — должен найти способ использовать энергию от соединений с другими химическими веществами или, возможно, энергию изобильного солнечного света. Такие «умные» сочетания элементов должны хранить данную энергию в удобной химической форме подобно батарейке и высвобождать контролируемые импульсы энергии, когда и где это ни потребовалось бы. Главный элемент жизни должен быть многофункциональным.

А теперь рассмотрим в этих ограничивающих рамках различные возможные элементы. Водород и гелий — самые

распространенные в космосе, они занимают места № 1 и № 2 в Периодической таблице и заполняют весь ее верхний ряд. И при этом не подходят для образования биосферы.

Водород, который умеет крепко соединяться только с одним атомом за раз, не проходит проверку на универсальность. Прошу заметить: водород отнюдь не бесполезен! Он помогает сформировать многие молекулы жизни посредством водородной связи — своего рода молекулярного клея, играя важную роль партнера кислорода в воде, посреднике всех известных форм жизни. Но элемент № 1 один не может обеспечить универсальную химическую основу для жизни.

От гелия, второго элемента Периодической таблицы, вообще никакой пользы — это невозможно инертный, высокомерный благородный газ, который отказывается соединяться с чем-либо, даже с самим собой.

Пробежимся по Периодической таблице: элементы с третьего по пятый (литий, бериллий и бор) слишком малочисленны, чтобы построить биосферу. Учитывая концентрацию этих элементов в земной коре — несколько атомов на миллион — и даже еще меньшую в океанах и атмосфере, их можно смело вычеркнуть из списка перспективных ингредиентов, дающих жизнь.

Углерод, элемент № 6, — химический герой биологии, мы вернемся к нему.

Элемент № 7 — азот — представляет собой интересный случай. Присутствуя в значительных количествах в близповерхностном окружении, азот составляет около 80% атмосферы. Он связывается сам с собой в пары N_2 — химически неактивные молекулы, представляющие большую часть газа, которым мы дышим. Кроме того, азот связывается и со многими другими элементами, среди них водород, кислород и углерод, образуя разные интересные химические

вещества, имеющие отношение к биохимии. Белки получаются из длинных цепочек аминокислот, каждая из которых содержит как минимум один атом азота. Жизненно важные генетические молекулы ДНК и РНК также содержат азот в своих структурных единицах — основаниях, определяющих генетический алфавит: «буквы» А, Т, Г и Ц (аденин, тимин, гуанин и цитозин). Но азот, которому до магического числа 10 недостает трех электронов, слишком уж их жаждет: его химические реакции слишком энергичные, а возникающие связи слишком негибкие, чтобы он мог играть разноплановые роли ведущего актера. Так что мы можем вывести азот из соревнования.

Но почему не кислород? В конце концов, если считать по атомам, кислород — самый распространенный элемент коры и мантии Земли: он составляет более половины всех атомов большинства пород и минералов. В группе минералов полевого шпата, которая составляет 60% объема континентов и океанической коры Земли, кислород превосходит численностью другие атомы в соотношении 8 : 5. В вездесущей группе пироксенов преобладающие атомы представлены смесью кислородных атомов и атомов распространенных металлов (таких, как магний, железо и кальций) в соотношении 3 : 2. Ну и кварц, самый распространенный минерал на большинстве песчаных пляжей, — его формула SiO_2 . Как замечательно, лежа на песке и принимая солнечные ванны, осознавать: две трети того, что держит вас, — это атомы кислорода. Вот и получается, что кислорода в земной коре при пересчете на атомы примерно в 1000 раз больше, чем углерода.

Но кислород, несмотря на свое поразительное изобилие, химически скучный. Начать с того, что у его отдельного атома восемь электронов и всего двух ему не хватает, так что он связывается без разбора с любым атомом, который восполнит дефицит. Да, кислород является абсолютной

основой всех биологически важных химических веществ — сахаров, оснований, аминокислот и, конечно, воды. Но он не умеет формировать ни требуемых цепочек, ни колец, ни ветвящихся структур, которые так важны для сложной архитектуры жизни. Поэтому мы можем вычеркнуть обильный кислород из короткого списка самых важных атомных кирпичиков жизни.

Фтор, занимающий девятую позицию в Периодической таблице, еще хуже, поскольку ему не хватает лишь одного электрона до желаемого комплекта из десяти. Фтор жадно отбирает электроны почти у всех остальных элементов. Будучи чрезвычайно химически активным, он разъедает металл, протравливает стекло и взрывается при контакте с водой. Вдохните этот газ полной грудью, и вы умрете в страшных мучениях, потому что ваши легкие покроются волдырями от химических ожогов.

И так далее. Элементы № 10 и № 18, неон и аргон, — это инертные газы, так что мы не будем их дальше рассматривать. Натрий, магний и алюминий (элементы с 11-го по 13-й) слишком жаждут отдавать электроны, а фосфор, сера и хлор (элементы с 15-го по 17-й) слишком жаждут их получать. А если мы еще глубже погрузимся в Периодическую таблицу, элементы будут становиться все менее распространенными и их способности играть ключевую роль в химии жизни окажутся еще скромнее.

Исключение составляет лишь распространенный элемент кремний, который находится в середине третьего периода нашей таблицы. Кремний, элемент № 14, занимает важную позицию прямо под углеродом. Поскольку элементы, заполняющие одну группу Периодической таблицы, часто обладают похожими свойствами, не может ли кремний стать жизнеспособным биологическим заменителем углерода? Писатели-фантасты неоднократно хватались

за эту возможность. Я живо помню эпизод из первого сезона классического телевизионного сериала «Звездный путь» (того исходного*, с Уильямом Шетнером в роли капитана Джеймса Т. Кирка и Леонардом Нимоем в роли мистера Спока), в котором экипаж «Энтерпрайза» обнаруживает расу умных и потенциально опасных форм жизни из кремния в виде камней. Концепция шоу несла развлекательный характер, особенно с учетом счастливого мирного исхода, когда камни и люди научились ладить. Но минералогическая предпосылка была ошибочной: кремний — это биологический тупик. У этого элемента на поверхности Земли есть только одна связывающая обязанность — найти четыре атома кислорода и образовать с ними кристалл. Эти раз и навсегда сформированные связи кремния с кислородом остаются слишком крепкими и негибкими, чтобы участвовать в интересной химии. Вы просто не можете основать биосферу на столь целеустремленном элементе, как № 14.

Продолжайте в том же духе — но вы напрасно потратите время в поисках еще какого-нибудь подходящего элемента. Впрочем, ваш взгляд может упасть на железо, элемент № 26, четвертый по распространенности в земной коре после кислорода, кремния и магния. Так почему не оно? Железо любит связываться, и оно гибкое в своем выборе. Соединяется ли с кислородом? Конечно: образует ржавчину с ионными связями. Соединяется ли с серой? Разумеется: создает сверкающий золотым металлическим блеском пирит (называемый, кстати, «золотом дураков») с ковалентными связями. Железо связывается с мышьяком и сурьмой, хлором и фтором, азотом и фосфором, даже с углеродом в различных минералах карбида железа. А если других элементов под рукой нет, железо радостно связывается само с собой

* Речь идет о сериале 1966–1969 гг. — *Прим. ред.*

в виде самородного металла. Такое разнообразное портфолио связей может показаться идеальным для ключевого элемента жизни, но у железа есть недостаток: оно с готовностью образует минералы с большими кристаллами, но избегает создавать маленькие молекулы. Жизнь требует огромного разнообразия молекул — в виде цепочек и колец, веток и решеток, — которые железо редко пытается образовать.

Итак нам остается только углерод — самый универсальный, самый гибкий, самый полезный элемент из всех. Углерод — это элемент жизни.

Создание жизни: что может сделать углерод?

Короткий ответ: почти всё. Задача, стоящая перед углеродом, — создать удивительный спектр молекул, которые выполняли бы все разноплановые функции жизни. Один из важнейших их признаков — форма. Успешное функционирование молекул жизни зависит в значительной степени от их трехмерной конфигурации. В некоторых случаях потребность в простой функциональной форме очевидна. Столь различные образования, как связки и сухожилия, виноградная лоза и усики растений, паутина и человеческий волос, требуют прочной связи в одном измерении, чтобы создавать напоминающие веревку волокнистые формы. Углерод проворачивает подобный фокус, связываясь в длинные, прочные, похожие на цепочки полимеры.

В отличие от них, плоские слои углеродсодержащих молекул формируют тонкие гибкие мембраны, окутывающие клетки; прочные хрящи, подстилающие ваши суставы, а также вашу гладкую, эластичную кожу. Более сложные комплексы молекул выполняют разнообразные механические функции — туннелевидных молекулярных проходов в оболочках клеток, крошечных конвейерных лент

для перемещения питательных веществ внутри клетки, трубопроводов, по которым текут жидкости, и даже субмикроскопических молекулярных моторов, толкающих сперму на встречу яйцеклетке, которая ждет оплодотворения.

Кроме того, жизнь требует многоцелевого химического набора инструментов, чтобы выполнять разные химические задачи и трюки. Некоторые полезные молекулы действуют как ножницы — обрабатывают пищу, срезая маленькие потребляемые фрагменты с больших частиц. Ваш желудок заполнен молекулами, которые переваривают белки, или жиры, или сложные углеводороды, уменьшая куски пищи до годных к обработке молекулярных кусочков. Другие молекулярные инструменты с восхитительно эволюционировавшими формами эффективно скрепляют две меньшие молекулярные мишени в новый продукт, или сортируют молекулы по схожим группам, или складывают молекулу-мишень в новую полезную конфигурацию. Некоторые из этих молекулярных инструментов содержат тысячи атомов в трехмерных формах поразительной сложности. Не одна Нобелевская премия была присуждена за дешифрование структуры и функции только одного такого молекулярного чуда.

Углерод — единственный химический элемент, который может выполнять роль скелета для столь разнообразного массива сложных молекул. Его секрет кроется в химической гибкости. Будучи элементом № 6, что на полпути между магическими числами 2 и 10, углерод может достигать стабильного состояния, добавляя электроны, отдавая их или делясь ими с двумя, тремя или четырьмя соседними атомами.

Химический секрет жизни — в контроле электронов. Жизнь зависит от строго регулируемой последовательности химических реакций — сложных процессов, которые забирают энергию, хранят энергию и используют энергию, чтобы

создавать живые ткани. Все основные химические реакции жизни вызывают перестановку атомов и их электронов. Контролируйте движение атомов и электронов — и вы сможете контролировать главные процессы жизни.

Углерод достигает этой цели, поскольку соединяется напрямую с десятками разных элементов, включая и себя самого, а также создает широкий диапазон локальных химических сред. Хотя большинство атомов углерода окружает себя четырьмя соседними атомами и каждый привносит один электрон, чтобы достичь желаемого магического числа 10, углерод также образует двойные связи, делясь с другим атомом — обычно с кислородом или с самим собой — двумя электронами. В результате образования двойных связей у атомов углерода появляется всего два или три ближайших соседа, а не четыре, как обычно. В особых случаях углерод может образовывать даже тройные связи, делясь тремя электронами с другим атомом, чаще всего с азотом или еще одним атомом углерода. Атому углерода с тройной связью нужен лишь один дополнительный электрон, который ему обеспечивает один дополнительный атом-сосед. Эти разные варианты связей сильно увеличивают геометрическое разнообразие углеродсодержащих молекул.

Некоторые из получившихся в результате конфигураций, например украшенная множеством атомов водорода длинная цепь атомов углерода, приводят к образованию углеводородных молекул, в которых каждый атом и каждый электрон находятся в довольно стабильном неактивном состоянии. За исключением случаев экстремального химического разрушения — скажем, при горении в присутствии активного кислорода — атомы и электроны молекулы углеводорода остаются на месте. Следовательно, длинноцепочечные углеводородные молекулы служат эффективными структурными элементами защитных клеточных мембран,

а также основными средствами долгосрочного хранения энергии в жирах и маслах.

Белки же, которые управляют клетками, наоборот, представляют собой большие углеродсодержащие молекулы, которые зависят от тонко контролируемого движения электронов. Их атомы упорядочены таким образом, что электрон, слабо удерживаемый несколькими атомами, часто кластером, содержащим атом металла (к примеру, железа, никеля или меди), легко может быть отдан. Подобную реакцию вызовет незначительное изменение условий, окружающих молекулу. Первая химическая реакция может вызвать следующую, а потом и еще одну — быстрый каскад смещений электронов, точно контролируемых геометрией углеродсодержащих белков. Такие цепи реакций необходимы для построения новых молекул, когда клетки растут и размножаются.

Углерод обеспечивает бесподобную молекулярную гибкость, поскольку играет много ролей. Шестой элемент принимает электроны, отдает электроны или делится ими, связываясь таким образом с десятками разных химических элементов в молекулярные цепочки, кольца и ветви с одиночными, двойными или тройными связями. Он образует столь небольшие молекулы, как CO , CO_2 и CH_4 , и при этом является составной частью гигантских молекулярных структур буквально с миллиардами атомов.

С учетом этой уникальной его многогранности нет ничего удивительного в том, что 90% лабораторных химических исследований связаны с углеродом. Посмотрите на набор дисциплин, преподаваемых на химическом или биологическом факультетах любого университета, и вас поразит непропорциональная важность углерода: органическая химия, химия полимеров, фармацевтическая химия, биохимия, молекулярная генетика, сельскохозяйственная химия, пищевая химия и химия окружающей среды. Семинары проводятся

по таким темам, как компьютеризированная разработка лекарств, особым образом свернутые структуры белков, углеродсодержащие наноматериалы, микроскопический состав почв и сложная химия вина. Все эти темы плюс еще десятки подобных основаны на химическом богатстве углерода.

Стратегии: последовательные шаги к жизни

Популярное состязание ученых в поисках происхождения жизни — вообразить его «сценарий», тщательно продуманную, с широким охватом, зачастую не поддающуюся проверке историю химических и физических обстоятельств, при которых из безжизненной геохимической среды появился живой мир. Каждый из этих воображаемых сценариев основан на каком-то ранее не учтенном физическом или химическом явлении — им может быть особенный минеральный шаблон вроде слюды или пирита, или удивительная физическая среда типа несущейся по ветру высоко в атмосфере струи аэрозоля, или сульфидный «пузырек» рядом с жерлом вулкана глубоко на океаническом дне.

Баллы (и известность) получают за новизну. Британский минералог Грэм Кернс-Смит, творчески мыслящий ученый, захватывающе читавший лекции и увлекательно писавший, привлек большое внимание своей гипотезой глиняного мира⁶. Он утверждал, что древний фрагмент глины (повсеместно распространенного скользкого минерального компонента грязи) начал самовоспроизводиться, переносить информацию и эволюционировать, чтобы стать в конечном счете шаблоном для биомолекул современной биологии. Несмотря на то что механизмы сего процесса были обрисованы довольно смутно (и, вероятно, они недоказуемы с кристаллохимической точки зрения), этот сценарий захватил воображение людей, хотя и был просто вариацией

древнееврейского мифа о Големе — существе, созданном из глины.

На конференциях и в публикациях, посвященных происхождению жизни, постоянно фигурируют концептуальные идеи вроде «мира ПАУ*», «мира слюды», «мира боратов»; каждая такая история фокусируется на новой причуде природы, каждая зависит от некоего особого обстоятельства, которое способствовало бы сложному прыжку от неживых химических веществ к живой планете.

Каким бы разумным ни показался на первый взгляд любой из предложенных сценариев, каким бы заманчивым ни был рекламный ход или страстной — презентация, мне все они кажутся немного придушенными, поскольку в них заложено отрицание удивительного богатства природных возможностей. Исследование происхождения жизни в каком-то смысле аналогично игре «Двадцать вопросов», в которой вы пытаетесь установить личность загаданного человека, последовательно задавая все более конкретные вопросы, подразумевающие ответ «да» или «нет». Понимающий стратегию игрок всегда начинает с самых общих вопросов, выясняя, жив ли загаданный человек, мужчина это или женщина и т. д.

Исследование происхождения жизни должно быть таким же. Сначала задайте самые общие вопросы. Посредством каких различных реакций природа может синтезировать биомолекулы? С помощью каких механизмов эти основные компоненты способны собираться в функциональные полимеры и мембраны? Многие сценарии происхождения, напротив, слишком ограничены — это все равно что выстрелить: «Чарльза Дарвина загадали?» первым же вопросом. Конечно, сценарии, как и озарения, могут быть оригинальными

* Полициклические ароматические углеводороды. — *Прим. науч. ред.*

и наводящими на размышления, и в кои-то веки вам повезет выиграть в «Двадцать вопросов» интуитивно, но подходить так к глубокой научной проблеме появления жизни не очень практично и вряд ли это даст удовлетворительный результат.

Есть способ получше. Самый основательный подход к ответу на вопрос о происхождении — подумать о появлении жизни как о последовательности химических шагов, каждый из которых добавлял структуру и сложность в то, что в конечном счете стало биосферой Земли. Первый шаг: вы должны создать основные многопрофильные молекулярные кирпичики — аминокислоты, липиды, сахара, основания. Следующий шаг: нужно собрать эти простые молекулы в функциональные структуры — макромолекулы, которые работают в качестве мембран и клапанов, хранят и копируют информацию, а также способствуют росту. И последний шаг: такая совокупность молекул должна научиться копировать себя.

Этот подход, рассматривающий происхождение жизни как последовательность постепенных шагов, имеет значительное преимущество перед любым неординарным сценарием, каким бы разумным тот ни был. Каждый шаг можно исследовать в целенаправленной и строгой экспериментальной программе. Каждый шаг обращается к связанным с химией углерода фундаментальным вопросам, которые важны сами по себе. И эта простая экспериментальная стратегия, скорее всего, воссоздаст последовательные химические шаги, которые должны происходить на любой богатой углеродом планете или ее спутнике повсюду во Вселенной.

Шаг 1. Возникновение биомолекул

Первый шаг, который столь же очевиден, как и любой другой аспект исследования происхождения жизни, должен

заключаться в создании главных молекулярных компонентов. В начале 1950-х гг. в Чикагском университете был проведен выдающийся эксперимент, возвестивший зарождение серьезной науки о происхождении жизни. В поисках подходящей темы для диссертации выпускник Стэнли Миллер обратился за советом к своему знаменитому наставнику Гарольду Юри⁷.

Двадцатью годами ранее Юри первым выделил и описал тяжелый изотоп водорода, названный дейтерием, — за это исследование в 1934 г. он был удостоен Нобелевской премии по химии. Во время Второй мировой войны Юри участвовал в Манхэттенском проекте и играл центральную роль в разработке атомной бомбы, отвечая за отделение расщепляемого изотопа урана-235 от гораздо более распространенного урана-238⁸.

После войны многие ученые-ядерщики отказались от тех прикладных исследований, которые привели к созданию оружия массового поражения. Гарольд Юри перенаправил свою энергию на изучение химической эволюции планеты Земля, используя изотопные характеристики горных пород, чтобы выяснить температуру древних океанов и состав атмосферы прошлых геологических эпох. Одним из важнейших открытий Юри стало осознание того, что атмосфера древней Земли, в которой до распространения влияния жизни преобладали вулканические испарения, радикально отличалась от сегодняшней. Ученый утверждал, что она представляла собой смесь химически активных газов, в частности водорода, метана и аммиака, — все они вносили свой потенциальный вклад в добиологическую химию. Никто не знал, каким химическим реакциям способствовала такая экзотическая атмосфера, но Юри пришел к выводу, что подобная смесь газов могла иметь отношение к происхождению жизни. Стэнли Миллер, вдохновленный лекциями Юри на эту тему, решил найти ответ.

Юри и Миллер совместно разработали аккуратный настольный стеклянный прибор — ряд колб и трубочек, заполненных водой (на донышке) и смесью газов, слегка подогреваемых снизу и возбуждаемых электрическими разрядами; таким образом имитировалась первичная близповерхностная обстановка, пронизываемая молниями. Опубликованные в 1953 г. поразительные результаты, о которых раструбили заголовки СМИ по всему миру, возвестили о «получении аминокислот в потенциально возможных условиях первозданной Земли»⁹. Миллер и Юри сотворили ключевые молекулы жизни из самых базовых ингредиентов — воды и тех газов, которые могли извергаться из вулканических источников на древней Земле. Это был основополагающий вклад в то, чему предстояло стать развивающимся «кустарным промыслом» исследований происхождения жизни.

А могла ли возникнуть жизнь в глубоководных вулканических источниках?

У вопроса, как появилась жизнь, есть даже более важная сторона — «где» появилась жизнь, причем, похоже, этого нам не узнать. Появилась ли она на освещенной солнцем поверхности земли? Или в темных глубинах океана? Не было другого предмета обсуждения, относящегося к вопросу происхождения жизни, который разжигал бы столь жаркие споры, был причиной стольких дебатов.

Одна из странностей человеческой природы заключается в том, что мы склонны думать в категориях дихотомии. Клод Леви-Стросс, французский антрополог и философ XX столетия, автор книги «Первобытное мышление»^{*},

^{*} Леви-Стросс К. Первобытное мышление. — М.: Республика, 1994. — *Прим. ред.*

характеризовал такое черно-белое восприятие как пережиток примитивных механизмов выживания: быстрое распознавание друга или врага могло помочь сделать выбор между жизнью и смертью¹⁰. Когда встречаешься со смертельной опасностью, нужна определенность. То, что происходит сегодня в мире, — проявления расизма, национализма, политическое фракционирование и религиозный фундаментализм, наполняющие сегодняшние новости, — это современные последствия того жесткого бимодального типа мышления, продолжающего делить человечество на два противостоящих друг другу лагеря: «мы» и «они».

Хотелось бы думать, что мы, рациональные ученые, подходим к своим исследованиям с более тонким и просвещенным мировоззрением, но стоит вам только взглянуть на основные положения истории науки, как станет очевидным, что многие исследователи попали в ту же ловушку¹¹. Более двух столетий назад величайшие геологи того времени были втянуты в напряженные дебаты, которые разделили исполненных благих намерений исследователей на две группы: униформистов и катастрофистов. Первые утверждали, что все геологические процессы постепенны и продолжают происходить в наши дни, вторые же считали, что геологическая история Земли состоит из ряда катаклизмов (читай, библейский Всемирный потоп). Сегодня очевидно, что правда где-то посередине. Подобные яростные споры разгорались между Абраамом Готлобом Вернером и его последователями-нептунистами, которые выступали за водное происхождение горных пород, и сторонниками Джеймса Геттона — плутонистами, которые считали главной причиной разнообразия структур земной коры внутреннее тепло. И снова оба лагеря оказались отчасти правы.

Открытие распространенного, легко реализуемого синтеза аминокислот и других биологических структурных

элементов в настольном эксперименте, проведенном Стэнли Миллером в 1953 г., создало новую ложную дихотомию. Миллер и большинство сторонников этого многообещающего варианта происхождения жизни пришли к выводу, что ключевая часть проблемы биогенеза решена. Биомолекулы сформировались в древней пронизываемой молниями атмосфере. «Если Бог сделал не так, — иронизировал влиятельный биохимик Лесли Орджел, — то Он упустил хорошую возможность»¹². Легко достигнутый первый успех оказался притягательным; катехизис «миллеристов» доминировал более трех десятилетий. Растущая армия учеников, воспитанная в лаборатории Миллера в Сан-Диего, распространилась по всему миру, проповедуя ортодоксию Миллера — Юри.

Открытие в 1977 г. «черных курильщиков» — вулканических гидротермальных источников с их богатыми микробными экосистемами на глубоком, темном океаническом дне — предложило интригующий альтернативный сценарий происхождения жизни, основанный на надежной универсальной химической энергии минералов, постоянно выбрасываемых вулканами. Гипотеза зарождения жизни в горных породах привлекла внимание, предъявив правдоподобный дополнительный способ создания биомолекул — более щадящий путь синтеза, который обходился без разрушительного эпизодического влияния молний. Многие из нас (особенно минералоги, чья работа внезапно стала потенциально более важной) уцепились за новую идею. Но Миллер и компания упорно боролись с идеей гидротермального происхождения жизни, публикуя статью за статьей и объясняя, почему их оппоненты-«вентисты»^{*} не правы. В выдающейся статье 1992 г., анонсированной на обложке популярнейшего

^{*} От *англ.* vent — здесь: гидротермальный источник. — *Прим. науч. ред.*

журнала о науке *Discover*, было процитировано высказывание Миллера, объявлявшего гидротермальную гипотезу «по-настоящему неудачной»¹³. «Я не понимаю, почему мы вообще должны ее обсуждать», — сетовал он.

Гипотезу глубинного происхождения жизни спасло NASA. Миссия агентства, заключающаяся в исследовании других миров (в особенности планет и их спутников), которые могут быть возможными колыбелями жизни, была расширена за счет тематики изучения глубинной жизни на Земле. В конце концов, если происхождение жизни, согласно модели Миллера — Юри, ограничено теплой и влажной поверхностной средой, периодически пронизываемой молниями, тогда Земля и, возможно, Марс на заре его существования являются единственными потенциально пригодными местами для жизни в нашей Солнечной системе. Это довольно куцый шорт-лист для организации, деятельность которой посвящена исследованию космоса. Но если главную роль может играть также глубинная темная сырая вулканическая зона, тогда полем для биоисследований становится множество других миров. На покрытых льдом спутниках Юпитера Европе и Ганимеде — и, возможно, даже на Каллисто — есть большие подповерхностные океаны, нагреваемые снизу: тепло создается в результате приливного разогрева, поскольку спутники вращаются вокруг газового гиганта.

У Титана, крупного спутника Сатурна, хотя и замерзшего с поверхности, есть криовулканы с водой, которая течет, а затем застывает подобно магме, так что Титан также может иметь глубинные гидротермальные зоны. Еще более привлекательным в данном отношении выглядит крошечный спутник Сатурна Энцелад¹⁴. Будучи всего 500 км в диаметре, Энцелад может похвастаться подповерхностным океаном и гидротермальными источниками, которые извергают фонтаны воды на покрытую льдом поверхность.

Даже сегодняшний Марс с предполагаемой теплой и влажной подповерхностной средой начинает выглядеть многообещающе в качестве дома для некоторых примитивных «подпольных» микробных экосистем. С учетом этих перспектив, хотя и умозрительных, NASA подхватило гипотезу гидротермального происхождения и начало спонсировать несколько лабораторий (включая мою) для проведения полевых исследований, лабораторных экспериментов и теоретического моделирования альтернативных жизненных сред.

Потребовалось более четверти века экспериментов и обсуждений, но в наши дни ученые действительно описывают разнообразные правдоподобные добиологические химические процессы, соотносимые с глубинными гидротермальными зонами, которые, должно быть, дополняли поверхностные механизмы синтеза. Многие исследователи фокусируются на повсеместно распространенных реакциях выветривания базальта, в результате которых свежие вулканические базальтовые потоки преобразуются в карбонатные и глинистые минералы, высвобождая водород — сам по себе прекрасный источник энергии для жизни. И стоит только появиться новому свидетельству богатства химии, основанной на глубинном углероде, некорректные дебаты «миллеристов» и «вентистов» быстро уйдут в анналы истории науки просто как еще один пример непродуктивности полярных мнений в тонких вопросах природы.

Урок, который следует усвоить, прост: наложение ложной дихотомии на вопросы о природном мире не только раскалывает исследователей, но также может препятствовать научному прогрессу, поскольку игнорируются хитросплетения сложных систем. Природа редко окрашена в черное и белое. Отбросив ложные и произвольные разделения, мы значительно быстрее продвинемся в постижении нюансов истины.

Полстолетия научных исследований, в которых участвовали сотни ученых по всему миру, привели нас к пониманию того, что двигателем органического синтеза была сама древняя Земля.

Главные углеродсодержащие молекулы жизни — аминокислоты, сахара, липиды и многие другие — в изобилии образовывались и на пронзаемой молниями поверхности, и в вулканических гидротермальных источниках в глубинах океанов, и в освещенных солнцем бухточках, и в теплых небольших водоемах. Биомолекулы падали дождем с небес как полезный груз богатых углеродом метеоритов и формировались высоко в атмосфере, когда интенсивное ультрафиолетовое солнечное излучение перерабатывало воздух.

За прошедшее десятилетие ученые Обсерватории глубинного углерода расширили этот и без того внушительный перечень, включив в него экспериментальные и теоретические данные, подчеркивающие огромный потенциал Земли и других планет в создании органических молекул в своих глубоких горячих недрах. Исследователи в десятках стран сейчас синтезируют основные био- и другие органические молекулы при столь экстремальных мантийных температурах и давлениях, которые большинство из нас до недавнего времени считали неподходящими для главных молекул жизни. Мораль проста. Было доказано, что в молодости наша планета, а также теплые и влажные планеты и спутники в космосе могли создавать молекулы жизни. Возможно, величайший вклад ушедших семи десятилетий исследований происхождения жизни и заключается в этом однозначном осознании того, что двигателем биомолекулярного синтеза является Вселенная.

Шаг 2. Отбор и концентрация

Второй шаг в происхождении жизни поднимает новые, совсем другие проблемы — не создание органических молекул,

а их отсев. Добиологическая Земля создавала углеродсодержащие молекулы в ошеломляющем изобилии — сотни тысяч разных «малых» молекул: каждая — всего с несколькими атомами углерода, каждая — доступная в качестве потенциального биокирпичика. Жизнь же, несмотря на ее поразительное структурное разнообразие, использует химическую стратегию без излишеств. Бóльшая часть клеток состоит всего из нескольких сотен отобранных молекул.

Для примера: из всего массива существующих аминокислот живые клетки для достижения большинства целей пользуются только двумя десятками. Более того, львиная доля этих 20 аминокислот встречается по крайней мере в двух зеркально симметричных версиях — в виде идентичных по своему составу левостороннего и правостороннего вариантов. Эксперименты в добиологической химии неизменно дают равное количество молекул-«левшей» и «правшей», но жизнь использует почти исключительно левосторонние аминокислоты. Тот же принцип бережливости относится к жизненно важным сахарам, практически все из которых — «правши», а также ко многим липидам и молекулярным компонентам ДНК и РНК. Следовательно, второй важный шаг на пути к происхождению жизни заключается в том, чтобы выбрать только нужное подмножество молекул и сконцентрировать их либо на поверхностях минералов, либо на прогреваемых солнцем окраинах высыхающих приливных бассейнов.

Поверхности — привлекательный вариант, которому мы с коллегами придавали особое значение. Бескрайние океаны древней Земли были слишком разбавленными для того, чтобы добиологическим молекулам удавалось регулярно встречаться и соединяться, но поверхности могли способствовать такому соединению. В некоторых случаях, как в классическом сценарии «нефть в воде», у молекул

получалось концентрироваться на поверхности воды, таким образом формируя собственные отдельные слои и глобулы.

Хорошим примером являются мембраны, окружающие клетки. Они спонтанно собираются из множества длинных «тощих» липидных молекул с углеродным скелетом¹⁵. Один конец каждой молекулы сильно притягивается водой, другой конец вода отталкивает с той же силой. Если вы опустите много таких тонких молекул с двух концов в воду, силы притяжения и отталкивания быстро выстроят миллионы этих молекул в ряд, образующий гибкую двухслойную заполненную водой сферическую структуру. Водолюбивые концы выстроившихся молекул будут на внешних сторонах липидного бислоя, окружающего полую сферу, а концы-водоненавистники окажутся друг напротив друга глубоко внутри мембраны, как можно дальше от воды.

Эксперименты со смесями добиологических молекул подтверждали этот механизм образования мембран снова и снова. Липкие молекулярные смеси, оставшиеся на стенках аппарата Миллера — Юри, либо извлеченные из богатых углеродом метеоритов, либо полученные в ходе экспериментов по синтезу при высокой температуре, — все спонтанно образуют в воде крошечные подобные клеткам структуры. Эта часть загадки происхождения жизни — неизбежное возникновение самых примитивных клеточных мембран, — похоже, решена.

Но отбор и концентрация, стягивание в одном месте большинства молекул жизни — тех, которым свойственно растворяться в воде и которые не так легко самоорганизуются, — пока остаются под вопросом. Как древние аминокислоты нашли друг друга, чтобы создать первые белки? Как молекулярные кирпичики ДНК и РНК собрались в первые структуры, чтобы нести и копировать биологическую

информацию? Чтобы решить эти загадки, многие из нас обратились к минеральному царству.

Минералы и происхождение жизни

Происхождение жизни зависело от стабильных поставок исходных материалов — химических кирпичиков и строительного раствора клеток. Для того чтобы появились клетки, нужные химические ингредиенты должны были просто встретиться и объединить силы, но эти шаги не могли произойти в слабом первичном бульоне без чьей-либо помощи.

К счастью, природа придумала несколько способов концентрации молекул жизни из разбавленного океана. Один очевидный механизм — когда океаническая вода расплескивается или поднимается в мелкий бассейн, где испаряется, таким образом концентрируя оставшиеся химические вещества в насыщенном органическом супе. Полтора столетия назад Чарльз Дарвин описал такой «теплый маленький пруд» в письме к своему другу, и уютная картинка благоприятного для зарождения жизни освещенного солнцем места закрепились¹⁶.

Стэнли Миллер, возможно нечаянно, проверил новый вариант этой идеи, поместив контейнер органического раствора в морозильник и оставив там — наверное, ученый просто забыл о нем — на 30 лет. По мере того как вода замерзала, остававшиеся крошечные карманы жидкости становились все более и более концентрированным раствором, насыщенным углеродсодержащими молекулами, которые медленно вступали друг с другом в химические реакции, создавая новые органические молекулы. Циклы замерзания и таяния на древней Земле могли подобным образом способствовать расширению списка концентрированных биокирпичиков.

Несмотря на череду разумных идей, после десятилетий тщетных попыток получить из водных смесей главных для жизни молекул полезные биологические структуры многие исследователи происхождения жизни пришли к выводу, что основную роль играло твердое основание из горных пород и минералов. Похоже, что важные функции выполняли упорядоченные атомные решетки поверхностей минералов. Некоторые минералы катализируют синтез ключевых биомолекул — аминокислот, сахаров и органических оснований. Другие минералы отбирают и концентрируют эти небольшие молекулы, адсорбируя их своей поверхностью в строго определенном положении и ориентации, защищая тем самым от химических воздействий. Минералы также обладают способностью выстраивать и связывать молекулы в функциональные мембраны и полимеры.

Эти предположения твердо укоренились в посвященной происхождению жизни литературе — хотя бы по той простой причине, что мы не можем придумать жизнеспособные альтернативы. В отсутствие минералов молекулы редко сталкиваются друг с другом, тем более соединяются в нужной последовательности. В открытом океане, особенно рядом с горячими вулканическими источниками на его дне, эти слабые молекулы, скорее всего, распадутся. Минералы отбирают, концентрируют, защищают и связывают молекулярное сырье жизни. Но несмотря на эти правдоподобные доводы, мало кто из ученых пытался провести уточняющие эксперименты, необходимые для проверки в природных условиях роли минералов.

Экспериментальные исследования механизмов, посредством которых органические молекулы поглощаются минеральными поверхностями, находятся на стыке биологии и геологии. Они сложны, поскольку требуют знаний по крайней мере в трех областях, которые редко пересекаются.

Во-первых, нужно быть специалистом по химии воды, потому что все эксперименты необходимо проводить в воде с точно контролируемыми условиями температуры, состава и кислотности. Во-вторых, понадобятся глубокие знания по органической химии — особенно по сложному поведению аминокислот и сахаров, способных менять свою форму и химические свойства при изменении водной среды. И в-третьих, хорошо бы быть знатоком минералогии, особенно в том, что касается нюансов замысловатых атомных структур кристаллических поверхностей.

Мало кто из ученых соответствует всем трем требованиям, но одна замечательная молодая исследовательница по имени Шарлин Эстрада оказалась более чем способной справиться с этой задачей¹⁷. С трехлетнего возраста, с тех пор как папа кружил ее в воздухе под музыкальную тему из «Звездного пути», она знала, что хочет исследовать Вселенную. Этот папа — профессор, занимающийся изучением американцев мексиканского происхождения, — был первым в семье, кто получил степень PhD, так что путь к научной карьере оказался проложен. «Я хотела стать астрономом, палеонтологом, археологом. Больше всего мне нравилось играть с магнитами, литым резиновым шаром в виде Юпитера, биноклями и (продезинфицированными) куриными костями. Мне ничего не казалось слишком странным или пугающим — главное, чтобы в первую очередь оно было интересным», — вспоминает исследовательница.

Стать минералогом Эстрада решила, когда ее семья переехала в Тусон (штат Аризона) — место ежегодного проведения знаменитого Шоу драгоценных камней и минералов, самого крупного в мире. Каждый год она копила карманные деньги только ради возможности пополнить свою коллекцию камней за эти несколько недель в январе-феврале, когда тысячи участников-дилеров со всего мира приезжают

в Тусон, выставляя образцы в павильонах, выставочных залах и гостиничных номерах по всему городу. Будучи студенткой Аризонского университета, Эстрада все время проводила в минералогической лаборатории Боба Даунса, где стала его лучшей студенткой — подающим большие надежды экспертом в этой области.

Я познакомился с Шарлин летом 2008 г., когда она приступила к практическим работам в моей Геофизической лаборатории. Она трудилась над лабораторными исследованиями поверхностей минералов с Димитри Сверженски и со мной, «объединяя» свои профессиональные познания в области кристаллов с углубленным изучением химии воды. За десять коротких недель Шарлин завершила элегантное исследование адсорбции аминокислот на рутиле — минерале оксида титана, который в силу особой устойчивости в воде мог служить отправной точкой для всех наших исследований поверхностей минералов.

Летом у Эстрады было своего рода прослушивание: она подала документы в аспирантуру Университета Джонса Хопкинса, легко прошла этап отбора и вскоре уже работала со Сверженски, погружившись в геохимию и науку о поверхностях. Она публиковала статью за статьей, поочередно исследуя разные сочетания минералов и молекул и проводя эксперименты, которые подкрепляли предположения, что минералы могли играть ключевую роль в происхождении жизни.

В ходе одного такого замечательного эксперимента Эстрада добавила в раствор с ионами кальция (типичным химическим ингредиентом морской воды) смесь пяти аминокислот в равных пропорциях и брусит — магниевый минерал, который обычно формируется, когда свежие вулканические породы взаимодействуют с водой и преобразуются на океаническом дне. Мы думали, что брусит адсорбирует

все аминокислоты одинаково, но Эстрада обнаружила, что только одна из пяти молекул — аспарагиновой кислоты — легко прилипла к поверхности минерала¹⁸. Но самое неожиданное — исследовательница открыла, что при адсорбции молекул аспарагиновой кислоты бруситу протянули руку помощи ионы кальция. Теперь мы понимаем, что такое сотрудничество молекул и ионов — один из ключей к пониманию происхождения жизни.

Информация

Наука — это здание, которое строит себя само. Достижения Шарлин Эстрады стали всего одним рядом кирпичиков лишь в одном углу этой конструкции, но зато указали другим путь, чтобы продолжать строительство. Следующим ученым, который присоединился к нашей команде, была Тереза Форнаро¹⁹. Получив докторскую степень в знаменитой Высшей нормальной школе в Пизе (неподалеку от Пизанской башни) и пройдя интенсивную исследовательскую программу во флорентийской Обсерватории Арчетри, Форнаро олицетворяет собой новое поколение астробиологов, которое, вероятно, раскроет секрет происхождения жизни. Ее знания необычайно широки и глубоки по сравнению с теми, что имели большинство молодых исследователей предыдущих поколений. Тереза — профессионал в областях органической химии и минералогии, планетологии и истории Земли, она с одинаковой уверенностью управляет с привередливыми аналитическими приборами в лаборатории изучения поверхностей и выполняет витиеватые квантово-механические вычисления взаимодействий минералов и молекул.

Терезе Форнаро необязательно было входить в конкурентный мир научных исследований. Она вполне могла

присоединиться к семейному бизнесу — одному из первых предприятий по производству пасты ручной работы в итальянском Неаполе, поставляющему десятки разновидностей макаронных изделий ресторанам, получившим звезды Мишлена, по всей Европе и за ее пределами. Но стремительно развивающаяся астробиология стала ее главной страстью. Форнаро энергично и жизнерадостно рассказывает о своих последних находках и быстро заряжает вас своей уверенностью и энтузиазмом.

Основываясь на исследованиях Эстрады, Форнаро взялась за одну из центральных загадок происхождения жизни — образование насыщенных информацией молекул ДНК и РНК. Многие эксперты в вопросах происхождения жизни фокусируются на РНК как универсальной молекуле, которая, наверное как ничто другое, способна отражать некоторые характеристики жизни. РНК может катализировать химические реакции, ускоряя важные биологические функции. Помимо этого, молекула умеет переносить информацию в своем четырехбуквенном алфавите: А, Ц, Г и У*. А еще у РНК есть потенциал (правда, пока не доказанный в лаборатории) делать точные копии себя, т. е. она несет основное свойство жизни — самовоспроизведение. Следовательно, гипотеза «мира РНК» не просто оригинальная идея. Для многих ученых это *та самая* гипотеза происхождения, которую надо доказать. Затруднение состоит в том, что никто пока не смог понять, как собрать стабильную молекулу РНК в правдоподобной добиологической среде. Более того, структурные элементы РНК химически нестойкие, они имеют тенденцию распадаться в воде.

Сосредоточив свое внимание на брусите, а косвенным образом и на глубинной океанической среде, которая

* Обозначение урацила. — Прим. ред.

производит впечатление неблагоприятной для образования и стабильности РНК, Форнаро изучала, как структурные элементы РНК взаимодействуют с поверхностями минералов²⁰. Она сделала важное открытие: брусит выборочно адсорбирует кирпичики РНК, защищая их от распада в водной среде. Она также обнаружила, что поверхность минерала ориентирует молекулы таким образом, который может способствовать добиологической самоорганизации РНК.

Понятно, что любой эксперимент лишь малая частица общей картины происхождения жизни. Для понимания взаимодействий минералов и молекул нужны еще десятилетия исследований. Но все больше настойчивых ученых получают обнадеживающие результаты с каждым новым экспериментом.

Эти исследования открывают важную истину о добиологической химии. Простые эксперименты только с одним или двумя химическими ингредиентами, проводимые при комнатной температуре и давлении и использующие обычную воду из-под крана, относительно легко выполнить, но они столь же легко могут привести к ошибкам, когда речь идет о процессах, ведущих к происхождению жизни. Существенную роль в появлении жизни должны были сыграть результаты сотрудничества и конкуренции большого количества молекул. Мы приходим к выводу, что сложность жизни в значительной степени связана со сложностью природной геохимической среды. Похоже, отбор, концентрация и монтаж молекулярных строительных материалов жизни требуют мудреных трехмерных процессов на атомном уровне — процессов, которые начали раскрываться в экспериментах Шарлин Эстрады и Терезы Форнаро.

Хорошие новости заключаются в том, что сложные взаимодействия между многочисленными небольшими

биомолекулами, химическими веществами в растворе и поверхностями минералов намекают на некую тропинку от геохимии к сложности биохимии. А вот и плохие новости — исследование даже крошечной доли потенциально возможных комбинаций молекул, растворов и минералов в перспективе выглядит пугающе. Головокружительное многообразие вероятных добиологических сред заставляет нас воображать буквально миллиарды сочетаний, каждое из которых потребует месяцев кропотливых экспериментов для детального изучения.

Уверенными можно быть лишь в одном: недостатка в темах для лабораторных исследований в ближайшее время у нас не будет.

Шаг 3. Возникновение самовоспроизводящихся систем

Основная загадка происхождения жизни — как небольшие молекулы, неживые и «бесплодные», соединяются в комбинацию, которая может самокопироваться. Сами по себе аминокислоты, сахара и липиды, даже тщательно отобранные и сконцентрированные, очень далеки от жизненности. Эти ингредиенты должны каким-то образом самоорганизовываться в системы большей сложности: они составляют несущие информацию полимеры, окружают себя защитными гибкими оболочками и создают катализаторы, которые ускоряют желаемый химический процесс, блокируя создание конкурирующих молекул. И затем — высшая задача: они делают собственные копии.

В качестве примера стратегии поиска такого самовоспроизводящегося молекулярного процесса можно рассмотреть углеродную химию современных клеток. Необходимо выявить самые древние и глубоко укоренившиеся пути синтеза — наипростейшие химические акты, которые

происходят в каждой живой клетке. Одним из таких примитивных биохимических процессов является известный целым поколениям студентов, изучающих биологию, цикл лимонной кислоты (также называемый циклом Кребса или циклом трикарбоновых кислот) — важный этап энергетического потока в клетках. Вероятно, вам на занятиях рассказывали, что цикл этот запускает энергически насыщенная шестиуглеродная молекула лимонной кислоты, которая проходит чуть ли не десяток последовательных шагов фрагментации, сопровождаемых небольшим выделением поддерживающей клеточные функции энергии, а также созданием молекул, служащих отправной точкой для образования основных биохимических веществ. Этот основанный на углеводе каскад химических реакций, происходящий триллионы раз в секунду в течение всей вашей жизни — чтобы обрабатывать съеденную вами пищу, — встроен практически в каждую клетку вашего тела.

Полстолетия назад биологи обнаружили, что некоторые примитивные клетки научились запускать цикл лимонной кислоты в обратном направлении²¹. Начнем с простой, имеющей в своем составе два атома углерода молекулы уксусной кислоты — основного ингредиента уксуса. Вызовем реакцию уксусной кислоты с одной молекулой CO_2 , чтобы получить трехуглеродную пировиноградную кислоту. Добавим еще одну молекулу CO_2 — и получим четырехуглеродную щавелевоуксусную. Далее последуют восемь химических реакций, каждая из которых добавит по маленькому фрагменту (H_2 , H_2O или CO_2) шаг за шагом, чтобы построить более крупные молекулы — вплоть до лимонной кислоты с шестью атомами углерода.

Этот обратный цикл лимонной кислоты способен сам себя копировать. Расщепите лимонную кислоту на одну молекулу пировиноградной кислоты и одну — щавелевоуксусной,

чтобы один цикл стал двумя. Продолжайте в том же духе, и два цикла станут четырьмя, четыре — восьмью и т. д. В качестве бонуса многие промежуточные соединения в цикле служат отправными точками создания других важных биомолекул — аминокислот для построения белков, сахаров для построения сложных углеводов, липидов для построения клеточных мембран и структурных элементов ДНК и РНК.

Исходя из его повторяющейся простоты и биохимических возможностей, многие изучающие происхождение жизни полагают, что этот обратный цикл лимонной кислоты (или что-то подобное) стал той самой первой самовоспроизводящейся системой миллиарды лет назад. Мы считаем, что именно эта химическая инновация и была действительным началом жизни. В наших текущих экспериментах, где воспроизводятся обстановки первичной Земли, уже воссоздано большинство главных химических этапов цикла (хотя и не все). Мы чувствуем, что разгадка соблазнительно близка.

Независимо от того, что стало этим стимулирующим фактором, — обратный цикл лимонной кислоты, самореплицирующаяся молекула РНК или какая-то другая самовоспроизводящаяся система, которую еще только предстоит описать, — спутанное сообщество молекул еле-еле взаимодействовало посредством этих замечательных новых способов. Но внезапно, в один момент непревзойденного творческого становления, это молекулярное сообщество начало создавать собственные копии. Как происходило это преобразование, какие молекулы участвовали и в какой последовательности они вступали в химические реакции друг с другом, мы пока расшифровать не можем — это самый большой пробел в нашем понимании происхождения жизни. Впрочем, наше нынешнее состояние незнания не столь безнадежно, как кульминационный пункт моей любимой карикатуры Сидни Харриса, на которой длинное и сложное

математическое доказательство, неразборчиво написанное ученым на доске, разбивается посередине фразой «Затем случилось чудо...», а потом продолжается дальше. Но пробелы в нашем понимании остаются, и исследователи происхождения жизни продолжают свои поиски в надежде найти простой цикл молекул, который копирует себя, хотя параллельно они горячо обсуждают природу той первой самовоспроизводящейся системы.

Говоря коротко и упрощенно, переход от неживой геохимии к живому миру выглядит как поступательное движение. Жизнь появилась в виде логической последовательности химических шагов, каждый из которых добавлял структуру и сложность углеродсодержащей молекулярной сети, и в конечном счете получился эволюционирующий живой мир. Первыми возникли небольшие молекулярные кирпичики, затем функциональные макромолекулы и наконец — соединения тех углеродсодержащих молекул, которые делали собственные копии. Если вы посетите одно или несколько научных мероприятий по происхождению жизни, которые ежегодно проводятся по всему миру, вы увидите непрерывный ряд ученых, представляющих свои последние данные и гипотезы, сопровождая их сложными диаграммами и графиками, а также уверенными заявлениями. И нужно сказать, мы действительно многое узнали о появлении жизни миллиарды лет назад. Но сколько еще остается неизвестного, скрытого, загадочного...

Вот поэтому-то исследование происхождения жизни так занимательно!

Второе Бытие: жизнь на других планетах²²

Жизнь на Земле появилась миллиарды лет назад, когда геосфера преобразовалась в биосферу. По мере того как жизнь на нашей планете, эволюционируя, выходила из глубокого

моря, захватывая сушу и воздух, расширялся и репертуар стратегий выживания.

Чего мы не знаем, так это уникальна ли данная эпическая история жизни для нашей планеты. Или она повторялась бесчисленное число раз в бесчисленных мирах по всей Галактике? Это единичное явление или множественное? Космический императив или счастливая случайность? Философы не уклоняются от споров об этом. Жак Моно, французский биолог, лауреат Нобелевской премии, занял довольно пессимистическую позицию. В своей классической книге 1970 г. «Случайность и необходимость» Моно делает вывод: «Вселенная вовсе не была чревата жизнью, равно как и биосфера — человеком. <...> Человек наконец сознает свое одиночество в равнодушной бескрайности Вселенной, из которой он возник по воле случая»^{*23}.

Многим ученым, включая поистине всех нас, занимающихся исследованием происхождения жизни, не по душе столь негативная оценка. Если это так, получается, мы зря тратим время в своих лабораториях. Бельгийский биолог Эрнест Шоффенильс так сказал за многих из нас в книге 1976 г. «Антислучайность» (своем ответе Моно), представляя альтернативную философскую позицию: «Происхождение жизни и эволюция были неизбежными, обусловленными условиями на Земле и присущими элементам свойствами»²⁴. Это занимательный спор, но никто на самом деле не знает правильного ответа.

Так случайность или неизбежность? Действительно ли глубокие космические преобразования сводятся к этому ограниченному выбору или, как склонен думать я, такая дихотомия ошибочна? Когда мы говорим о Вселенной с ее

* Эти две фразы в цитате приведены в переводе с англ. М. Вартбурга и Ю. А. Данилова соответственно. — *Прим. ред.*

постоянно возникающими и эволюционирующими системами — звездами и планетами, изотопами и элементами, жизнью и сознательным мозгом, обществом и культурой, разве не естественно задаться вопросом: какие явления неизбежны, а какие, наоборот, являются чистой случайностью? Ни в одной другой области исследований этот вопрос не стоит более актуально, являясь в то же время и более сложным, чем в отношении древнего происхождения жизни. Эволюция от геохимии к биохимии — это характерная особенность землеподобных планет или жизнь редка в космосе?

Надежных данных, подтверждающих ту или иную из этих точек зрения, не так уж и много. Во всей необъятности космоса у нас есть свидетельство только одного живого мира и только одного происхождения жизни. Мы никогда не узнаем точно, является ли жизнь космическим императивом, если не найдем «второго бытия» — второго независимого происхождения жизни. Если найдем, то будем руководствоваться правилом «ноль, один, много». Вкратце это правило гласит, что либо природное явление никогда не происходит (например, обратный ход времени), либо оно случается лишь однажды («сингулярность», как Большой взрыв), либо оно имело место бесчисленное множество раз (возможно, происхождение жизни).

О комбинаторном богатстве землеподобных планет²⁵

Размышляя о вероятностях происхождения жизни, вполне естественно представлять себе проведение экспериментов во временных и пространственных рамках исследовательской лаборатории. Обычно подготовка к защите диссертации на степень PhD занимает три-четыре года — как и вообще многие исследовательские проекты. Но в широком контексте планет необходимы химические реакции, которые

вряд ли можно наблюдать в таких ограниченных масштабах лабораторных экспериментов.

Если мы понимаем происхождение жизни как последовательность химических реакций (а я склоняюсь к химическим реакциям, идущим на поверхностях минералов), тогда мы должны задаться вопросом, сколько таких реакций могло произойти на добиологической Земле. Ответ прямо-таки астрономический. На землеподобных планетах есть тонкозернистые глины, залежи вулканического пепла, зоны выветривания и другие обнажения горных пород с огромной площадью общей поверхности, которая во много миллионов раз больше идеализированной гладкой поверхности сферы планетарного размера. Эти минеральные поверхности создают условия для молекулярных реакций уже сотни миллионов лет.

Для сравнения: отдельные химические реакции в масштабе молекул происходят за секунды. Даже скромного размера планета может соединять и смешивать органические молекулы снова и снова, эффективно пробуя разные химические реакции более триллиона триллионов триллионов триллионов раз.

Ясно, что это значит для изучения происхождения жизни. Эксперименты, требующие точного совпадения условий или необычного идеального совмещения нескольких химически активных молекул, в лабораторных условиях могут не реализоваться никогда, но в планетарных масштабах пространства и времени у них есть шанс оказаться вполне реальными. Если происхождение жизни требует более одной такой невероятной химической реакции, то нам будет сложно когда-либо решить эту проблему.

Но не стоит отчаиваться. У нас есть стратегии увеличения вероятности наблюдения невероятных химических реакций в лабораторных условиях. Мы можем отталкиваться

от современной биохимии, фокусируясь на ключевых химических соединениях и продуктах их реакций. Новые подходы в комбинаторной химии в совокупности с вычислительной химией дают надежду на быстрое сужение области поиска. Химическая и физическая интуиция будет также продолжать играть центральную роль в исследовании происхождения жизни. Тем не менее если объяснение происхождения жизни зависит от некоей привередливой реакции, которая происходит на землеподобной планете только раз на триллион триллионов триллионов взаимодействий, тогда подробное понимание химии происхождения может оказаться за пределами текущих лабораторных возможностей — даже если происхождение жизни предопределено для любого теплого влажного мира, похожего на Землю.

Независимо от того, является ли жизнь широко распространенным космическим императивом, — или это уникальный случай, ограниченный Землей, — у нас есть только один богатый и чудесный живой мир, который можно исследовать. Жизнь, основанная на углероде, появилась 4 млрд лет назад, развивая вариацию за вариацией на клеточную тему. И каждая вариация добавляла новые черты динамичному углеродному циклу Земли.

ВАРИАЦИИ — Эволюция жизни

(Тема с вариациями)

Тема: Эволюция жизни

Если бы вы смогли вернуться на 4 млрд лет назад, во времена молодой Земли, то обнаружили бы планету, которая совершает свои первые несмелые шаги в качестве живого мира. Если бы вы совершили это путешествие сквозь «глубокое время» и прогулялись по немногим появляющимся участкам суши или поплавали в омывающих весь земной шар океанах, было бы простительно, если бы вы при этом не заметили едва различимые признаки жизни. Немногочисленная популяция самых первых на Земле микроскопических клеток находила себе убежище в темных глубинах океана, цепляясь за камни, в большинстве своем укрытые от беспощадного солнечного излучения.

На ранних стадиях химической эволюции Земли происходили последовательные шаги, ведущие к появлению жизни, пробовалось и отвергалось огромное количество молекулярных структур, пока одна исключительная группа молекул не начала копировать сама себя. С этого момента — по мере того как новые копии заполняли окружающую среду — и двинулась эволюция по дарвиновскому сценарию естественного отбора. В некоторых из этих копий с неизбежностью

происходили какие-то изменения: атомы кислорода замещались атомами серы и наоборот; кластеры атомов углерода прикреплялись к основе подобно только что отросшим ветвям и кольцам; другие спонтанные вариации преобразовывали конфигурации атомов, их изгибы, спирали и петли. Большинство этих случайных изменений не оказывали особого влияния, другие же становились смертельными — буквально исполнялся дохлый номер. Но время от времени какая-нибудь молекулярная вариация срабатывала получше, способствуя более эффективному копированию или появлению цикла молекул, менее подверженных деградации, или же возникала молекула, способная «выживать» в более экстремальных условиях температуры или кислотности.

Основная тема — это эволюция, она осуществлялась посредством мощного процесса естественного отбора. Как понял Чарльз Дарвин более полутора веков назад, живые системы эволюционируют в силу трех неотъемлемых атрибутов, или признаков, жизни, которые мы все наблюдаем каждый день²⁶. Первое дарвиновское положение заключается в том, что индивидуумы каждого вида представляют собой отдельные вариации: нет двух абсолютно одинаковых дубов, или грибов, или человек. Сейчас мы знаем, что эти вариации не ограничиваются внешними размерами и формами больших и малых существ, они простираются вплоть до фундаментальных различий в тысячах белков — основных молекул жизни.

Второй атрибут всех жизненных форм Дарвин увидел в том, что всегда рождается больше особей, чем в конечном счете становится взрослыми. Это истина, хорошо иллюстрируемая расточительным образованием желудей каждую осень и пыльцы каждую весну, навсегда запечатлелась в моем мозгу во время памятного занятия «Покажи и расскажи»*

* Упражнение для развития речевых навыков у младших школьников. — *Прим. пер.*

в третьем классе. Дело происходило в начальной школе Гарнетта в Фэрвью-парк, штат Огайо. Я обычно приносил с собой в школу странные окаменелости или минералы, подобранные в ближайшем парке Роки-ривер, но в этот раз нашел удивительный кокон, прилипший к ветке. Занятие «Покажи и расскажи» было ближе к полудню, так что я положил ветку с коконом в парту с откидывающейся крышкой и забыл о нем.

Когда я открыл крышку пару часов спустя, мне вначале показалось, что на мои книги пролилась какая-то темная жидкость. Присмотревшись, я обнаружил тьмы и тьмы крошечных ползающих младенцев-богомолов. Они были везде — суется коричневой массой на моих книгах, карандашах и несъедобном теперь ланче. Увидев дневной свет, они поползли вверх, перелезая через металлические края парты и падая на пол и на штанину моих брюк. Я закричал. Тогда остальные подбежали посмотреть и тоже начали кричать; вскоре в классной комнате царил полнейший хаос. Нам на помощь пришел храбрый сторож с мощным пылесосом, но потребовалось некоторое время, чтобы класс успокоился. (Успокоившись, все единогласно заявили, что это было «самое лучшее “Покажи и расскажи”».) В любом случае нам довелось увидеть потрясающую иллюстрацию второго положения Дарвина: особей рождается больше, чем может выжить.

Третий отмеченный Дарвином ключевой признак эволюции жизни также очевиден: индивидуумы с полезными чертами, которые повышают шансы на выживание, скорее всего, передадут эти желательные черты следующему поколению. Если растение лучше других способно выдержать резкое похолодание или сквозняк, оно будет размножаться. Если животное обладает лучшей маскировкой или более развитым разумом, у него с большей вероятностью будут детеныши. Желательные черты в конечном счете побеждают.

Если три фундаментальных атрибута живого мира присутствуют, все, что вам нужно, — это много поколений (читай, много времени), чтобы жизнь эволюционировала до новых форм с улучшенными способностями к выживанию и воспроизводству. В этом суть эволюции посредством естественного отбора.

Как только первая клетка утвердилась и начала делиться, усложняющиеся петли обратной связи между клетками и их окружением привели к новым формам на суше, в море и в воздухе. Взаимодействие геологических условий и биологической новизны отразилось в шести отличающихся друг от друга вариациях эволюции жизни на Земле. Первые формы жизни — единичные клетки, настолько маленькие, что их можно увидеть только в самый мощный микроскоп, — были обязаны своим появлением почти исключительно химической энергии горных пород. Возможно, прошел миллиард лет, прежде чем появилась вторая вариация, когда более продвинутые клетки начали поглощать солнечный свет в качестве нового источника энергии. Третьей вариацией, появившейся примерно 575 млн лет назад, стала многоклеточная жизнь — новая стратегия выживания.

Вскоре после этого биологическая гонка вооружений представила следующую вариацию — четвертую, по мере того как камень зубов и когтей крошился в борьбе с броней раковин и костей. Пятая вариация появилась, когда растения и животные вышли на сушу, чтобы создать то, что — как сейчас считает большинство из нас — и есть характерный зеленый ландшафт Земли. И шестая вариация на тему эволюции, самая последняя, представляет людей, которые играют главную роль в меняющейся земной биосфере. Каждая вариация была переходом к новой стратегии использования питательных веществ и поддержания жизни. Каждая эволюционная вариация являлась, по сути, энергетическим

опытом, и каждая меняла пути циркулирования углерода между резервуарами, расположенными вблизи непостоянной поверхности нашей планеты.

Вариация 1. Микробы едят минералы²⁷

В истории жизни углерод является центральным атомом — игроком драмы, но в действие ее приводит энергия. Мы уверены, что химия происхождения основана на углероде, потому что он входит в состав всех современных биомолекул, и полноценной альтернативы ему нет. Вопрос источника энергии для жизни гораздо туманнее, а ряд вероятных ответов более разнообразен. Большая часть жизни на Земле сегодня в конечном счете получает энергию — либо напрямую, либо косвенно — от Солнца посредством фотосинтеза. Но сбор солнечного света и преобразование его в химические структуры — процесс замысловатый, соответственно, это более позднее достижение, требующее эволюции сложных уровней клеточных инноваций. Самые примитивные одноклеточные организмы на Земле сегодня используют гораздо более простое и, предположительно, более древнее энергетическое решение: они едят минералы.

Чтобы прийти к концепции минералов как пищи требуется довольно нетрадиционный взгляд на вещи, поэтому-то данная идея и приглянулась геобиологу Полу Фальковски²⁸. Дитя послевоенного демографического взрыва, выросший в Нью-Йорке, Фальковски вспоминает свое взросление «на окраине Гарлема» в 1950–60-х гг. Семья мальчика принадлежала к рабочему классу и жила небогато, пытаясь свести концы с концами. Родители Пола не особенно интересовались наукой, но они развили возникший у их сына интерес к миру природы, подарив ему микроскоп (дорогостоящий презент на день рождения, когда ему было девять)

и регулярно водя его в прославленный Американский музей естественной истории (где столь многие из нас, ученых, впервые почувствовали тягу к науке). В результате общения с молодой четой биологов, выпускников Колумбийского университета, которые жили в том же доме, в Фальковски проснулась длящаяся всю его жизнь любовь к разведению и изучению тропических рыб и их сложных замкнутых экосистем. Даже сегодня офис Пола и его лаборатории в Ратгерском университете могут похвастаться эффектными аквариумами со всевозможными цветными рыбками и кораллами.

Фальковски учился неподалеку от дома — он ходил сначала в Бруклинскую техническую среднюю школу, а затем в Городской колледж Нью-Йорка. Ненадолго погрузившись в изучение философии и логики и блестяще овладев требуемыми физическими, математическими и химическими знаниями (их перечень очень длинен и зануден), он обнаружил свое истинное призвание — океанографию. Городской колледж запустил программу по забору образцов воды и микроорганизмов из реки Гудзон и гавани Нью-Йорка на 27-метровом катамаране *Atlantic Twin*, и Фальковски, в то время студент-старшекурсник, вызывался участвовать в этих акциях при любой возможности.

Формально Пол Фальковски — официальный член Общества океанографов со степенью PhD Университета Британской Колумбии, имеющий за плечами долгие месяцы морских путешествий, среди которых переходы в Западную Антарктиду и Саргассово море. В действительности же его профессиональный путь был очень своеобразным. Годами он совмещал работу в Брукхейвенской национальной лаборатории на Лонг-Айленде — знаменитом центре физических исследований — с постом профессора геологии Ратгерского университета в Нью-Джерси. Будучи ненасытным читателем, он видит те природные связи, которые другие упустили.

Одна из самых глубоких догадок Фальковски заключается в том, что Земля функционирует подобно огромной электрической цепи, а жизнь в ней играет такую же фундаментальную роль, как лампочка, которую вы (скорее всего) используете, чтобы читать эту книгу²⁹. Вот что он имеет в виду: каждая электрическая цепь имеет три основных компонента. Во-первых, должен быть надежный источник электронов, поскольку электричество — это не что иное, как поток электронов. Во-вторых, должен быть какой-то электрический проводник, по которому они проходят. И в-третьих, должно быть место для хранения всех этих электронов, когда они переместились. Обозревая планету в глобальном масштабе — океаны, атмосфера, горные породы и жизнь, — Фальковски понял, что там присутствуют все компоненты. Электроны выходят на поверхность Земли через вулканы — особенно те, что на океаническом дне, — которые выносят насыщенные ими атомы железа из глубоких недр. В этом смысле породы эквивалентны отрицательному полюсу батарейки.

Океаны в глобальной цепи Фальковски являются «проводами»: они отводят электроны от богатых ими пород. В конце пути эти электроны оказываются в насыщенной кислородом атмосфере, которая представляет собой аналог положительного полюса батарейки. Свежие, новые вулканические породы, которые изливаются на океаническом дне, «изображают» из себя источник электрической потенциальной энергии — энергии, которая только и ждет, чтобы ее использовали.

И тут на сцене появляются микробы, которые едят минералы. Точнее, эти микробы используют химический дисбаланс, который возникает, когда некоторые минералы имеют слишком много или слишком мало электронов по сравнению со своим окружением. Как и в батарейке, огромные количества электронов (например, от богатого железом

оливина в породах, излившихся из недр Земли в поверхностную среду) готовы стать потоком. Микробы проникают внутрь пород, фактически подключаясь к этому потоку и вызывая вокруг себя «короткое замыкание». Для бактерий эта электрическая энергия вроде бесплатного ланча, в процессе которого постепенно потребляется оливин, а на его месте образуются новые минералы.

Самые первые живые организмы Земли существовали за счет минералов, которые находились в химическом дисбалансе со своими соседями. Микробы росли на минеральных поверхностях, действуя как катализаторы и ускоряя химические реакции, которые замещали старые минералы новыми видами — новыми минералами, которые, вероятно, сформировались бы в любом случае, но гораздо медленнее. На деле же все следы этих первых клеток исчезли из ископаемой летописи. Единственные зримые результаты древних микробных «банкетов» — это отдельные, как правило слоистые, залежи полезных ископаемых.

Секрет этих поддерживающих жизнь взаимодействий минералов и микробов кроется в способности многих элементов-металлов существовать в химических вариантах с разными количествами валентных электронов. Самым распространенным примером является железо. Большинство атомов этого металла, которые изливаются с вулканическими лавами, находятся в степени окисления +2, отдав два электрона окружающим атомам. Но при наличии кислорода или какого-то другого жаждущего электронов элемента железо +2 может отдать один электрон, выбросив немного энергии, и остаться вполне себе счастливым со степенью окисления +3.

Первобытные микробы, ищущие надежные источники энергии, научились катализировать переход железа от состояния +2 к +3 с отдачей электрона и по ходу дела осаждают

слои рыжих оксидов железа на океаническое дно. И действительно, самые большие в мире месторождения руд железа, а также магния, урана и других ценных элементов формировались атом за атомом деятельностью бесчисленных потребляющих минералы микробов.

За последующие миллиарды лет жизнь расширила свой репертуар стратегий получения энергии, но этот — самый древний — процесс использования пород для получения энергии сохранился, став неотъемлемой частью глобальной электрической цепи, ускоряя и расширяя поток электронов планеты Земля.

О неожиданной распространенности глубинной подповерхностной жизни³⁰

Вот примечательный факт. Пробурите скважину на глубину чуть больше 1 км практически в любой точке Земли — в пустыне или лесу, на суше или в море, рядом с экватором или за Полярным кругом, — и почти со 100%-ной вероятностью вы найдете микробную жизнь. Там не будет крупных скоплений клеток, да и сами они не окажутся какими-то причудливыми — просто небольшие сферы или прутики, едва различимые в мощный микроскоп, — но вы найдете живые клетки. Эта скрытая биосфера, состоящая почти полностью из микробных потомков первых потребляющих минералы форм жизни, является убедительным доказательством самой древней стратегии потребления энергии Земли.

Ни в одной другой области коэволюция геосферы и биосферы не проявляется так очевидно, как в подповерхностной зоне, где единственные источники энергии и питательных веществ — это горные породы и глубоко циркулирующие воды. Исследование глубинной микробной биосферы окончательно оформилось за прошлое десятилетие в ходе

«Переписи глубинной жизни» — центрального проекта Обсерватории глубинного углерода³¹. Перепись документирует подповерхностные микробные сообщества по всему земному шару, главным образом в кернах скважин и глубоких шахтах.

Бурение в поисках микробов — нетипичный подход, но он стал страстью целой группы ученых по всему миру. Они отправляются в удаленные участки континентов — Оман, Центральный Китай, горы Скандинавии и пустыни Африки, чтобы изучать поднятые на поверхность километры цилиндров породы. Ученые проникают в илистые отложения всех земных океанов, а также десятков озер — от экваториальных областей Африки и Южной Америки до Заполярья, чтобы извлечь и описать редкие популяции подземных клеток. Во избежание загрязнений поверхности следует быть очень осторожными, поскольку крошечная капля поверхностной воды может залить любой биологический сигнал из глубин.

Основная доля находок глубинных микробов приходится на океанографа Стивена Д'Ондта из Род-Айлендского университета³². Своей копной непослушных волос и внезапной широкой улыбкой Д'Ондт производит впечатление человека, который занимается наукой с удовольствием. Как многие из нас, он заинтересовался ею рано. «Мой интерес к геологии и палеонтологии проснулся, когда родители подарили мне на седьмой день рождения минералогический набор компании Porter-Spear, — рассказывает Стивен. — В нем было руководство по горным породам и минералам, несколько диагностических инструментов — бисквит*, увеличительное стекло, спиртовая горелка — и коллекция

* Сделанная из фарфорового бисквита пластинка, служащая для определения цвета черты минерала — одного из основных диагностических признаков. — *Прим. ред.*

неизвестных минералов, которые нужно было определить». Спиртовая горелка, вероятно, не соответствовала бы правилам безопасности XXI столетия, смеется Стив: «Но мне удалось ничего не сжечь».

Однако интересы Д'Ондта в начальной школе поддерживались не всеми. «Следующие несколько лет мне пришлось украдкой таскать (а потом возвращать) учебники по геологии, биологии и астрономии из школьной библиотеки, поскольку библиотекарь считал, что они мне не по возрасту». Не испугавшись препятствий, он продолжал заниматься наукой со страстью, получив в итоге магистерскую степень в Стэнфорде и докторскую в Принстоне.

Профессиональные интересы Стива Д'Ондта были сосредоточены на сложном взаимодействии жизни и Земли на протяжении геологического времени. Изучая ископаемые и химические «летописи» прошедших 100 млн лет, он начал все сильнее осознавать, что океаны Земли постоянно изменяются за счет метаболической деятельности микробов, живущих в отложениях океанического дна. «Мне стало ясно, что исследование глубинной жизни представляет исключительную и при этом новую возможность понять границы жизни и влияние микробов на Землю», — вспоминает Стивен.

Предвосхитив DCO почти на десятилетие, Д'Ондт возглавил исследовательские работы на борту бурового судна JOIDES Resolution зимой 2002 г. Буровая экспедиция в восточную часть Тихого океана (первая, сфокусированная прежде всего на поиске подповерхностной жизни) убедительно доказала, что глубинная жизнь — разнообразный, распространенный и в целом недооцененный аспект биосферы Земли.

Последующие исследования — помимо поразительного осознания, что биосфера Земли распространяется глубоко

под поверхность и на суше, и на море, — привели к важным открытиям. Сейчас мы понимаем, что подповерхностная жизнь играет ключевую роль в химической эволюции земной коры, участвуя в круговороте питательных веществ и разрушая горные породы по всей планете.

Глубинный микробный мир бросает вызов традиционным представлениям об экосистемах. Д'Ондр называет его глубинной зомби-сферой, потому что подповерхностные микробы почти ничего не делают, их и живыми-то трудно назвать — они редко двигаются, почти никогда не размножаются и существуют в невероятных пространственных и временных масштабах. Прежде всего, глубинная жизнь удивительно неторопливая. Клеточное размножение здесь происходит, возможно, раз в тысячу лет. Среднее микробное сообщество во многих подповерхностных экосистемах сохраняется миллионы лет, почти ничем не занимаясь и выживая на энергетических потоках, сила которых меньше, чем на поверхности. Плотность наиболее глубинной жизни (на глубине более 2 км) может составлять 1 микроб на 1 см³ (приблизительно соответствует кубику сахара). Если проводить аналогию с человеческим населением, то это как если бы отдельные люди жили на расстоянии примерно 640 км друг от друга.

Глубинную биосферу называли новыми дарвиновскими Галапагосами, потому что глубоко изолированные микробные популяции подобно группе дарвиновых выюлков на изолированных Галапагосских островах предоставляют нам природную лабораторию для изучения эволюции, многообразия и распределения микробов. Глубинная жизнь медленная и некомпактная, но общий объем подповерхностной биомассы, находящейся под всеми океанами и континентами Земли на глубине 1 км и глубже, ошеломляет.

Думая об этой скрытой, загадочной глубинной биосфере, вы можете задаться вопросом: сколько же жизни скрыто?

Сколько углерода скопилось в подповерхностных клетках? И насколько глубоко простирается биосфера? «Перепись глубинной жизни» сейчас насчитывает более 1200 подповерхностных «локаций» — некоторые на глубине аж 3 км — с данными о разнообразии и образе жизни этих таинственных обитателей. В связи с этим наше понимание глубинной микробной биосферы расширилось и можно сделать несколько выводов. Прежде всего, глубинная биосфера необыкновенно обильна. Несколько лет назад, когда большинство подповерхностных образцов отбирались из богатых микробами океанических отложений у окраин континентов, казалось, что по своему объему подповерхностная биосфера может конкурировать с поверхностной жизнью — всеми деревьями, травой, муравьями и китами, вместе взятими. Потому что даже на глубинах порядка 800 м и ниже прибрежные отложения содержат более 60 000 микробов на 1 см³. В пересчете на огромный объем всех прибрежных отложений Земли это очень много.

Проведенные недавно измерения в более удаленных местах — там, где океанические отложения находятся далеко от богатой питательными веществами береговой линии, — показывают, что в осадках глубоководной части океанов концентрация микробов намного ниже. Тем не менее даже пересмотренные оценки скрытой глубинной микробной популяции указывают на значение 6×10^{29} клеток, в которых содержится от 10 до 20% общей биомассы Земли, — небольшую, но бесконечно интересную часть углеродного цикла Земли.

Выживание жизни на такой глубине стоит перед по крайней мере тремя наводящими страх вызовами: давлением, температурой и энергией. Но оказывается, что давление не такое уж большое ограничивающее условие. Около 20 лет назад, просто чтобы увидеть, что произойдет, мы с коллегами

сжали культуру всем известной кишечной палочки *E. coli*³³. Мы воспользовались той же ячейкой с алмазными наковальнями, которая используется в исследованиях минералогии глубинного углерода Земли, только заполнили ячейку водой, питательными веществами и живыми микробами. Мы собирались закрутить наш винт давления до 2000 атм, что приблизительно в два раза больше давления в самой глубокой океанической впадине. Но какой-то слишком «рьяный» поворот винта привел к тому, что давление подскочило выше 10 000 атм, эквивалентных сокрушительному давлению на глубине 50 км в земной коре (своего рода момент «упс!» в мире экспериментов высокого давления). Удивительно, но некоторые микробы выжили. Из этих и последующих (более контролируемых) экспериментов мы сделали вывод, что микробные экосистемы Земли давлением не ограничены.

Выживаемость при таких экстремальных давлениях вызывает вопросы. Как могут молекулы жизни с функциями, которые столь чувствительны к строгой молекулярной форме, его выдерживать? В некоторых случаях разгадка кроется в умной химии углерода. Клеточные мембраны при низком давлении образуются из массивов молекул с прямыми углеродными скелетами, которые легко выстраиваются бок о бок, подобно сухим спагетти в коробке. Они упаковываются эффективно, но с достаточно большими промежутками, чтобы основные пищевые молекулы могли проходить сквозь мембрану.

При экстремальном давлении такое взаиморасположение, должно быть, становится слишком плотным, и необходимые для жизни питательные вещества не могут проникать в клетку. Поэтому мембраны высокого давления «подстраиваются» под изогнувшиеся углеродные скелеты, в которых у каждой скрюченной молекулы несколько искривлений.

Располагаясь рядышком, они адаптируются к высокому давлению, изгибаясь как пружинки и таким образом обеспечивая пути для питательных веществ, при этом не разрушаясь.

С температурой — другая история. Вы, возможно, думаете, что точка кипения воды (100°C) — абсолютный предел для жизни. Но давление повышает стабильность воды в жидком состоянии; ее температура в глубочайших вулканических источниках на морском дне может превышать 288°C . Более фундаментальный предел — когда разрушаются жизненно важные белки. Некоторые из них денатурируются при температуре около 127°C . Это достаточно горячо, чтобы у вас остались волдыри от ожогов, но несколько выносливых микробных видов в состоянии выдерживать и подобную экстремальную жару. Сейчас 127°C считается пределом той клеточной жизни, которую мы знаем.

Профили температуры и давления Земли связаны: чем глубже вы погружаетесь, тем горячее становится. В некоторые горячие точки вроде гидротермальных зон Йеллоу-стона или Исландии нужно опуститься всего на несколько метров, чтобы достичь температурного предела жизни. Но в более прохладных континентальных зонах, вдали от какой-либо вулканической активности, температура повышается менее чем на 7°C с каждым километром земной коры. Следовательно, вполне можно допустить, что некоторые микробы живут более чем в 16 км под поверхностью, хотя отобрать каменный образец на такой глубине пока не позволяет ни одна из самых современных технологий бурения.

Третий стоящий перед глубинной микробной жизнью вызов заключается в том, чтобы найти надежный источник энергии. Многие глубинные микробы «приурочены» к мельчайшим карманам воды, порой изолированным в течение миллионов лет. Любая химическая энергия в минеральных зернах, выстилающих эти наполненные жидкостью

полости, давно израсходовалась, но свежие исследования обнаружили другой, довольно неожиданный источник энергии — радиоактивность. В каждой горной породе есть следовые количества радиоактивного урана — возможно, один атом на миллион. Уран в природе распадается чрезвычайно медленно: его период полураспада (с испусканием разрушительных альфа-частиц) равен примерно 4,5 млрд лет. Но горные породы в целом содержат так много его атомов, что медленный и постоянный поток альфа-частиц буквально пропитывает подповерхностную область. Когда альфа-частица «плюхается» в воду, она может разделить H_2O на водород и кислород — отличную еду для микробов. Это не очень солидный источник энергии, но, видимо, его достаточно, чтобы поддерживать некоторые крошечные микробные сообщества в течение целых геологических эонов.

Как минералога меня привлекает идея, что история жизни неизбежно связана с минеральным царством. Горные породы и минералы действительно могли служить энергетической отправной точкой для жизни, но есть еще один привлекательный — и даже более многообещающий и надежный — энергетический источник. Вот потому-то жизнь и научилась жить за счет света Солнца.

Вариация 2. Для получения энергии жизнь учится использовать солнечный свет³⁴

В течение как минимум миллиарда лет примитивная, связанная с водой микробная жизнь Земли — включая как те клетки, что живут на поверхности, так и те, что находятся глубже, — играла незначительную роль в циркулировании углерода. Общая биомасса Земли была скудна, она ограничивалась маленькими редкими микробными пленками, распространение которых обуславливалось в основном химической

энергией свежих вулканических пород, контактирующих с водами океанов. Такое положение должно было измениться, когда жизнь поняла, как использовать гораздо более мощный источник энергии — свет Солнца.

Фотосинтез — потрясающая биологическая инновация. По своей сути фотосинтез, который мы знаем сегодня, с готовностью берет доступные составляющие — простые молекулы воды и углекислого газа плюс энергию солнечного света — и производит целый ряд молекулярных продуктов, необходимых для жизни (вместе с жизненно важным газом кислородом). Этот процесс представлял собой фундаментально новый и эффективный способ циркулирования углерода (сложные детали рассматривать не будем).

В основе фотосинтеза лежит фортуна: нам попросту повезло, что идущие от Солнца волны света, или фотоны, способны нести энергию. Чем короче длина волны, тем больше энергия. Мало того, эта энергия может быть передана атомам в процессе поглощения. Но, как и в истории Златовласки с тремя мисками каши, существует энергическая золотая середина, когда не слишком жарко и не слишком холодно. Для инициирования в биологии необходимой химической реакции нужно, чтобы поглотилось только требуемое для перемещения электронов между атомами количество энергии.

Атомы легко поглощают инфракрасные фотоны с длинами волн больше (и, таким образом, с меньшей энергией), чем у видимого света. Инфракрасные волны заставляют атомы колебаться немного быстрее — мы ощущаем это как тепловую энергию. Когда вы чувствуете тепло Солнца или пылающего костра, ваша кожа поглощает инфракрасное излучение, ее молекулы нагреваются. Воздействие усиливается, если объект черный, что вы, безусловно, испытывали на себе, гуляя босиком по битумному покрытию солнечным

летним днем. Однако только самые энергичные из инфракрасных фотонов — с длиной волны, близкой к той, которую мы видим, как красный свет, — обладают достаточной энергией, чтобы перемещать электроны между атомами и таким образом запускать биологические реакции³⁵.

Ультрафиолетовое излучение — с другого конца светового спектра — имеет более короткие длины волн, а следовательно, обладает большей энергией, чем видимый свет. У этих потенциально опасных фотонов достаточно энергии, чтобы полностью выбивать некоторые электроны из атомов. Этот процесс, называемый ионизацией, может разрушать атомные связи и фрагментировать важные молекулы. Если вы когда-нибудь обгорали на солнце — в данном случае из-за разрушения молекул погибают клетки кожи, — вы испытывали на себе ионизирующее ультрафиолетовое излучение. Вредные ультрафиолетовые фотоны обладают слишком большой энергией для большинства биологических потребностей.

Золотой серединой оказываются фотоны видимого света, особенно той его части, которая расположена ближе к менее «энергичному» красному концу спектра. Когда кластеры атомов хлорофилла — пигмента зеленых растений — поглощают фотоны красного света, их электроны переходят в возбужденное состояние. Эти электроны могут перескакивать с одного атома на другой, образуя новые химические связи. Фотосинтезирующие микробы пользуются этим удачным свойством фотонов световой и близкой к инфракрасной частей спектра, чтобы поддерживать биологию.

Зловонная жизнь

Самые древние версии фотосинтеза, появившиеся более 3 млрд лет назад, возможно, отличались от процесса,

описанного в учебниках, — того, который создает насыщенную кислородом атмосферу Земли. Первые потреблявшие солнечную энергию клетки использовали для поддержания биологических процессов другие химические вещества, к примеру зловонный токсичный газ сероводород H_2S — распространенный продукт вулканов. Для поглощения красных длин волн Солнца и перемещения электронов эти зеленые серобактерии осуществляли светопоглощающий процесс, названный «фотосистема I».

На первом его этапе зеленый пигмент освобождает электрон, который затем движется к другим атомам. Пол Фальковски использует удачную метафору в своей увлекательной книге о микробной эволюции «Двигатели жизни»*. Перемещение электронов между атомами, замечает он, похоже на переезд пассажиров метро от станции к станции в час пик. Представьте себе, что вы отрицательно заряженная частица (электрон), ожидающая поезд на зеленом пигменте. Отрицательные электрические заряды отталкивают друг друга, поэтому вам не так-то легко будет перепрыгнуть с вашей уютной молекулярной платформы в вагон метро, полный других отрицательных частиц. Но если одетый в форму работник платформы подпихивает вас (как это бывает в некоторых странах!), то вы рискуете оказаться втиснутым в вагон по крайней мере на перегон или два, прежде чем сможете выйти на менее заполненную молекулярную платформу.

Подобным же образом и фотон красного света может обеспечить энергетический пинок, временно перемещающий электрон с пигмента на другие атомы. Когда электрон удаляется, пигмент оказывается положительно заряженным и ему нужен другой электрон. При фотосинтезе эта

* Фальковски П. Двигатели жизни: Как бактерии сделали наш мир обитаемым. — СПб.: Питер, 2016. — *Прим. ред.*

отрицательная частица может быть взята у атома металла, который, в свою очередь, способен украсть еще один электрон у сероводорода в каскаде химических реакций, расщепляющих сероводород на водород и серу. В итоге же эти продукты химических реакций обеспечивают потрясающее топливо для жизни.

Чтобы не остаться за бортом, другие микробы для извлечения выгоды из бесплатного солнечного ланча развили совершенно иной биохимический путь — фотосистему II. Эти другие микробы, в том числе так называемые пурпурные бактерии, поглощают немного больше энергетических фотонов, чтобы сдвигать и перемещать электроны, но окончательный результат примерно тот же. Электроны перемещаются в цепочке реакций, которые в конечном итоге расщепляют сероводород и вырабатывают топливо для жизни.

Появившись более 3 млрд лет назад, зеленые серные и пурпурные бактерии до сих пор живут в изолированных подводных сообществах. Ищите их в глубоких стоячих водах, в которых солнечный свет проникает в те зоны, где абсолютно нет кислорода — смертельного яда для этих первобытных микробов. Но самый значительный вклад упомянутых двух типов примитивных клеток заключается не в том, что они рассеянно распространены на Земле и сегодня, а в кардинальной эволюционной инновации, которая связала их две отдельные светопоглощающие стратегии в современную двухэтапную версию фотосинтеза.

Мощь воды

Адекватным химическим топливом для зеленых и пурпурных бактерий служат сульфиды. Появившись по крайней мере 3,5 млрд лет назад, эти настойчивые кланы микробов использовали сульфиды плюс одиночные фотоны красного

света, чтобы поглощать энергию Солнца. Но сульфиды не особенно-то распространены на поверхности Земли, да и энергия серы и водорода не лучшее из того, что может предложить наша планета.

Вода намного лучший вариант. Этот оксид водорода не только гораздо более распространенное вещество, нежели сероводород, — вода также может обеспечить биологическое топливо в форме кислорода и водорода, которое дает куда больше энергии. H_2O представляет собой основное топливо для жизни на Земле, но есть проблема: чтобы расщепить воду, необходимо намного больше энергии, чем для расщепления сероводорода. Одиночным фотонам это не под силу. Потребовался миллиард лет проб и ошибок, но в конечном счете какой-то везучий микроб обнаружил двухэтапный процесс кислородного фотосинтеза — координированного *сочетания* фотосистем I и II. Такая последовательность поглощений фотонов и обеспечивает ту дополнительную энергию, которая необходима для расщепления воды на водород и кислород.

В ходе цепочки химических реакций, следующих за расщеплением воды, живые клетки бурно разрастаются. Вот что здесь самое важное: молекулы водорода и углекислый газ вместе образуют один из видов сахара — глюкозу, а кислород остается в виде отходов. Молекулы глюкозы соединяются в прочные цепи целлюлозы — главной составляющей зеленой биомассы и, следовательно, самой распространенной биомолекулы на Земле. Стебли и листья, корни и ветви, трава и стволы деревьев — половина современной биомассы Земли — это целлюлоза. Неистовое образование этого вещества повлекло за собой серьезные последствия. Миллиарды лет назад, по мере того как фотосинтезирующие клетки впитывали солнечный свет, углекислый газ в атмосфере становился сырьем для живых клеток. Воздух и вода постепенно

превратились в массы зеленых водорослей, которые заполнили мелкие прибрежные зоны. Богатая углеродом биомасса канула на дно, где продолжала накапливаться, при этом содержание кислорода в атмосфере и океанах постепенно росло.

Земля подошла к переломному рубежу чуть более 2 млрд лет назад — тогда произошло Великое кислородное событие, после которого ускоряющиеся, связанные между собой циклы углерода и кислорода наставили Землю на путь к современному миру. Находясь в зависимости от кислородной атмосферы, мы часто забываем, что образовавшийся в современной двухэтапной версии фотосинтеза кислород был просто побочным продуктом — формой химических отходов, которые очень долгое время не играли существенной роли в развивающейся истории жизни.

Великое кислородное событие, напротив, сыграло выдающуюся роль в эволюции геосферы. К тому моменту атмосфера стала побогаче кислородом — его уровень достиг 1 или 2% от современного. Многие горные породы начали вступать в химические реакции с агрессивным газом, результатом которых стал целый поток новых минеральных видов, ранее не встречавшихся на Земле (или вообще где-либо в нашей Солнечной системе, коли на то пошло)³⁶.

До Великого кислородного события атомы металлов в большинстве минералов находились в их наиболее восстановленном, богатом электронами состоянии. Относительно распространенные элементы, к примеру железо и марганец, вместе со множеством более редких металлов, таких как медь, никель, молибден и уран, были сконцентрированы не более чем в нескольких сотнях минеральных видов. Льющийся в атмосферу поток кислорода изменил этот сценарий: по мере того как газ захватывал любой свободный электрон, который только мог найти, появлялись тысячи новых минералов.

Мы с коллегами пришли к выводу, что два из каждых трех минеральных видов на Земле, включая многие самые ненаглядные цветные кристаллы, выставленные в музеях естественной истории по всему миру, являются прямыми следствиями кислородного фотосинтеза. Большинство минералов меди, в частности темно-зеленый малахит, ярко-синий азурит и полудрагоценная бирюза, появились уже после Великого кислородного события. Более 90% из почти 300 разных видов урановых минералов, многие из которых представлены ярко-желтыми и оранжевыми кристаллами, также являются косвенными последствиями фотосинтеза. Углеродсодержащие минералы тоже стали разнообразнее после этого эволюционного изменения близповерхностной химической среды Земли.

Осознание того, что эволюция земных минералов зависит напрямую от биологической эволюции, слегка шокирует. Это фундаментальное изменение точки зрения, которая существовала несколько десятилетий тому назад, когда научный руководитель моей диссертации по минералогии сказал мне: «Не трать время на биологию. Она тебе никогда не пригодится!»

Вариация 3. Появляется большая жизнь³⁷

Закройте глаза и представьте себе «жизнь».

Готов поспорить, что вы подумали о чем-то большом — быть может, о вашем коте, или цветке, или воробье у кормушки. Могла прийти на ум даже еще более крупная форма жизни — любимое дерево, панда или, возможно, слон. Начиная со зверинца Ноева ковчега и до современных городских зоопарков, наибольшим вниманием пользуется харизматичная мегафауна. В контексте же истории Земли это сильно искаженный взгляд на жизнь.

По крайней мере три четверти истории Земли «жизнь» состояла исключительно из микроскопических клеток, в большинстве своем скрытых глубоко под землей и только время от времени показывающихся на поверхности в виде каменных строматолитовых построек или зловонных масс нитей зеленых водорослей. Вам бы потребовался мощный микроскоп, чтобы получить хоть какое-то представление о том древнем живом мире. Сегодняшняя биосфера, наполненная плавающими, ползающими и летающими существами, — относительно недавняя инновация, представляющая лишь последнее 10% времени богатой событиями эволюционной истории Земли. И в связи с этим возникает вопрос: зачем после 3 млрд лет успешной жизни в одноклеточном виде клеткам нужно было начинать сотрудничать таким образом, чтобы стало возможным появление этих больших организмов?

Самый простой ответ заключается в том, что единичной клетке сложно делать все это: создавать основные молекулы жизни или питаться ими, защищаться от других голодных клеток и делать точные копии себя поколение за поколением. Вот почему самые простые одноклеточные организмы природы зачастую живут в сложных сообществах, называемых консорциумами, в которых разные виды клеток играют специализированные химические роли. Микробные консорциумы исполняют изящный электронный танец, постоянно передавая электроны от доноров к акцепторам. Некоторые микробы получают энергию от Солнца, другие — от химических веществ, вырабатываемых их фотосинтезирующими соседями. Многие члены консорциума развивают особые химические навыки, производя только часть основных биомолекул для других членов клуба. Следовательно, выживание клеток в консорциумах полностью зависит от их соседей.

Эти умные кластеры клеток похожи на нашу обусловленную энергией экономику. Некоторые бодрые, энергичные

люди производят энергию, добывая уголь, выращивая продукты питания, собирая солнечный свет или обуздывая ветер. Другие специализируются на производстве полезных товаров — машин, одежды, домов, музыки — и обменивают эти продукты на энергию. Так же и клеточные консорциумы состоят из множества клеток, каждая из которых является независимым подрядчиком, играющим свою роль, что основана на ее отличной от других генетической идентичности и внутренней химии.

Преимущества совместной игры

Как минимум 1,5 млрд лет назад появился абсолютно новый и чрезвычайно важный вариант клеточного сотрудничества — когда у группы относительно крупных одноклеточных организмов, называемых эукариотами («полноядерными» в переводе с греческого), образовались внутренние структуры, окруженные собственными мембранами³⁸. Эти органеллы (что-то вроде жизненно важных органов людей) включают в себя ядро, содержащее ДНК клетки, митохондрии, которые действуют как клеточные энергетические станции, и хлоропласты, которые накапливают свет и преобразуют его в богатый энергией сахар. Некоторые биологи считают появление эукариотов самой важной инновацией в истории жизни, поскольку в результате этого события клетки получили источник внутренней энергии, позволивший им развиваться и кооперироваться как никогда раньше.

Как же возникла эта новая сложная клеточная архитектура эукариот? Основные подсказки нам дают митохондрии и хлоропласты. У них есть собственные мембраны и собственная ДНК, и они сами воспроизводятся, как если бы были независимыми клетками, живущими внутри более крупного эукариота. Сегодня общепризнано, что эукариотические

клетки появились, когда бóльшая клетка проглотила одну или несколько меньших. Гости не были переварены более крупным организмом, вместо этого сложился новый вариант сотрудничества.

Этот концептуальный прорыв, который заметнее всех поддерживала блестящая и противоречивая исследовательница Линн Маргулис, стал теперь прописной истиной, пересказываемой с прекрасными иллюстрациями в каждом учебнике по введению в биологию³⁹. Но так было не всегда. В течение двух десятилетий биологическое сообщество резко критиковало гипотезу симбиогенеза. Статья Маргулис 1967 г., отстаивающая эту концепцию, отвергалась более десятка раз; заявки на грант также были отвергнуты, да еще и с едкими замечаниями⁴⁰.

Горячность критики отчасти была вызвана тем, что новая гипотеза воспринималась как угроза устоявшейся эволюционной теории. Дарвиновская парадигма эволюции посредством естественного отбора требовала изменений постепенных, происходящих благодаря бесчисленным, обычно небольшим мутациям, за которыми следовало выборочное отсеивание среди разных популяций более или менее подходящих индивидуумов. В версии дарвинизма XX столетия эти мутации возникали исключительно из-за генетических вариаций ДНК. Гипотеза же симбиогенеза утверждала, что новые формы жизни иногда появляются при взаимном слиянии двух совершенно разных видов. Какое-то время наука находилась в досадном тупике, пока не произошло открытие ДНК в митохондриях и хлоропластах и не стало ясно, что эти органеллы некогда были независимыми клетками.

И хотя бионаучное сообщество приняло симбиотическое происхождение эукариот, наградив Маргулис десятками призов, медалей и почетных степеней, все же оказалось, что исследовательница раздвинула границы дозволенного. Симбиоз,

утверждала она, является *главной* движущей силой эволюции жизни. Генетические вариации происходят в первую очередь из-за перемещения ДНК между клетками, а не вследствие мутаций. Продвигая свои взгляды, она критиковала неодарвинистов, которые, по ее словам, «погрязли в своей зоологической, капиталистической интерпретации Дарвина, основанной на понятиях конкуренции и экономической выгоды»⁴¹.

Маргулис видела симбиотические эволюционные пути везде — в термитах, коровах, деревьях и людях. Подкрепляя свои страстные выступления массой анатомических и молекулярных данных, она утверждала, что буквально каждая клетка на Земле критическим образом зависит от какой-то другой группы сотрудничающих, а не конкурирующих клеток. Без специализированных органов, наполненных питающимися целлюлозой микробами, термиты и коровы умерли бы. Без обширных симбиотических сетей корневых грибов, не говоря уже о разнообразном зверинце микробов в почве, погибли бы деревья. На самом деле Маргулис представила в этом новом симбиотическом контексте всю природу — в виде так называемой гипотезы Геи, согласно которой Земля сама функционирует как единая саморегулирующаяся система.

В 2011 г., всего за несколько недель до ее преждевременной смерти от сердечного приступа, я встречался с Линн Маргулис у нее дома в Амхерсте — она преподавала науки о Земле в местном кампусе Массачусетского университета. Маргулис сама была силой природы — агрессивно-любопытной, всегда подвергавшей сомнению условности и творчески переосмысливавшей природу. Она получала искреннее удовольствие от своих исследований, и мне было ясно, что Линн просто хотела знать, как функционирует природа, и отказывалась принимать традиционные объяснения сложных проблем.

Дом Маргулис стоял по соседству с домом-музеем Эмили Дикинсон, и, пока мы гуляли и разговаривали, она иногда прерывалась и читала какие-нибудь «припасенные» стихи Дикинсон, указывая именно на ту узкую тропинку или тот ряд кустов, которые были упомянуты в строках. Маргулис пригласила меня в Амхерст, чтобы обсудить ее крепнущее убеждение, что эволюцию посредством симбиоза можно расширить до не рассматриваемых ранее аспектов геосферы Земли. Тот разговор в некотором смысле предвосхищал основные идеи минеральной эволюции, хотя я не осознавал этого в то время. Если бы я только мог поделиться с ней теми идеями...

Загадочные вариации⁴²

Без малого миллиард лет — бóльшую часть протерозойского эона Земли, который охватывал огромный интервал времени с 2,5 до немногим более 0,5 млрд лет назад, — эукариотические клетки вели уединенную жизнь. Между современной, полной сил биосферой и тем могучим миллиардолетним микробным царством имел место короткий загадочный этап «выпуска новинок» — эдиакарский период*, когда появились первые сложные многоклеточные организмы. У мягкотелых животных гораздо меньше шансов сохраниться в виде фоссилий в каменной летописи Земли, нежели у их собратьев, обладавших твердыми раковинами. Тем не менее ископаемые остатки червей и медуз находят по всему миру в мелкозернистых горных породах с пониженным содержанием кислорода, где мертвые организмы, скорее всего, «мумифицировались».

* В русскоязычном пространстве очень часто используется другое название этого периода — вендский, или венд. Впрочем, следует отметить, что временные границы эдиакария и венда немного различаются. — *Прим. ред.*

Самые первые необычные отпечатки больших мягкотелых ископаемых, которые вы можете подержать в руках, появляются в породах, образовавшихся, согласно оценкам, примерно 575 млн лет назад — почти за 35 млн лет до широкого распространения животных с минерализованными раковинами. В диапазоне размеров от маленьких монеток до обеденных тарелок эти странные, округлые и напоминающие очертаниями листья пальмы существа, очевидно, жили в своего рода подводных садах на древнем океаническом дне. Споры относительно их биологической принадлежности много. Большинство исследователей считают, что они были животными, возможно типа губок или медуз, хотя столь же вероятно, что у них нет близких ныне существующих родственников, с которыми можно было бы установить их родство. Другие утверждают, что они представляли собой первые фотосинтезирующие растения или даже примитивные формы лишайников. Продолжающиеся дебаты добавляют очарования эдиакарской загадке.

Хорошо сохранившихся образцов эдиакарских ископаемых мало, и находят их на большом расстоянии друг от друга, часто в отдаленных и недоступных местах, таких как обожженные солнцем скалы Долины Смерти в Калифорнии, медвежьи углы в горах Маккензи на северо-западе Канады, далекие утесы арктической Норвегии и беспокойные с политической точки зрения местности в Иране и Сибири. Это не легкодоступные и распространенные раковины более поздних организмов или притягательные кости динозавров; чтобы свести воедино разрозненные ископаемые находки эдиакарского периода, нужен палеонтолог особого склада.

За эту работу взялся Майкл Мейер — в недавнем прошлом мой коллега по Институту Карнеги, а ныне сотрудник Гаррисбергского университета в Пенсильвании⁴³. На первый взгляд и не скажешь, что Мейер — отважный

путешественник по миру. Он щеголяет в ярких гавайских рубашках, украшает свой кабинет постерами из «Звездных войн» и использует забавные фото своей маленькой дочки Сэм в качестве заставки на экране компьютера. Вас бы поняли, если бы вы приняли Мейера за обычного сотрудника, просиживающего штаны в будни с девяти до пяти. Но затем выясняется, что он работает в своем кабинете допоздна, монитор его компьютера заполнен таблицами и графиками, вокруг стоят коробки с образцами, помеченные надписями «Южная Африка» или «Хуанлин, Китай». Исследователь небрежно замечает, что у него было «запредельно много опасных для жизни столкновений с животными... ламантинами, аллигаторами, акулами, львами».

После защиты диссертации в Южно-Флоридском университете и полевых исследований в Южном Китае, Аргентине и на горном хребте Флиндерс в Австралии Мейер пришел в мою безопасную (в плане отсутствия хищников) лабораторию, чтобы изучать древнюю жизнь. Мы честолюбиво намеревались создать новые базы данных окаменелостей и расширить уже существующие. Палеонтологи были на шаг впереди в этой игре, потратив десятилетия на создание «Палеобиологической базы данных»^{*} — хранилища сотен тысяч записей по ископаемым остаткам со всего мира⁴⁴. Тем не менее база данных не была полной, особенно по образцам, относящимся ко времени до «кембрийского взрыва» — геологического события, которое имело место примерно 540 млн лет назад, когда начали повсеместно распространяться организмы с раковинами. Тесно работая со своими коллегами Дрю Масенте и Энди Кноллом из Гарвардского

^{*} Paleobiology Database (PBDB) — онлайн-база данных, предоставляющая информацию о местонахождении, датировке и классификации ископаемых остатков животных, растений и микроорганизмов. — *Прим. науч. ред.*

университета, Мейер взялся раздвинуть «Палеобиологическую базу данных», включив в нее всех эдиакарских ископаемых.

Через год их работы — штудирования публикаций и общения со специалистами по всему миру — на свет появился каталог 95 типов ископаемых организмов из почти 100 местонахождений по всему миру⁴⁵. Во всеоружии этой всеобъемлющей таблицы Мейер и Масенте смогли увидеть скрытые ранее закономерности. Эксперты выделяют в эдиакарском периоде три стадии. Самая ранняя — авалонская — началась около 575 млн лет назад, вскоре после оледенения Гаскье, когда, как предполагают некоторые специалисты, большая часть поверхности Земли от полюсов до экватора была покрыта слоем льда и снега. В течение 15 млн лет после глобального ледникового периода на планете произошел значительный подъем температур и появились первые похожие на пальмовые листья существа в отложениях, которые, судя по всему, формировались в относительно глубокой океанической среде.

Животные следующей, беломорской стадии — промежутка времени в 10 млн лет, продолжавшегося с 560 до 550 млн лет назад, — отличались от авалонских. Их окаменелости характеризуются резким увеличением разнообразия, наличием десятков видов соревнующихся форм, напоминающих листья папоротника и ветвящиеся структуры, которые сосуществовали с разнообразными плоскими животными, ископаемые остатки которых выглядят как плиссированные блинчики или миниатюрные надувные матрасы.

Заметно, что в течение третьего и последнего эдиакарского отрезка времени — намского, продолжавшегося с 550 до 541 млн лет назад, — произошло смещение к прибрежным отложениям и появился целый ряд новых существ, включая более десятка животных, похожих на трубочки,

а также напоминающих доисторический тако* своей странно согнутой формой.

Вооружившись новыми результатами, Мейер и Масенте оказались готовы сделать поразительное открытие. Разместив все данные в виде сетевой структуры наподобие паутины, где точками были обозначены биологические виды, а те из них, которые существовали вместе, соединялись линиями, ученые изобразили всю эдиакарскую фауну в виде одной открытой «сетевой диаграммы». Получившаяся картинка представляла две отдельные группы организмов — все авалонские существа собрались в одном углу сети, а смесь беломорской и намской фаун — в более крупном центральном кластере. Только три вида эдиакарских ископаемых организмов присутствовали в обоих кластерах.

То, что увидели Мейер и Масенте, стало прямым свидетельством массовой смены фауны 560 млн лет назад, когда большинство авалонских животных исчезли, а их место заняли новые организмы⁴⁶. Специалисты до сих пор не определили, насколько сильным и внезапным могло быть это изменение. С одной стороны, породы, несущие в себе окаменелости авалонского возраста, характеризуют удаленную от берега обстановку континентального шельфа — в отличие от более мелководных, «потрепанных» волнами осадков, содержащих окаменелости беломорской и намской стадий. Так что изменение фауны можно просто объяснить незначительной переменой места жительства организмов, переехавших из глубоких вод в более мелкие. С другой стороны, не исключено, что резкий контраст между более древней авалонской фауной и более молодой беломорской указывает на драматичный эпизод массового вымирания — и это можно считать самой древней глобальной гибелью

* Мексиканский пирожок. — *Прим. науч. ред.*

организмов, «записанной» в ископаемых находках. (Даже Мейер и Масенте не могут прийти к согласию по этому вопросу.) Эта эдиакарская история выявляет, безусловно, лишь одно — нам еще многое предстоит узнать об эволюции жизни за 4 млрд лет.

Самые древние эукариоты демонстрировали выдающееся усложнение клеточной жизни — они были более крупными, более разнообразными и владели бóльшим химическим репертуаром, чем любая предыдущая форма жизни, но все еще оставались одноклеточными. В многоклеточных же червях, или медузах, или похожих на папоротник существах должны сотрудничать и специализироваться на чем-то конкретном уже разные виды клеток. Некоторые из них находятся с внутренней стороны организма, другие — снаружи. Некоторые формируют верхнюю часть «пальмовых листьев», а другие прикрепляются к океаническому дну. Присмотритесь внимательнее, и вы обнаружите, что клетки играют также и разные химические роли — собирают пищу, переваривают питательные вещества, распределяют основные биомолекулы и удаляют отходы.

Фундаментальное правило жизненной игры заключается в том, что инновации должны быть выгодными. Так почему же после 2,5 млрд лет вроде бы стабильной одноклеточной жизни клетки начали склеиваться в консорциумы и играть специализированные роли? Такие формы жизни сталкиваются по крайней мере с тремя вызовами, которые не стоят перед одноклеточными. Во-первых, их клетки должны приклеиваться друг к другу упорядоченным, структурированным образом; большинству многоклеточных организмов нужны голова и хвост — или верх и низ. Во-вторых, эти клетки должны сотрудничать при использовании атомов и энергии. Специализированные клетки, которые собирают пищу, обязаны делиться своим богатством с остальными. И в-третьих,

подобно всем формам жизни, клетки этого сообщества должны найти способ делать точные копии себя. Это значительные трудности — вызовы, которые не появились бы, если бы их преодоление не вело к каким-то преимуществам.

Еще одна проблема многоклеточности — энергия. Концентрированная масса клеток, особенно такая, где клетки выполняют специализированные функции, требует относительно концентрированной формы энергии. Каждая клетка — это крошечная электрическая цепь, которой нужен поток электрических зарядов. Поэтому почти все многоклеточные формы жизни на Земле зависят от концентрированной химической энергии кислорода. Для сравнения: водород или сера не могут обеспечить многоклеточную жизнь достаточной энергией. Каждая клетка животного требует стабильной поставки кислорода, так что клетки, находящиеся внутри, могли бы оказаться в проигрыше. Для решения этой проблемы появились по крайней мере две стратегии. У некоторых примитивных организмов клетки образуют сложенные в складки слои с промежутками между ними, которые позволяют кислороду из окружающей среды достигать каждой клетки. Тогда получается, что все клетки находятся как бы снаружи. Более совершенные организмы вроде нашего имеют сложную кровеносную систему, в которой кровь является тем самым высокоспециализированным агентом доставки кислорода.

Несмотря на все эти препятствия, многоклеточные организмы эволюционировали и распространялись с необыкновенной скоростью. Появились новые стратегии выживания, стимулируемые повышающейся конкуренцией за ресурсы — еду, территорию и защиту; животные научились есть растения и других животных. И при этом живые клетки играли еще более активные роли в динамичном углеродном цикле Земли.

Вариация 4. Жизнь учится создавать минералы⁴⁷

Жизнь всегда была историей выживания: найти пищу, произвести потомство, не дать себя съесть. За последние полмиллиарда лет биосфера переживала эскалацию этой конкурентной эволюционной саги, буквально гонку вооружений — разящего оружия и защитной брони. Все это началось, когда клетки научились создавать минералы.

Никто не знает, когда или где точно появилась первая раковина. Прародители ее — в глубокой древности. Более 3,5 млрд лет назад одноклеточные колонии, как говорилось выше, построили строматолиты — странные куполообразные холмики карбонатных минералов. Уже первые признаки многоклеточной жизни, появившиеся примерно 600 млн лет назад, сопровождались образованиями, подобными аляповатым минерализованным пластинкам и «бронированным» то там, то сям следам ползания. Но настоящий взрыв разнообразия организмов с изящно вылепленными твердыми частями — спиральными раковинами, ветвящимися кораллами, пиловидными зубами и сложного рисунка костями — произошел в «узком окне» начала кембрийского периода, примерно 540 млн лет назад. Первыми появились карбонатные минералы, хотя подробности этого поразительного минералогического трюка остаются загадкой. Сначала клетки должны были создать локальную химическую среду, в которой ионы кальция и углерода в растворе соединились бы, сформировав твердые кристаллы оболочки. Затем минеральные компоненты должны были выстроиться таким образом, чтобы создать функциональный защищающий животное дом. Как это случилось?

Изучение данной биохимической инновации является делом всей жизни Патриции Дав, заслуженного профессора факультета наук о Земле в Политехническом университете

Вирджинии в Блэксбурге, штат Вирджиния⁴⁸. Дав получает удовольствие от занятий наукой. Чтобы продемонстрировать повседневные шедевры биоминерализации, она протянет вам разделенную на камеры и покрытую тонким орнаментом раковину наutilus или вытащит из кармана яйцо. Исследовательница никогда не теряла ощущения чуда, испытываемого ею с детства, с тех пор как она росла на семейной ферме в Бедфорде, штат Вирджиния, в часе езды на машине к востоку от Блэксбурга. Это типичная история многих успешных ученых: родители и учителя, которые поддерживали увлечение наукой, любовь к природе и коллекционированию, призы, получаемые на научных олимпиадах, и стипендия в колледже — в случае Дав это был Политехнический университет Вирджинии. За получением степени PhD в Принстонском университете последовало недолгое пребывание в Стэнфорде и Политехническом университете Джорджии, а затем она снова вернулась в свою любимую Вирджинию.

Во всех своих исследованиях Патриция Дав подчеркивает, что раковины, зубы и кости — это гораздо больше, чем просто кристаллы минералов. Они всегда содержат в себе слои и волокна белков и других биомолекул, которые добавляют им прочности и гибкости — свойств, вдохновивших на разработку легкого стекловолокна и композиционных материалов из углеродных волокон. В некоторых раковинах материал, получающийся в результате соединения минералов и белков, оказывается в тысячу раз прочнее чистого минерала. Дав также напоминает вам, что биоминералы играют много ролей вне раковин, костей и зубов: они могут служить организмам в качестве линз, фильтров, сенсоров и даже крошечных внутренних компасов.

Энергичная исследовательская группа Дав много сил посвящает изучению механизмов образования карбонатов

на атомном уровне — молекулярному танцу, основанному на тесном взаимодействии органической и неорганической углеродной химии. Эта команда исследователей обнаружила, что формирование биоминералов происходит, когда клетки создают специализированные отсеки с местными средами, где минералообразующие ингредиенты концентрируются и образуют зародыши, на которых вырастают идеально правильные кристаллы. В этих отсеках одни биомолекулы стимулируют образование кристаллов, а другие — тормозят рост.

Одно из самых удивительных открытий исследовательской группы Дав заключается в том, что многие организмы начинают биоминерализацию с той формы карбоната кальция, которая вовсе не кристаллическая. Они образуют и накапливают гелеобразное вещество — аморфный карбонат кальция (исследователи называют его АКК), который хранится про запас до нужного момента⁴⁹. В отличие от традиционного пути образования кристаллов, кристаллический рост в этом необыкновенном процессе запускается молекулярным спусковым крючком, триггером. Некоторые линяющие* животные могут, видимо, хранить АКК неделями или месяцами, запуская быстрый рост раковины на критически уязвимой стадии, когда старый покров сбрасывается и вкусная мягкая ткань обнажается.

Возможно, сразу после появления первых животных с защитной оболочкой хищники переключились на более легкую, незащищенную добычу. Зачем прикладывать дополнительные усилия, чтобы разломать твердую раковину, когда прямо под рукой — сочные черви? Но, по мере того как все больше обитателей морского дна надевали броню, быстро

* Термин «линька» имеет отношение ко всем животным, имеющим внешний покров, будь то мех, перья, кожа, чешуя, панцирь или раковина. — *Прим. ред.*

возникали и контрстратегии: более крепкие челюсти, более острые зубы и более устрашающие клыки. Все это появилось именно тогда, когда жизнь научилась создавать защитные раковины. Этот затянувшийся «кембрийский взрыв» не был таким уж взрывным — он продолжался десятки миллионов лет, но зато бесповоротно направил биосферу Земли по новому курсу.

Появление прочных минеральных раковин добавило также новые нюансы в цикл углерода. С возникновением карбонатных кораллов, мшанок, брахиопод, моллюсков и другой фауны известняковые рифы достигли эпических размеров, распространились на сотни километров вдоль побережий и кое-где постепенно достигли высоты в несколько сотен метров. Ранее никогда не оказывалось возможным такое массовое накопление карбонатных биоминералов, которые заполнили прибрежное мелководье и внутреннее моря небывалыми отложениями. Когда литосферные плиты в процессе своего перемещения неумолимо закрыли эти неглубокие бассейны и сжали их отложения, образовались увенчанные карбонатами зубчатые горные хребты, изменившие ландшафт Земли. Канадские Скалистые горы, североитальянские Доломитовые Альпы и даже высочайшие гималайские вершины, среди которых сам Эверест, сложены прочными карбонатами — живыми рифами, некогда украшавшими дно прибрежной зоны океанов.

Последние полмиллиарда лет карбонатная биоминерализация происходила практически исключительно в прибрежной зоне — в области коралловых рифов. Кораллы, улитки, двустворчатые моллюски и десятки других форм жизни пользовались преимуществами мелких, залитых солнцем и богатых питательными веществами вод вдоль берегов континентов.

Двести миллионов лет назад жизнь провернула еще один минералогический трюк. Микроскопические одноклеточные морские водоросли, называемые кокколитофоридами, которые и сегодня процветают в Мировом океане, зачастую вдали от какой бы то ни было земли, научились создавать крошечные прозрачные дискообразные защитные пластинки из карбоната кальция, называемые кокколитами⁵⁰. Кокколит напоминает микроскопическое ажурное колесико диаметром 20–30 мкм. Каждая клетка водоросли покрыта внахлест дюжиной таких пластинок, причем не совсем понятно для чего. Некоторые биологи полагают, что минеральные диски служат защитой, другие — что карбонат кальция является природным «кремом от загара», который оберегает плавающие клетки от вредного ультрафиолетового излучения. Согласно еще одной гипотезе, минеральные пластинки обеспечивают клеткам нейтральную плавучесть, позволяя микроорганизмам погружаться или всплывать, перемещаясь в более богатые питательными веществами слои океана.

Какова бы ни была функция кокколитов, они образуются в огромных количествах. Когда кокколитофориды погибают, их крошечные пластинки накапливаются на дне, образуя мощные залежи мела. Вооруженный микроскопом взгляд на знаменитые Белые скалы Дувра — сотни метров отложений мела, накопленные за миллионы лет, — осведомляет нас, что они сложены прекрасными резными кокколитами, присутствующими здесь в астрономических количествах. В отличие от первых геологических эонов, почти треть сегодняшнего океанического дна покрыта известковым илом, имеющим нередко мощность более 1 км и богатым на эти микроскопические диски.

Все вышеописанное имело серьезные последствия для углеродного цикла Земли. На протяжении большей части геологической истории глубинные отложения океанов

практически не содержали карбонатных минералов. Субдукция перерабатывала океаническую кору, в которой преобладал базальт. Сегодня же главный компонент морского дна — углеродсодержащие минералы. Когда океаническое дно затягивается в зонах субдукции, некоторое количество этого новообразованного карбонатного ила уносится вниз, погружаясь глубоко в мантию Земли. Остается нерешенной загадка, фундаментально ли в наши дни меняется углеродный цикл Земли вследствие такого погружения углерода. Если большее количество атомов углерода погружается, нежели возвращается на поверхность, может ли биосфера Земли постепенно потерять свой углерод?

Поиск ответа на этот серьезный вопрос о глубинном углеродном цикле Земли неизбежно направляет наш взор на дополнительные петли обратной связи между биосферой и геосферой, так что нам пора переместить внимание в сторону появления жизни на суше.

Вариация 5. Жизнь укрепляет позиции на суше⁵¹

По мере того как жизнь и горные породы совместно эволюционировали во все более сложных петлях обратной связи, усложнялся и цикл углерода. И нигде эти петли обратной связи не были так заметны, как в появлении жизни на суше.

На начальных его этапах центральную роль играл кислород. Большинство клеточных организмов не могут пережить прямого воздействия жесткого, ничем не ослабленного ультрафиолетового излучения Солнца. Самые основные биомолекулы распадаются. Клетки погибают. Появление в атмосфере кислорода также означало и появление озона — молекулы, состоящей из трех атомов кислорода, которая образуется, когда обычные молекулы O_2 расщепляются и переупорядочиваются под действием ультрафиолетового

излучения. После того как это происходит, некоторые атомы пересобираются в O_3 . Молекулы озона редки; когда они «концентрируются», формируя так называемый озоновый слой, расположенный в верхних слоях атмосферы на высоте около 30 км над землей, их содержание достигает несколько молекул на миллион. Однажды образовавшись, этот слой стал играть роль природного «средства от солнца», оберегающего Землю от непрерывного пагубного влияния солнечного ультрафиолета. Крепкий озоновый слой является необходимым условием существования устойчивой наземной экосистемы.

Самые первые шаги выходящей из моря жизни были осторожными, они практически не меняли земной ландшафт. Раньше всех — более 450 млн лет назад — на сцене появились крошечные, лишенные корней растения, которые добавили зеленый мазок болотистому оцеплению прибрежных бассейнов и неглубоких водных потоков. Примерно 430 млн лет назад дебютировали первые растения с малюсенькими корневыми системами, что дало возможность зеленым растениям основать новые экосообщества подальше от моря. Корни ускорили разрушение камней и образовали богатые глиной почвы, которые способствовали росту более длинных и эффективных корней, а те в свою очередь производили еще больше почвы. Буквально за одно геологическое мгновение кусты и деревья все бóльших высоты и обхвата покрыли собою сушу.

Изменение следовало за изменением. Наземные растения способствовали распространению животных. Самый древний известный обитатель суши, дышащий воздухом, — примитивная многоножка *Pneumodesmus newmani*⁵², единственный ископаемый экземпляр которой (фрагмент длиной 1,27 см) был найден шотландским водителем автобуса и коллекционером-любителем ископаемых Майком Ньюманом

в 2004 г. в отложениях возрастом 428 млн лет из Абердиншира, Шотландия*. Ископаемые находки таких мягкотелых древних животных чрезвычайно редки, поскольку они плохо сохраняются, поэтому вполне вероятно, что первые насекомые появились даже раньше. Самые древние находки губоногих имеют возраст 420 млн лет, самому старому известному летающему насекомому — около 400 млн лет, а сколько еще редких и бесценных ископаемых свидетельств наверняка ожидают, пока мы их откроем.

И хотя окаменелости позвоночных сухопутных животных, казалось бы, должны были лучше сохраниться в каменной летописи, их находки малочисленны и рассредоточены. Скромное (но всевозрастающее) количество известных биологических видов палеозойской эры указывает на постепенный переход от морских организмов к наземным, от рыб — к амфибиям со все более специализированными структурами для жизни вдали от моря. Плавники превратились в конечности с пальцами, плечами, локтями и запястьями. В черепах постепенно образовались ноздри, чтобы дышать, и ушные отверстия, чтобы слышать. И — в отличие от большинства рыб — у первых обитателей суши была шея; они могли вертеть головой по сторонам, чтобы обозревать сухопутные окрестности. Переход на сушу не был внезапным, и вряд ли когда-либо можно будет указать на «самого первого» земного позвоночного, но есть серьезный кандидат на этот титул — *Tiktaalik roseae*, переходная форма между рыбами

* В 2017 г. в научно-издательском проекте Public Library of Science была опубликована статья об исследовании, в котором на основании радиоактивного анализа гранул циркона из этих отложений установлен новый возраст многоножки — примерно 414 млн лет, т. е. ее нельзя считать древнейшим воздуходышащим животным, поскольку к этому времени на Земле уже существовали другие организмы, использующие для дыхания воздух. См.: Suarez SE, Brookfield ME, Carlos EJ, Stöckli DF (2017) A U-Pb zircon age constraint on the oldest-recorded air-breathing land animal. *PLoS ONE* 12 (6): e0179262. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179262>. — Прим. ред.

и амфибиями возрастом 375 млн лет, обнаруженная в 2004 г. на острове Элсмир за Северным полярным кругом в отдаленной канадской провинции Нунавут.

В форме увлекательного представления палеонтологического расследования Нил Шубин из Чикагского университета и Тед Дэшлер из Академии естественных наук в Филадельфии предсказали, что подобное существо можно обнаружить в Северной Канаде — холодной арктической местности, которая переехала на север вследствие перемещения тектонических плит, а 400 млн лет назад находилась рядом с экватором⁵³. Прогноз исследователей основывался на логическом методе исключения. Они поняли, что недостающее звено между рыбами и земноводными должно находиться в породах возрастом около 375 млн лет, предпочтительно образовавшихся в теплом экваториальном регионе и рядом с древней линией побережья. В районе для поисков должно быть много хороших скальных обнажений, так что лесистая местность не подходила. Исследователи прочесали геологические карты мира и остановились на острове Элсмир как идеальном месте для дальнейших изысканий.

Найти недостающее звено на удаленном арктическом острове оказалось нелегкой задачей. Местность практически недоступна, а периоды для сбора образцов короткие — всего несколько недель в году, приходящихся на середину лета, когда толстое одеяло снега уже растаяло, а первые осенние снега еще не выпали. Потребовалось пять безуспешных полевых сезонов — в ходе некоторых ученые, как оказалось, фокусировали поиски на непродуктивных слоях пород, другие же прерывались ужасной погодой, — прежде чем были сделаны первые поразительно целые находки переходного от рыбы к амфибии вида *Tiktaalik* в низком каменном уступе⁵⁴. Это оказалось крупное существо, некоторые особи вырастали в длину почти до 3 м. Увидев целое

животное, Шубин и Дэшлер поняли, что его ископаемые остатки были довольно распространенными; несколько разрозненных и неопознанных фрагментов *Tiktaalik* уже находили в предыдущие сезоны сбора.

Эта ходячая рыба, название которой на языке инуитов — коренного населения региона — означает местную разновидность трески (хотя первооткрыватели Шубин и Дэшлер неформально называли ее «рыбоногое»), стала сенсацией в СМИ, темой публичных лекций и телевизионных шоу. У нее даже появился собственный веб-сайт. Широко известный аккаунт Шубина, названный «Ваша внутренняя рыба», вырос до статуса научного бестселлера с собственными видеопроектами в медиaprостранстве. Эта палеонтологическая сага своей цельностью — от смелого прогноза к непростому открытию и возрастающему осознанию того, что многие анатомические инновации *Tiktaalik* сохраняются в структурах наших тел, — снова демонстрирует мощь дарвиновской теории эволюции посредством естественного отбора.

Tiktaalik лишь один представитель последовательности ископаемых животных, каждое из которых было более адаптированным к жизни на твердой земле, чем предыдущее. Скорость этого перехода с геологической точки зрения была быстрой, хотя первые однозначно сухопутные животные стали бродить по примитивным джунглям Земли только 10 млн лет спустя. Все это время, пока углерод накапливался в корнях, стеблях, листьях и стволах, его циркулирование между разными резервуарами — Землей, Воздухом, Огнем и Водой — усиливалось.

Погребенная биомасса

Леса эволюционировали, став новым и самым потрясающе многоликим резервуаром углерода после появления жизни

на суше. Они добавили очередной нюанс углеродному циклу — ведь гигантские растения древних заболоченных лесов Земли, обширные заросли пышных папоротников, саговников и хвойных деревьев вытягивали углерод из воздуха, чтобы образовать древесину и кору. Когда одно из таких самых первых наземных растений погибало, его ствол, ветви, листья и корни вносили свой вклад в биомассу, из которой образовывались новые типы богатых углеродом отложений: слабо уплотняющийся торф приповерхностных болот, мягкий бурый уголь и твердое черное ископаемое топливо, известное как каменный уголь⁵⁵.

Львиная доля каменного угля Земли образовалась в течение непродолжительного интервала длиной в 60 млн лет (кстати, названного каменноугольным периодом), начавшегося приблизительно 360 млн лет назад. Когда дерево падает в сегодняшних лесах, оно обычно быстро разлагается, возвращая атомы углерода в почву, чтобы они использовались снова и снова. Триста же миллионов лет назад — пока в результате эволюции не появились разнообразные обитающие в древесине грибы, научившиеся способам разрушения ее жестких лигниновых волокон, — эффективной переработки деревьев еще не было. Перед тем как начать разлагаться, упавшие мертвые деревья накапливались слоями мощностью 30 м и больше. Остатки растений погружались все глубже и глубже, их ткани сдавливались и затвердевали. Эта биомасса постепенно высыхала, а биомолекулы деполимеризовались, высвобождая летучие вещества и увеличивая содержание углерода до более чем 90% в самых востребованных разновидностях антрацита. Сегодня мы добываем это каменноугольное наследие огромными темпами, за считанные десятилетия возвратив в атмосферу углерод, изымавшийся оттуда в течение 60 млн лет.

Не успели накопиться слои угля, как растущий богатый почвенный покров Земли нашел еще один способ

связывания углерода⁵⁶. Значительную роль в этом начали играть глинистые минералы — распространенные спутники пробивающихся корней с их неумолимым превращением горных пород в почву. Глины уникальны по своему физическому и химическому поведению. Их минералы формируются в виде тонких плоских чешуек, слишком маленьких, чтобы их можно было увидеть в обычный микроскоп. Эти крошечные листочки скользят друг по другу (насколько глина скользкая, особенно во влажном состоянии, каждый знает по собственному опыту).

Поверхность глины не имеет себе равных также в своей способности соединяться с небольшими богатыми углеродом молекулами, среди которых есть и продукты разложения органики. Когда корни и другой подповерхностный детрит* сгнивают, их биомолекулы по большей части собираются на поверхностях глинистых минералов. В результате эрозии почвы реками и ветрами огромные количества глины перемещаются в океаны. В прибрежной зоне накапливаются тысячи метров глинистых отложений, и в них содержится много углерода — это еще один резервуар элемента № 6 в сложном углеродном цикле Земли. А некоторая часть этих богатых углеродом отложений погружается глубоко в земную мантию вместе с бесчисленными карбонатными кокколитами. По этим потокам углерода и можно установить возраст жизни на суше независимо от предыдущих 4 млрд лет истории Земли.

Вариация 6. Мы вносим свою лепту

На Земле появились бесчисленные миллионы биологических видов, но подавляющее большинство этих форм жизни

* Мертвое органическое вещество. — *Прим. науч. ред.*

исчезло навсегда. Трилобиты, распространившиеся повсеместно харизматичные обитатели палеозойских морей, вышли на сцену более полумиллиарда лет назад. Их почитаемые окаменелые остатки, сегментированные и шипастые, кажется, смотрят на нас сквозь века выпуклыми фасеточными глазами. Трилобитов больше нет — они полностью вымерли в течение чуть более 250 млн лет. Господствуя величественно и сурово над мезозойским миром, дождались своей очереди и динозавры — на суше, в море и в воздухе. Массивные ископаемые фрагменты их скелетов служат молчаливым напоминанием о безжалостной естественности борьбы за выживание. Все вымерли, кроме птиц, радикально рассеявших доминировавшую некогда линию. Сейчас наша очередь.

Человеческая история гораздо более неизгладима, чем история других видов. Мы, люди, меняем окружающую среду такими способами, за которыми тянутся следствия. Мы возводим памятники, мы копаем уголь, мы зажигаем огни и оставляем после себя предметы. В этой многовековой истории углерод играет особую, удивительную роль, поскольку, пока мы проживаем свои жизни и создаем свою культуру, атомы углерода предоставляют нам часы, которые ведут хронику человеческой истории.

Углеродные часы

Чуть ли не каждый атом углерода — это неустаревающее наследие звезд, вечное, неизменное, используемое снова и снова. Но крошечная, крохотуличная доля атомов шестого элемента в воздухе и в наших телах лишь временно выступает на динамичной сцене Земли. Эти атомы появляются как будто по волшебству и показывают товар лицом только на короткий промежуток времени, чтобы исчезнуть потом в мгновение ока.

Мы уже встречались с двумя стабильными формами углерода: распространенный углерод-12 составляет более 99% атомов углерода вашего тела; его чуть более тяжелый собрат углерод-13 — оставшийся 1%. Эти изотопы — один с шестью нейтронами, другой с семью — образовались миллиарды лет назад, преимущественно в больших звездах.

Радиоактивный углерод-14 с восемью нейтронами не такой⁵⁷. Он нестабильный и относительно короткоживущий. Углерод-14 непрерывно образуется преимущественно поверх облаков в тех воздушных слоях, где космические лучи из глубин пространства бомбардируют насыщенную азотом атмосферу. Эти космические лучи, состоящие из бешено мчащихся протонов и других атомных ядер, действуют подобно боевым атомным пулям, которые сталкиваются с молекулами газов атмосферы, вызывая ядерный хаос. Образовавшиеся вторичные частицы градом разлетаются во все стороны; некоторые из них — это полные энергии нейтроны, часть которых затем сталкивается с атомами азота. От сильного удара быстро движущегося нейтрона ядро азота-14 может «испортиться», потеряв один протон и приобретя один нейтрон, — в результате образуется углерод-14. Этот бурный созидательный процесс, происходящий уже миллиарды лет, обеспечивает небольшую, но постоянную поставку углерода-14 в атмосферу Земли.

Принципиальная разница между углеродом-14 и его более легкими и более стабильными углеродными кузенами заключается в радиоактивности. Углерод-14 балансирует на грани саморазрушения, потому что набрал слишком много нейтронов, чтобы чувствовать себя комфортно. Безо всякого предупреждения радиоактивный атом углерода-14 спонтанно превращается обратно в стабильный атом азота-14. Радиоактивный распад углерода-14 — надежный планомерный процесс. Исчезновение половины любой

совокупности радиоактивных атомов углерода занимает порядка 5730 лет. Этот удачный период полураспада идеально подходит для изучения развивающихся человеческих технологий и культуры с помощью мощного метода радиоуглеродного анализа.

Эта революционная технология датирования по углероду-14 зависит от смерти, точнее — от времени смерти. А залогом успеха технологии является углеродный цикл. Пока растение живо, оно постоянно поглощает углекислый газ, воду и энергию солнечного излучения, чтобы синтезировать сахар. В этом суть фотосинтеза, который обеспечивает химической энергией почти всю жизнь на Земле. Животные питаются богатыми сахаром растениями или поедают других животных, пища которых — растения. Грибы и падальщики потребляют мертвые растения и животных. На каждом этапе сложной пищевой цепи атомы углерода переходят из одного резервуара в следующий.

Пока растение живет, оно потребляет около одной части на триллион углерода-14 наряду с другими атомами углерода — соотношение ^{12}C , ^{13}C и ^{14}C зафиксировано изначально атмосферой. Пока вы едите растения или животных, которые съели эти растения, в вашем теле будет то же соотношение изотопов — примерно один на каждый триллион атомов углерода в вашем теле будет радиоактивным углеродом-14. И эта малюсенькая доля останется более или менее постоянной, пока растение не погибнет. Или пока вы не умрете. Вот тогда начнут тикать углеродные часы.

Углерод повествующий

Вдохновение использовать радиоактивный углерод для определения возраста органических остатков посетило химика Уилларда Либби из Чикагского университета вскоре после

окончания Второй мировой войны⁵⁸. Участник Манхэттенского проекта, Либби был хорошо знаком с химическим поведением радиоактивных изотопов, поэтому он отчетливо осознал, что у углерода-14 особое предназначение в исследовании сравнительно недавней истории человеческой цивилизации. Как и очень многие его коллеги по атомной эре, после войны он перенаправил применение своих знаний на мирные цели.

Идея Либби весьма проста: возьмите старый пергамент, давно потухший уголек из костра, волосок или кусочек высохшей кожи, измерьте соотношение изотопов углерода и вычислите возраст. Если распалась половина атомов углерода-14, то объекту около 5730 лет. Если их осталась всего четверть, тогда возраст в два раза больше — приблизительно 11 500 лет. Радиоуглеродный анализ замечательно подходит для датировки фрагментов ушедшей жизни возрастом до 50 000 лет, по истечении которых выживает только порядка тысячной доли первоначальных атомов радиоактивного углерода.

На практике углеродное датирование немного сложнее. Начать с того, что точно измерить одну часть на триллион углерода-14 — нелегкая задача. При обычном подходе ученые учитывают каждое событие распада и определяют содержание углерода-14, исходя из степеней радиоактивности. Распад радиоуглерода медленный, так что этот метод требует больших образцов со множеством атомов углерода, а также много-много терпения. В более эффективных современных методах для того, чтобы измерять количества тяжелых изотопов углерода-14, пока они не распались, используют мощные масс-спектрометры. Это более быстрый подход, и его можно применять к гораздо меньшим образцам, не крупнее просяного зернышка или короткого волоска.

Радиоуглеродный анализ перевернул наше понимание человеческой истории. Вы можете видеть его плоды каждую

неделю в новостях. Особое внимание было уделено артефактам христианства. Собрание десятков свитков, написанных на древнееврейском и арамейском языках, обнаруженное в 1947 г. в пещерах неподалеку от Мертвого моря, стало первым резонансным испытанием для новой технологии датирования Уилларда Либби. Метод показал, что этим свиткам около 2000 лет, таким образом они являются самыми ранними из известных текстов, имеющих под собой библейское основание. Тем не менее знаменитая Туринская плащаница, почитаемая некоторыми верующими как льняной саван Иисуса из Назарета, была исследована в 1988 г. тремя независимыми лабораториями и датирована XIV столетием. Происхождение этого прекрасного полотна с его призрачным образом человека по сей день остается предметом бурных споров.

Радиоуглеродный анализ играет существенную роль и в археологии, он обеспечил нас подробной хронологией египетских династий, показал последовательность африканских миграций, передачу технологии в Европе и заселение доисторической Британии. Углерод-14 помогает определить возраст бесчисленных древних памятников и объектов — от монолитов Стоунхенджа, самым старым частям которого 5100 лет, что установлено по остаткам древесины, до «ледяного человека» Этци, который умер 5200 лет назад и сохранился в альпийских льдах неподалеку от границы нынешних Австрии и Италии. Обнаружение и датирование артефактов также меняет евроцентричный взгляд на «открытие» и колонизацию Америк — четкие свидетельства некогда горевших костров в поселениях викингов показывают, что они здесь были уже к 1000 г. нашей эры, за пять столетий до первого путешествия Колумба.

Радиоуглеродный анализ оказался весьма важен и для определения границ в противоречивой хронологии

миграции людей в Америку. В исследовании 2015 г., опубликованном в журнале *Proceedings of the National Academy of Sciences*, ученые из Техасского университета A&M описали древнюю стоянку с костями разделанных лошадей и верблюдов, обнаруженную рядом с нынешним Калгари в канадской провинции Альберта⁵⁹. Углеродный возраст этого лагеря оказался равным (с погрешностью всего 15 лет) 13 300 годам, что больше, нежели установленный возраст народа Кловис, который, как считается, прибыл из России через Берингов пролив не ранее 13 000 лет назад. Другие, менее убедительные доказательства в виде кострищ, обнаруженных рядом с примитивными каменными артефактами, побуждают некоторых исследователей называть даже более древний возраст миграции из Азии в Северную Америку — возможно, вплоть до 40 000 лет. Каким бы ни стал окончательный вывод, радиоуглеродный анализ сыграет главную роль.

А что насчет следующих поколений? Какие сведения о сегодняшних днях соберут будущие археологи по углеродным остаткам нашего века? Их ждут сюрпризы. Прошедшие два столетия отличает значительное поступление «мертвого» углерода — наследие сжигания огромных количеств ископаемого топлива, содержащего древние атомы углерода, которые были запертыми миллионы лет. Получающийся в результате поток «мертвого» углекислого газа разбавляет атмосферу молекулами CO_2 , полностью лишенными радиоактивного углерода-14.

Вторая, еще более драматическая аномалия — на этот раз «бомбового» углерода — маркирует стремительную яростную эру открытых испытаний ядерного оружия. Это 1950-е и начало 1960-х гг. — время до заключения Договора о запрещении испытаний ядерного оружия⁶⁰. За десять с небольшим лет ядерные взрывы привели к увеличению

концентрации углерода-14 в атмосфере в два раза. Она постепенно снизилась за счет того, что углекислый газ измененного воздуха поменялся местами с молекулами в океанах, оказался связанным в горных породах или был поглощен растениями. С неизбежностью содержание углерода-14 в растениях за короткое время удвоилось, затем удвоилось в животных — а также в вас, если вы застали беспокойную эру холодной войны.

Мы в совокупности всё еще содержим немного того ядерного наследства в наших мышцах и костях, поскольку являемся частью человеческого углеродного цикла.

РЕПРИЗА — Человеческий углеродный цикл

Ключ к пониманию неразрывных связей между Землей, углеродом и нами кроется в циклах. В основе быстрых изменений, которые люди навязывают Земле как с умыслом, так и непреднамеренно, лежит циркулирование углерода. Мы выращиваем и разводим богатую углеродом пищу, чтобы поддерживать растущее мировое население, неизбежно разрушая окружающую среду, которая была устойчивой тысячи лет. Мы лишаем землю лесов, а моря — рыб, изменяя экологический баланс. Мы добываем углерод в огромных количествах, используя давно захороненные ресурсы в качестве топлива, а также для производства материальных ценностей. В этих да и в других подобных примерах ускоряющееся человеческое воздействие на углеродный цикл является глубоким и глобальным, а последующие изменения в атмосфере и климате — в значительной степени непредсказуемыми.

Все живые существа, включая наш человеческий род, играют свою роль в глобальном цикле углерода. Взгляните вокруг, и вы увидите последствия: минералы и воздух Земли становятся растениями, растения — едой для животных, погибшие животные и растения поддерживают благоденствие

грибов и микробов; в свою очередь все эти организмы возвращаются в почву и царство минералов. Атомы углерода включаются в этот цикл снова и снова, и каждый атом за миллиарды лет своего существования принимает множество форм.

В нас с вами происходит также и индивидуальный углеродный цикл — гораздо более непосредственный и интимный, связанный с изменением нашего тела. Мы переживаем этот личный цикл элемента № 6 с самого зачатия и до того момента, когда наши останки полностью разложатся.

Вы вдыхаете кислород и едите богатую углеродом пищу, которые являются движущей силой метаболизма. Ваше тело встраивает в себя этот углерод, когда создает новые клетки; ваше тело вырабатывает углекислый газ, когда сжигает насыщенное углеродом топливо.

Вы выдыхаете углекислый газ, и ваше тело сбрасывает атомы углерода, как деревья — осенние листья. С каждым выдохом вы немного таете⁶¹. С каждым выдохом крошечная доля углерода вашего тела — менее 0,001% — уходит, рассеивается, она готова вступить в новый цикл. Ваше тело сегодня может казаться таким же, каким было на прошлой неделе или в прошлом году, но это не так. Многие атомы уже другие — точные копии, но другие.

Всю свою жизнь вы потребляли новые атомы углерода, теряя старые атомы углерода. Как эфемерны наши тела! Немного осталось тех атомов, тех молекул, которые были вами при рождении. Немногие из атомов, молекул, которые являются вами сегодня, по-прежнему будут вами, когда вы проживете еще с десятков лет. Мы, люди, не задумываясь приравниваем наши тела к нашим сущностям. Наши разумы разделены, наши мысли — однозначно наши собственные, но атомы в наших телах столь же мимолетны, как морской бриз.

И где сейчас эти атомы — те, что были еще недавно частью вас? Некоторые — в воздухе или растворились в океанах. Некоторые, возможно, заперты в карбонатных раковинах моллюсков и улиток или скоро будут изолированы в известняке коралловых рифов. Многие из триллионов и триллионов атомов углерода, которые когда-то были вами, сейчас обитают в стеблях, листьях, цветах и корнях растений — дуба, пшеницы, розы, мха. Животные едят растения и таким образом наследуют и задерживают на некоторое время то, что когда-то было вами. И каждый человек на Земле, который прожил хотя бы несколько лет, любой, кто ел растения или животных, которые ели эти растения, сейчас содержит атомы углерода, которые когда-то были вами, а в то же время в вас есть атомы углерода, которые когда-то были ими, — атомы каждого, кого вы знали в своей жизни, ваших друзей, родственников, любимых; почти всех, кто когда-либо жил.

Попробуйте представить себе космический путь одинокого атома углерода, который сейчас — на недолгий миг — является частью того, что вы считаете «собой».

Этот атом углерода выковался в недрах большой звезды и вылетел в космос, когда звезда взорвалась. Предположим, что он присоединился к другим атомам углерода и образовал крошечный кристаллик алмаза, став частичкой пыли и газа в молекулярном облаке — изобильной звездообразующей области Млечного Пути, нашей молодой Галактики. Возмущение в этом облаке, к примеру встряска от взрыва ближайшей сверхновой, способствует локальному коллапсу — и так зарождается наша Солнечная система. Бóльшая часть всей этой массы падает внутрь, чтобы образовать наше Солнце, но алмазная крупинка находит себе другой дом в оставшемся веществе, которое начинает образовывать третью большую планету в упрочняющейся системе.

Земля слишком горяча, слишком химически активна, чтобы маленький алмаз мог выжить. Наш атом углерода соединяется с атомами кислорода и образует молекулу углекислого газа — мельчайшую частичку развивающейся атмосферы. Эта молекула CO_2 поглощается океаном, где ее тысячу лет носят течения, пока она не осядет в виде карбонатного слоя на дне мелководной окраины океана.

Проходят еще один-два миллиона лет. А затем в береговую линию врзается астероид диаметром больше километра и происходит всеобщее разрушение. Минералы углерода испаряются, возвращая углекислый газ в атмосферу. Цикл повторяется: из воздуха в океан, из океана в горные породы, но на этот раз слой карбонатов, захваченный опускающимся фрагментом плотной земной коры, медленно погружается в верхнюю мантию, где внутреннее тепло Земли расплавляет вмещающую породу. Этот расплав, богатый водой и CO_2 , поднимается все выше, а давление пока в состоянии удерживать летучую смесь. Когда магма подходит к поверхности, флюиды внезапно и бурно превращаются во взрывной поток, который, вырываясь наружу, забрасывает окрестности вулканическими бомбами и пеплом. И снова наш атом углерода высвобождается в воздух в виде молекулы CO_2 .

Этот повидавший мир атом углерода, подзаправившись ближайшей вспышкой молнии, соединяется с азотом и другими атомами для образования аминокислоты — молекулы, которая живет всего несколько дней, пока не распадется под действием ультрафиолетового излучения Солнца. В своем более стабильном облике, в виде молекулы углекислого газа, наш атом очередной раз вступает в цикл — отправляется из воздуха в океан. Этот атом неоднократно подвергается химическим реакциям в глубинных жерлах гидротермальных источников на дне океана, образуя аминокислоты, которые выживают там лишь несколько недель, прежде

чем распасться обратно до CO_2 . Вот так рожденный звездой атом циркулирует по резервуарам Земли эон за эоном, переходя из газа в жидкость, а потом в камень и обратно бесчисленное количество раз.

Перемотаем на миллиард лет вперед. Появляется новый феномен жизни. Манят новые углеродные резервуары. Углекислый газ извлекается из воздуха и фотосинтезирующими водорослями преобразуется в сахар. Сахар становится топливом для производства потрясающих молекулярных новинок: липидов из цепочек углерода — для формирования клеточных мембран; оснований из колец углерода — для переноса генетического кода; а углерод, связанный с азотом и кислородом в аминокислоту, — это строительный материал белков. Наш атом углерода быстро циркулирует по биосфере, играя множество новых ролей в гораздо более бешеном темпе, чем раньше, иногда меняя химическую форму десятков раз за неделю. А в некоторых случаях он запечатывается в карбонатной раковине, падая на дно океана связанным на 100 млн лет и ожидая возвращения в энергичный живой мир на поверхности.

На прошлой неделе вы съели этот атом углерода. Сейчас он часть молекулы белка, которая играет жизненно важную роль в одной из ваших клеток. Будем надеяться, что все идет как надо.

Смерть и углерод

Мы, многоклеточные формы жизни, уязвимы. Многое может пойти не так с атомами углерода в столь сложных системах.

У моего брата Дэна рак начался в двенадцатиперстной кишке — том месте, где никто не ищет рак, где не возникает явных симптомов, по крайней мере пока опухоль не распространится на другие органы. Но это уже оказывается

слишком поздно. Врачи пытались остановить агрессивные клетки, когда рак убил печень. Дэн месяцами терпел жуткую химиотерапию. Она не помогла. Через полгода брат умер.

Виновниками были углеродсодержащие молекулы — как и во многих других болезнях. Один атом углерода — это мелочь, но когда несколько его атомов выпадают или располагаются не там или не так, они могут многое изменить: мы подчиняемся прихоти углерода в отношении смерти так же, как и применительно к жизни. Врачи не могли объяснить нам, что пошло не так у Дэна, почему именно он — находящийся в лучшей по сравнению со всеми нами форме, внимательнее относящийся к своему питанию, физически активный — пал жертвой. Что-то пошло не так с молекулами, которые контролируют деление клеток. Всего одной клетки из 10 трлн. Эта клетка начала размножаться неконтролируемо и в конечном счете узурпировала другие клетки, другие органы.

Все виды рака и генетические заболевания в данном отношении одинаковы: это ошибки в атомах углерода — их расположении, их связях. Рассмотрим главные аминокислоты аспартат (аспарагиновую кислоту) и глутамат, которые различаются только одним атомом углерода. Вставьте не ту аминокислоту в принципиально важный белок — и длинная цепочка молекул сложится не тем образом, которым должна была сложиться. Получившаяся не той формы структура может посеять клеточный хаос, следовательно, клетка будет не в состоянии выполнять свои жизненно важные функции.

А куда деваются наши атомы углерода, когда мы умираем?

Я думаю о Лулу, нашей четвертой и последней мальтийской болонке, представительнице третьего поколения милых белых пушистых мячей. Бóльшую часть времени из прожитых 13 лет она веселым эльфом выскакивала за дверь, лая и подпрыгивая, когда я приходил домой из лаборатории. Ее

сестра-близнец Джулия умерла годом ранее в возрасте 12 лет, и после этого здоровье Лулу стало неуклонно ухудшаться. Под конец жизни она потеряла слух и ориентацию в пространстве, то где-то пряталась, то внезапно выскакивала и начинала бегать, облаивая непонятно кого. Когда собачка перестала есть и пить, мы ее усыпили. По крайней мере уход ее был спокойным; когда-то оживленный дом поглотила тишина.

Мы выкопали могилку в лесу рядом с домом, под цветущим багрянником. Кудрявая белоснежная шерсть Лулу казалась совсем не к месту в этой глубокой темной яме; мы попрощались, накрыв трупик 60 см плодородной коричневой земли.

В маленькой собачке весом 4,5 кг содержится от 900 до 1300 г углерода — это порядка 50 трлн трлн его атомов. Что произошло с ними, когда Лулу умерла? Короткий промежуток времени — часы, не дни — ее мертвое тело еще удерживало почти все эти атомы. Но в контакте с воздухом и почвой останки собаки представляли собой богатый запас химической энергии для бактерий, грибов и мелких животных-падальщиков. Начался неизбежный процесс рассеивания ее атомов. Бóльшая часть мертвой плоти пошла на обеспечение энергией и атомами других живых существ. Атомы углерода стали диффундировать, распространяясь наружу от разлагающейся Лулу все возрастающими сферами. Распад тела также высвободил в атмосферу углекислый газ и другие небольшие органические молекулы, которые распространились по всему миру и — самое главное — были использованы бесчисленное количество раз в новой жизни на каждом континенте. Возможно, прямо сейчас вы вдыхаете атомы, которые когда-то были частью Лулу.

Круговорот. Вот что делает природа. Стабильные атомы земного углерода ни создаются, ни разрушаются — они используются снова и снова.

ФИНАЛ — Земля, Воздух, Огонь и Вода

Какова с эволюционной точки зрения наша роль в Великой симфонии углерода? Люди одновременно и обыкновенные, и неповторимые. С одной стороны, мы просто очередной эволюционный шаг в истории длиной 4 млрд лет, которая, скорее всего, будет еще долго продолжаться после того, как наш род вымрет или превратится в какой-то новый вид. Некоторые утверждают, что одни только мы, исключительно собственными силами, в состоянии радикально изменить климат и окружающую среду Земли, но вырабатывающие кислород фотосинтезирующие микробы и разнообразные зеленые растения, которые пришли им на смену, изменили близповерхностные условия на нашей планете намного сильнее, нежели на это способны какие бы то ни было человеческие действия. Другие указывают на глобальное преобразование континентов, производимое человечеством с его городами, дорогами, шахтами и фермами, но деревья и травы намного превосходят нас по влиянию на ландшафт. Еще кто-то говорит, что наш вид уникален своей потенциальной способностью к разрушению планеты, но неоднократные катастрофические столкновения с астероидами и взрывные извержения мегавулканов имели

намного более чудовищные последствия, чем любое оружие, разработанное человеком.

С другой стороны, наш человеческий вид действительно обладает беспрецедентными талантами. В истории жизни мы уникальны своей технической смекалкой при адаптации к окружающей нас среде и ее изменении в масштабах от местного до глобального. Мы уникальны своим изобретательным использованием других биологических видов — животных, растительных и микробных. Мы уникальны своим непреодолимым желанием и способностью исследовать Вселенную за пределами нашего мира, чтобы, возможно, в конечном счете колонизировать другие планеты и спутники. И мы уникальны своим влиянием на углеродный цикл Земли — цикл, который серьезно затрагивает каждый аспект нашей планеты: Землю, Воздух, Огонь и Воду.

Люди выделяются среди прочих форм жизни и сумасшедшим темпом тех изменений, которые мы производим. Мы меняем планету со скоростью гораздо большей, чем любой вид до нас, — со скоростью, которая выше только у внезапных катаклизмов вулканических извержений и падающих с небес камней. Микробам потребовались сотни миллионов лет, чтобы насытить кислородом атмосферу, и, возможно, еще миллиард — чтобы насытить кислородом океаны. Многоклеточной жизни понадобились десятки миллионов лет, чтобы колонизировать сушу после самых первых робких поползновений. Эти изменения были сильными, но они происходили в геологических масштабах времени, что позволяло жизни и неживой природе коэволюционировать постепенно. Экосистемы Земли необыкновенно гибки — но им нужны поколения, чтобы перестроиться, эволюционировать и «перезагрузиться» в ответ на новые условия окружающей среды. Если люди и представляют какую-то особенную угрозу для Земли, как опасаются некоторые ученые,

то именно своими небывалыми темпами изменений окружающей обстановки, что несет в себе величайший риск разрушения биосферы.

Тем не менее у камней и разнообразных микробов, которые живут среди них, проблем не возникнет — какие бы раны мы ни нанесли своему дому и, сами того не желая, своему виду. Земля будет вращаться дальше, жизнь не прекратится, а мощный процесс эволюции посредством естественного отбора гарантирует, что новые существа продолжат заселять каждую нишу на нашей планете.

Великая вечная симфония углерода объединяет все природные сущности — Землю, Воздух, Огонь и Воду. Ни одна из них не пребывает в изоляции, все являются важными частями целого. Земля выращивает твердые кристаллы с углеродом — прочное каменное основание суши и океанов. Воздух содержит обнимающие и объединяющие всех нас молекулы с углеродом, — вечно циркулирующие, защищающие и поддерживающие жизнь. Огонь, рожденный с участием углерода, заряжает планету энергией и обеспечивает непревзойденное молекулярное разнообразие материальному и живому миру. Вода, породившая углеродную жизнь, питает ее, пока та эволюционирует и распространяется во все уголки земного шара. В крещендо исключительной гармонии и сложного контрапункта каждая из этих земных сущностей углерода приветствует остальных и приветствуется ими.

Люди научились накладывать на эту древнюю партитуру свои насущные темы и все ускоряющиеся темпы. Мы изымаем из Земли минералы. Мы загрязняем Воздух отходами. Мы эксплуатируем Огонь для удовлетворения своих нужд и потребностей. Мы злоупотребляем наполненной жизнью сферой Воды, зачастую не задумываясь о том, какие виды в ней живут и умирают.

Мы — каждый из нас — должны поступиться срочностью своих желаний, чтобы увидеть наш драгоценный планетарный дом как уникальное, но уязвимое жилище. Если мы окажемся мудры, если нам удастся сочетать наши желания с обновленным чувством благоговения и восхищения, если мы сможем научиться ухаживать за своим невероятно прекрасным, богатым углеродом миром, как он этого безотлагательно заслуживает, — тогда у нас появится надежда, что мы оставим нашим детям, их детям и всем последующим поколениям поистине непревзойденное и бесценное наследие.

Благодарности

При написании этой книги-симфонии мне очень помогли мои коллеги по Обсерватории глубинного углерода. Но ни одно открытие DCO не произошло бы, если бы не знакомство с Джесси Аусубелом и не последующая поддержка и советы от него, а также его коллег из фонда Альфреда Слоуна — особенно координатора программ Паулы Олсивски.

Бывший директор Геофизической лаборатории Рас Хэмли определил масштаб и суть DCO, а также придумал само название — Обсерватория глубинного углерода. Этот исследовательский проект изначально сформировала директор DCO Конни Бертка, которая смогла представить себе организационную структуру, основанную на энтузиазме, идущем снизу вверх и упорядоченном мягким подстрекательством сверху вниз.

Я в большом долгу перед сотрудниками секретариата DCO, с которыми имел удовольствие работать ежедневно. Директор Крэг Шиффрис руководил комплексной международной программой с большим мастерством и юмором,

выживая в знойных нефтеносных долинах Восточного Китая, среди токсичных испарений вулканов в Италии и расстрескавшихся скал Омана. Крэг также постоянно помогал мне советами и поддерживал во время написания этой книги; его мысли так или иначе всюду отражены. Менеджер программ Андреа Мэнгам, самый давний член команды DCO, на экспертном уровне управляла финансовым благополучием DCO, а ее голос был неизменно успокаивающим. Дженнифер Мейс и Мишель Хун-Старр привнесли свои профессиональные знания в написание текстов, веб-дизайн и материально-техническое обеспечение DCO, излучая при этом вдохновляющий энтузиазм и ответственный подход к успеху организации.

DCO не преуспела бы без профильного международного научного руководства Исполнительного комитета, возглавляемого Крэгом Мэннингом из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе. Я учился у всех членов комитета, включая Джона Баросса, Тараса Брындзю, Изабель Даниэль, Эдриана Джонса, Дональда Дингуэлла, Клода Жопара, Луизу Келлог, Дэвида Коула, Карен Ллойд, Бернара Марти, Паулу Олсивски, Эйзи Отани, Терри Планк, Роберта Покални, Николая Собелова, Митча Соджина Винченцо Станьо, Питера Фокса, Эрика Хаури, Кай-Уве Хинрикса, Рассела Хэмли, Барбару Шервуд-Лоллар, Крэга Шиффриса, Мари Эдмондс.

При рецензировании нескольких версий этой рукописи свои экспертные мнения предоставили многие специалисты. Я благодарен Дэвиду Димеру, Патриции Дав, Оливии Джадсон, Дэвиду Коулу, Дарлин Трю Крист, Джи Ли, Андреа Мэнгам, Скотту Мэнгаму, Крэгу Мэннингу, Сюхею Оно, Саре Ругхаймер, Димитри Сверженски, Эрику Смиту, Полу Фальковски, Терезе Форнаро, Шону Харди, Грете Хистад, Крэгу Шиффрису, Мари Эдмондс, Шарлин Эстраде, Эдварду Янгу.

Я признателен своим коллегам по нашей прекрасной организационной команде DCO — Робу Покални, Кэти Пратт и Дарлин Трю Крист, которые очень помогли мне в осуществлении моего проекта, а отдельно — Джошуа Вуду, который оказал принципиальную помощь при отборе и обработке фотографий для вклейки.

Я в особом долгу перед своими редакторами и издательской командой W. W. Norton. Куин До отредактировала рукопись с глубокой проникновенностью. Она привнесла в этот проект как восторг от замаха книги, так и тщательное внимание к деталям. Благодаря въедливым и продуктивным замечаниям литературного редактора Стефани Хиберт стала лучше каждая страница книги. Я также благодарю редактора проекта Эми Медейроз, менеджера по производству Джулию Драскин и художественного редактора Ингсу Лю.

Мой литературный агент, Эрик Лупфер из Fletcher and Company, был неисчерпаемым источником мудрых советов и неослабевающей поддержки. Он стал одним из первых, кто приветствовал концепцию книги как симфонии.

Наука стоит денег. Ни одно из достижений, описанных в этой книге, не оказалось бы возможным без поддержки правительственных организаций и частных фондов. Я безмерно признателен Национальному научному фонду, Геологической службе США и NASA, в частности замечательной программе Марсианской научной лаборатории и Астробиологическому институту NASA (вот на что идут ваши налоги). За щедрую поддержку я благодарен не только фонду Альфреда Слоуна, но и фонду У. М. Кека, фонду Джона Темплтона, фонду Саймонса, фонду Гордона и Бетти Мур, а также Институту Карнеги.

Элизабет Хейзен вложила всю свою литературную проницательность и поэтическую интуицию, чтобы тщательно

вычитать исходный несовершенный черновик. Ее влияние ощущается во всей опубликованной версии.

И наконец, на каждом этапе этой книги я полагался на четкие и полезные рекомендации, а также безусловную поддержку моего соавтора в прошлом и будущем Маргарет Хейзен.

Примечания

ПРОЛОГ

- 1 Шестнадцать видео, записанных 15–17 мая 2008 г. в рамках семинара по глубокому углеродному циклу, можно посмотреть на сайте Института науки Карнеги в разделе “Sloan Deerp Carbon Cycle Workshop — Sessions”, доступны на 19 сентября 2018 г. по ссылке: <https://itunes.apple.com/us/podcast/sloan-deerp-carbon-cycle-workshop-sessions/id438928309?mt=2>
- 2 Исторические аспекты Обсерватории глубинного углерода можно найти на веб-сайте организации, доступны на 12 октября 2018 г. по ссылке: <http://deercarbon.net>
- 3 Телефонный разговор с Джесси Аусубелом состоялся в середине января 2016 г., когда я удалился на остров Мауи, чтобы писать. Рукопись книги была закончена там же через два года.

ЧАСТЬ I — ЗЕМЛЯ

- 1 О нуклеосинтезе во время Большого взрыва см.: Carlos A. Bertulani, *Nuclei in the Cosmos* (Singapore: World Scientific, 2013).
- 2 См.: Fabio Iocco et al., “Primordial Nucleosynthesis: From Precision Cosmology to Fundamental Physics,” *Physics Reports* 472 (2008): 1–76.
- 3 Carl Sagan, *Cosmos* (New York: Random House, 2002).

- 4 Цит. по: Lindsay Smith, “Williamina Paton Fleming,” *Project Continua* 1 (2015).
- 5 Увлекательную историю гарвардских вычислителей и астрономии конца XIX — начала XX в. см. в: Dava Sobel, *The Glass Universe: How the Ladies of the Harvard Observatory Took the Measure of the Stars* (New York: Viking, 2016).
- 6 Цит. по: Helen Fitzgerald, “Counted the Stars in the Heavens,” *Brooklyn Daily Eagle*, September 18, 1927.
- 7 Цит. по: J. Turner, “Cecilia Helena Payne-Gaposchkin,” in *Contributions of 20th Century Women to Physics* (Los Angeles: UCLA Press, 2001).
- 8 Simon Mitton, *Fred Hoyle: A Life in Science* (New York: Cambridge University Press, 2011).
- 9 Более подробное описание вы можете найти в книге: D. A. Ostlie and B. W. Carroll, *An Introduction to Modern Stellar Astrophysics* (San Francisco: Addison-Wesley, 2007).
- 10 Цит по: Mitton, *Fred Hoyle*.
- 11 Возраст первого поколения звезд остается предметом споров, но наблюдения за дальними галактиками, свет которых начал распространяться менее чем через миллиард лет после Большого взрыва, указывают на то, что большие звезды образовались в космической истории довольно рано. См.: D. P. Marrone et al., “Galaxy Growth in a Massive Halo in the First Billion Years of Cosmic History,” *Nature* 553 (2018): 51–54.
- 12 Роль столкновения нейтронных звезд в образовании приблизительно половины элементов Периодической таблицы описана в работе: D. Kasen et al., “Origin of the Heavy Elements in Binary Neutron-Star Mergers from a Gravitational-Wave Event,” *Nature* 551 (2017): 80–84.
- 13 Составить представление о космохимии поможет обзор: Harry McSween and Gary Huss, *Cosmochemistry* (New York: Cambridge University Press, 2010).
- 14 Вероятность того, что алмаз был первым минеральным видом, обсуждается в книге: Robert M. Hazen et al., “Mineral Evolution,” *American Mineralogist* 93 (2008): 1693–720.

- 15 Структуры и свойства этих кристаллических форм углерода обсуждаются в книге: Robert M. Hazen, *The Diamond Makers* (New York: Cambridge University Press, 1999).
- 16 Типы и происхождение метеоритов рассматриваются в издании: James J. Papike, ed., *Planetary Materials* (Chantilly, VA: Mineralogical Society of America, 1998).
- 17 Известные на сегодняшний день минералы углерода рассматриваются в изданиях: Robert M. Hazen et al., "The Mineralogy and Crystal Chemistry of Carbon," in *Carbon in Earth*, ed. Robert M. Hazen, Adrian P. Jones, and John Baross (Washington, DC: Mineralogical Society of America, 2013), 7–46. Полный актуальный список всех углеродсодержащих минералов доступен в IMA Database of Mineral Properties базы данных RRAFF Project на 19 сентября 2018 г. по ссылке: <http://rruff.info/ima>; а перечни их местонахождений — на сайте Mindat.org; доступны на 19 сентября 2018 г. по ссылке: <http://mindat.org>
- 18 Оценки общего количества минералов углерода земной коры взяты из работ: Paul Falkowski et al., "The Global Carbon Cycle: A Test of Our Knowledge of Earth as a System," *Science* 290, no. 5490 (2000): 291–96; и Marc M. Hirschmann and Rajdeep Dasgupta, "The H/C Ratios of Earth's Near-Surface and Deep Reservoirs, and Consequences for Deep Earth Volatile Cycles," *Chemical Geology* 262 (2009): 4–16.
- 19 Обзор первых геологических дебатов см. в книге: Martin J. S. Rudwick, *The Meaning of Fossils: Episodes in the History of Paleontology*, 2nd ed. (Chicago: University of Chicago Press, 1976).
- 20 Биографию Геттона можно почитать в: Jack Repcheck, *The Man Who Found Time: James Hutton and the Discovery of Earth's Antiquity* (New York: Perseus, 2003). Идеи Геттона получили поддержку после публикации труда: Charles Lyell, *Principles of Geology: Being an Attempt to Explain the Former Changes of the Earth's Surface, by Reference to Causes Now in Operation*, 3 vols. (London: Murray, 1830–33).
- 21 James Hutton, *Theory of the Earth, with Proofs and Illustrations, in Four Parts*, 2 vols. (Edinburgh: Creech, 1795).

- 22 Исследования Холла описаны в книге: Simon Mitton, *From Crust to Core: A Chronicle of Deep Carbon Science* (New York: Cambridge University Press, в печати).
- 23 James Hall, "Account of a Series of Experiments, Shewing the Effects of Compression in Modifying the Action of Heat," *Transactions of the Royal Society of Edinburgh* 6 (1812): 75.
- 24 Hall, "Account of a Series of Experiments," 81.
- 25 См.: «Штрихкод жизни» по ссылке: <https://phe.rockefeller.edu/barcode>, доступной на 17 сентября 2018 г.
- 26 Mark Y. Stoeckle et al., "Commercial Teas Highlight Plant DNA Barcode Identification Successes and Obstacles," *Scientific Reports* 1 (2011): art. 42.
- 27 John Schwartz, "Fish Tale Has DNA Hook: Students Find Bad Labels," *New York Times*, August 21, 2008, A1.
- 28 Jesse Ausubel, цит. по: Schwartz, "Fish Tale Has DNA Hook."
- 29 Наши результаты опубликованы в статье: Robert M. Hazen and Jesse Ausubel, "On the Nature and Significance of Rarity in Mineralogy," *American Mineralogist* 101 (2016): 1245–51, <https://doi.org/10.2138/am-2016-5601CCBY>. Мы обнаружили, что редкость минералов имеет несколько параллелей с биологической редкостью, что рассматривается в работе: Deborah Rabinowitz, "Seven Forms of Rarity," in *The Biological Aspects of Rare Plant Conservation*, ed. J. Synge (New York: Wiley, 1981), 205–17.
- 30 Речь идет о Шоне Соломоне, директоре Обсерватории Земли Ламонт — Дозерти в Колумбийском университете; это его комментарий к лекции "Mineralogical Coevolution of the Geo- and Biospheres: Metallogenesis, the Supercontinent Cycle, and the Rise of the Terrestrial Biosphere", прочитанной автором в этой обсерватории 11 октября 2013 г.
- 31 Редкий минерал фингерит был описан в статье: John M. Hughes and Chris G. Hadidiacos, "Fingerite, $\text{Cu}_{11}\text{O}_2(\text{VO}_4)_6$, a New Vanadium Sublimate from Izalco Volcano, El Salvador: Descriptive Mineralogy," *American Mineralogist* 70 (1985): 193–96.
- 32 Текущую информацию по нашим основанным на больших данных исследованиям открытий можно найти на сайте

- Института Карнеги, была в доступе на 19 сентября 2018 г. по ссылке: <http://dtdi.carnegiescience.edu>
- 33 Биографические сведения о Роберте Даунсе были получены в ходе бесед и переписки с ним по e-mail в январе и апреле 2017 г. и январе 2018 г.
- 34 См.: Robert T. Downs, "The RRUFF Project: An Integrated Study of the Chemistry, Crystallography, Raman and Infrared Spectroscopy of Minerals," in *Program & Abstracts: 19th General Meeting of the International Mineralogical Association, Kobe, Japan, July 23–28, 2006* (Kobe: IMA, 2006), 3–13.
- 35 Биографические сведения о Джолионе Ральфе были получены в ходе бесед и переписки с ним по e-mail в августе 2017 г. и январе 2018 г.
- 36 В 2014 г. Джолион Ральф передал весь веб-сайт и базу данных Mindat.org в дар некоммерческому Минералогическому институту Хадсона, чтобы обеспечить его лучшую защиту и при этом оставить доступ бесплатным для всех.
- 37 См.: Roberta L. Rudnick and S. Gao, "Composition of the Continental Crust," in *The Crust: Treatise on Geochemistry*, ed. Roberta L. Rudnick (New York: Elsevier, 2005), 1–64.
- 38 См.: B.J. McGill et al., "Species Abundance Distributions: Moving beyond Single Prediction Theories to Integration within an Ecological Framework," *Ecological Letters* 10 (2007): 995–1015. Авторы утверждают, что вогнутая, смещенная вправо кривая частотного распределения видов, похоже, является универсальным законом в биологии и экологии.
- 39 Математические подходы к лексической статистике описаны в книге: R. Н. Вааген, *Word Frequency Distributions* (New York: Kluwer, 2001).
- 40 Биографические сведения о Грете Хистад были получены в ходе бесед и переписки с ней по e-mail в феврале 2017 г.
- 41 Исходное описание экологии минералов, а также математическое представление БЧРС-распределения минералов впервые описано в статье: Robert M. Hazen et al., "Mineral Ecology: Chance and Necessity in the Mineral Diversity of Terrestrial Planets," *Canadian Mineralogist* 53 (2015): 295–323.

- 42 Три статьи, опубликованные в 2015 г.: Grethe Hystad, Robert T. Downs, and Robert M. Hazen, “Mineral Frequency Distribution Data Conform to a LNRE Model: Prediction of Earth’s ‘Missing’ Minerals,” *Mathematical Geosciences* 47 (2015): 647–61; Robert M. Hazen et al., “Earth’s ‘Missing’ Minerals,” *American Mineralogist* 100 (2015): 2344–47; и Grethe Hystad et al., “Statistical Analysis of Mineral Diversity and Distribution: Earth’s Mineralogy Is Unique,” *Earth and Planetary Science Letters* 426 (2015): 154–57. См. также историческое описание развития экологии минералов на сайте Института Карнеги в разделе “About Dr. Hazen,” доступном на 19 сентября 2018 г. по ссылке: <http://hazen.carnegiescience.edu>
- 43 В последующих статьях по экологии минералов рассматривались, в свою очередь, бор: Edward S. Grew et al., “How Many Boron Minerals Occur in Earth’s Upper Crust?” *American Mineralogist* 102 (2017): 1573–87; хром: Chao Liu et al., “Chromium Mineral Ecology,” *American Mineralogist* 102 (2017): 612–19; и кобальт: Robert M. Hazen et al., “Cobalt Mineral Ecology,” *American Mineralogist* 102 (2017): 108–16.
- 44 См. Robert M. Hazen et al., “Carbon Mineral Ecology: Predicting the Undiscovered Minerals of Carbon,” *American Mineralogist* 101 (2016): 889–906.
- 45 См. информацию о проекте Carbon Mineral Challenge на сайте <http://mineralchallenge.net>, ссылка доступна на 19 сентября 2018 г.
- 46 Биографические сведения о Дэне Хаммере были получены в ходе бесед и переписки с ним по e-mail в июле, августе и декабре 2017 г.
- 47 Описание минерала изложено в статье: И. В. Пеков, Н. В. Чуканов, В. О. Япаскерт, Д. И. Белаковский, И. С. Лыкова и др. Тиннункулит $C_5H_4N_4O_3 \cdot 2H_2O$: находки на Кольском полуострове, переопределение и установление статуса минерального вида. Записки Российского минералогического общества, 145 (4): 20–35, 2016.
- 48 Минералогия углерода высокого давления рассматривается в работе: Artem Oganov et al., “Deep Carbon Mineralogy,” in

- Carbon in Earth*, ed. Robert M. Hazen, Adrian P. Jones, and John Baross (Washington, DC: Mineralogical Society of America, 2013), 44–77.
- 49 Проведенное Мерриллом и Бассетом исследование кальцита высокого давления можно найти в статье: Leo Merrill and William A. Bassett, “The Crystal Structure of CaCO_3 (II), a High-Pressure Metastable Phase of Calcium Carbonate,” *Acta Crystallographica* B31 (1975): 343–49.
- 50 История разработки и использования ячеек с алмазными наковальнями рассказывается в уже упоминавшейся работе: Hazen, *Diamond Makers*.
- 51 Leo Merrill and William A. Bassett, “Miniature Diamond Anvil Pressure Cell for Single Crystal X-Ray Diffraction Studies,” *Review of Scientific Instruments* 45 (1974): 290–94.
- 52 См. обзор в уже упомянутой работе: Oganov, “Deep Carbon Mineralogy”.
- 53 Биографические сведения о Марко Мерлини были получены в ходе бесед и переписки с ним по e-mail в августе и сентябре 2017 г., а также во время моего визита в его миланскую лабораторию в мае 2013 г.
- 54 Marco Merlini et al., “Structures of Dolomite at Ultrahigh Pressure and Their Influence on the Deep Carbon Cycle,” *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 109 (2012): 13509–14.
- 55 Marco Merlini et al., “The Crystal Structures of $\text{Mg}_2\text{Fe}_2\text{C}_4\text{O}_{13}$, with Tetrahedrally Coordinated Carbon and $\text{Fe}_{13}\text{O}_{19}$, Synthesized at Deep Mantle Conditions,” *American Mineralogist* 100 (2015): 2001–4. См. также: Marco Merlini et al., “Dolomite-IV: Candidate Structure for a Carbonate in the Earth’s Lower Mantle,” *American Mineralogist* 102 (2017): 1763–66.
- 56 Общий обзор исследований алмазов можно найти в работе: Stephen B. Shirey et al., “Diamonds and the Geology of Mantle Carbon,” *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 75 (2013): 355–421.
- 57 Evan M. Smith et al., “Large Gem Diamonds from Metallic Liquid in Earth’s Deep Mantle,” *Science* 354, no. 6318 (2016): 1403–5.
- 58 Обзоры исследований по включениям в алмазах можно почитать в работе: Steven B. Shirey and Stephen H. Richardson,

- “Start of the Wilson Cycle at 3 Ga Shown by Diamonds from Subcontinental Mantle,” *Science* 333 (2011): 434–36. См. также: Shirey et al., “Diamonds and the Geology of Mantle Carbon.”
- 59 См.: Gemological Institute of America, информация доступна на 19 сентября 2018 г. по ссылке: <https://www.gia.edu>
- 60 Обнаружение того, что включения в алмазах старше 3 млрд лет не такие, как в более молодых, описано в работе: Shirey and Richardson, “Start of the Wilson Cycle at 3 Ga shown by diamonds from subcontinental mantle.” *Science* 333.6041 (2011): 434–436.
- 61 Биографические сведения о Фрэнсисе Бёрче приводятся в издании: Thomas J. Ahrens, *Albert Francis Birch, 1903–1992* (Washington, DC: National Academy of Sciences, 1998).
- 62 Francis Birch, “Elasticity and Constitution of the Earth’s Interior,” *Journal of Geophysical Research* 57 (1952): 227–86.
- 63 Из Birch, “Elasticity and Constitution,” 234.
- 64 Изотопные свидетельства фракционирования Земли по массе и наличию углерода в ядре рассматриваются в статье: Bernard J. Wood, Jei Li, and Anat Shahar, “Carbon in the Core: Its Influence on the Properties of Core and Mantle,” *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 75 (2013): 231–50. См. также работу: Anat Shahar et al., “High-Temperature Si Isotope Fractionation between Iron Metal and Silicate,” *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75 (2011): 7688–97.
- 65 Биографические сведения о Джи Ли были получены в ходе бесед и переписки с ней по e-mail в июне 2017 г.
- 66 Bin Chen et al., “Hidden Carbon in Earth’s Inner Core Revealed by Shear Softening in Dense Fe_7C_3 ,” *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 111 (2014): 17755–58.
- 67 Clemens Prescher et al., “High Poisson’s Ratio of Earth’s Inner Core Explained by Carbon Alloying,” *Nature Geoscience* 8 (2015): 220–23.
- 68 Prescher et al., “High Poisson’s Ratio.”
- 69 Hystad, “Statistical Analysis of Mineral Diversity.”
- 70 Этот раздел является адаптацией материала: Robert M. Hazen, “Mineral Fodder,” *Aeon*, June 24, 2014, <https://aeon.co/essays/how-life-made-the-earth-into-a-cosmic-marvel>

ЧАСТЬ II — ВОЗДУХ

- 1 Образование Земли из солнечной туманности описывается в книге: Robert M. Hazen, *The Story of Earth: The First 4.5 Billion Years, from Stardust to Living Planet* (New York: Viking, 2012). Перевод на русский язык: Хейзен Р. История Земли. От звездной пыли — к живой планете. Первые 4 500 000 000 лет. — М.: Альпина нон-фикшн, 2015.
- 2 Средние химические составы образовавших Землю метеоритов-хондритов приведены в работе: H. Palme, K. Lodders, and A. Jones, “Solar System Abundances of the Elements,” *Treatise on Geochemistry* 2 (2014): 15–35.
- 3 Подробное описание органических молекул, найденных в метеоритах, см. в: Mark A. Sephton, “Organic Compounds in Carbonaceous Meteorites,” *Natural Products Report* 19 (2002): 292–311. Полезный обзор дан в статье: Puna Dalai, Hussein Kaddour, and Nita Sahai, “Incubating Life: Prebiotic Sources of Organics for the Origin of Life,” *Elements* 12 (2016): 401–6.
- 4 Предположения о составе ранней атмосферы рассмотрены в статье: Kevin Zahnle, “Earth’s Earliest Atmosphere,” *Elements* 2 (2006): 217–22.
- 5 Свежая теория образования Луны с ссылками на более ранние идеи изложена в статье: Matija Ćuk et al., “Tidal Evolution of the Moon from a High-Obliquity, High-Angular-Momentum Earth,” *Nature* 539 (2016): 402–6. См. также: Hazen, *Story of Earth*.
- 6 Понятие слабого молодого Солнца было введено в работе: Carl Sagan and George Mullen, “Earth and Mars: Evolution of Atmospheres and Surface Temperatures,” *Science* 177 (1972): 52–56.
- 7 См.: I. Rasool and C. De Bergh, “The Runaway Greenhouse and the Accumulation of CO₂ in the Venus Atmosphere,” *Nature* 226, no. 5250 (1970): 1037–39.
- 8 См., напр., работу: John C. Armstrong, L. E. Wells, and G. Gonzales, “Rummaging through Earth’s Attic for Remains of Ancient Life,” *Icarus* 160 (2002): 183–96.
- 9 Эта научная экскурсия DCO под руководством итальянских геологов Карло Карделлини, Джованни Киодини, Маттео

Лелли и Стефано Калиро состоялась во вторник 6 октября 2015 г.

- 10 Типичный пример этого можно найти в книге: James S. Trefil and Robert M. Hazen, *The Sciences: An Integrated Approach*, 8th ed. (Hoboken, NJ: Wiley, 2015), 431.
- 11 Глубинный цикл углерода был главной темой исследования, проводимого подразделением DCO Reservoirs and Fluxes. См. по ссылке: <https://deepercarbon.net/content/reservoirs-and-fluxes>, активной на 21 сентября 2018 г.
- 12 См., напр., работу: Peter B. Kelemen and Craig E. Manning, "Reevaluating Carbon Fluxes in subduction zones, What Goes Down, Mostly Comes Up," *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 112 (2015): E3997–4006.
- 13 Появление планктонных окаменелостей и последствия среднемезозойской революции описаны в работе: Andy Ridgwell, "A Mid-Mesozoic Revolution in the Regulation of Ocean Chemistry," *Marine Geology* 217 (2005): 339–57. См. также: Andy Ridgwell and Richard E. Zeebe, "The Role of the Global Carbonate Cycle in the Regulation and Evolution of the Earth System," *Earth and Planetary Science Letters* 234 (2005): 299–315.
- 14 Терри Планк, интервью в письме от 10 января 2018 г.
- 15 Сверженски выступил с короткой речью в ходе семинара по глубинному углеродному циклу, организованного фондом Слоуна в Вашингтоне (округ Колумбия) 15 и 16 мая 2008 г. Многие выступления с того семинара можно посмотреть на сайте Института Карнеги в разделе "Sloan Deep Carbon Cycle Workshop — Sessions", доступном на 19 сентября 2018 г. по ссылке: <https://itunes.apple.com/us/podcast/sloan-deep-carbon-cycle-workshop-sessions/id438928309?mt=2>
- 16 Ding Pan et al., "Dielectric Properties of Water under Extreme Conditions and Transport of Carbon in the Deep Earth," *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 110 (2013): 6646–50.
- 17 Исследование растворимости карбонатов можно посмотреть в статье: S. Facq et al., "In situ Raman Study and Thermodynamic Model of Aqueous Carbonate Speciation in Equilibrium with

- Aragonite under Subduction Zone Conditions,” *Geochimica et Cosmochimica Acta* 132 (2014): 375–90. Дополнительные сведения предоставила Изабель Даниэль, отвечая на мои вопросы по e-mail 12 января 2018 г.
- 18 Биографические сведения о Димитри Сверженски были получены от него в виде ответов на мои вопросы по e-mail 11, 12 и 14 января 2018 г.
 - 19 Вот несколько наших публикаций о поверхностях минералов: Christine M. Jonsson et al., “Attachment of γ -Glutamate to Rutile (α -TiO₂): A Potentiometric, Adsorption and Surface Complexation Study,” *Langmuir* 25 (2009): 12127–35; Namhey Lee et al., “Speciation of γ -DOPA on Nanorutile as a Function of pH and Surface Coverage Using Surface-Enhanced Raman Spectroscopy (SERS),” *Langmuir* 28 (2012): 17322–30; Charlene Estrada et al., “Interaction between γ -Aspartate and the Brucite [Mg (OH)₂] — Water Interface,” *Geochimica et Cosmochimica Acta* 155 (2015): 172–86, а также Teresa Fornaro et al., “Binding of Nucleic Acid Components to the Serpentine-Hosted Hydrothermal Mineral Brucite,” *Astrobiology* 18, no. 8 (August 2018): 989–1007, <https://doi.org/10.1089/ast.2017.1784>
 - 20 Dimitri A. Sverjensky, Brandon Harrison, and David Azzolini, “Water in the Deep Earth: The Dielectric Constant and the Solubilities of Quartz and Corundum to 60 kb and 1,200 °C,” *Geochimica et Cosmochimica Acta* 129 (2014): 125–45.
 - 21 См.: Fang Huang et al., “Immiscible Hydrocarbon Fluids in the Deep Carbon Cycle,” *Nature Communications* 8 (2017): art. 15798.
 - 22 Dimitri A. Sverjensky and Fang Huang, “Diamond Formation Due to a pH Drop during Fluid-Rock Interactions,” *Nature Communications* 6 (2015): art. 8702.
 - 23 История изотопологов метана и глубинного метана описана в работе: Mark A. Sephton and Robert M. Hazen, “On the Origins of Deep Hydrocarbons,” *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 75 (2013): 449–65.
 - 24 John M. Eiler and Edwin Schauble, “¹⁸O¹³C¹⁶O in Earth’s Atmosphere,” *Geochimica et Cosmochimica Acta* 68 (2004): 4767–77.

- 25 Биографические сведения об Эдварде Янге были получены из переписки с ним по e-mail 10 января 2018 г.
- 26 Разработка Панорама описана в Edward D. Young et al., "A Large-Radius High-Mass-Resolution Multiple-Collector Isotope Ratio Mass Spectrometer for Analysis of Rare Isotopologues of O₂, N₂, CH₄ and Other Gases," *International Journal of Mass Spectrometry* 401 (2016): 1–10. Ранние применения были опубликованы в Edward D. Young et al., "The Relative Abundances of Resolved ¹²CH₂D₂ and ¹³CH₃D and Mechanisms Controlling Isotopic Bond Ordering in Abiotic and Biotic Methane Gases," *Geochimica et Cosmochimica Acta* 203 (2017): 235–64.
- 27 Биографические сведения о Шухее Оно были получены из переписки с ним 10 января 2018 г. Разработки Оно описаны в Shuhei Ono et al., "Measurement of a Doubly-Substituted Methane Isotopologue, ¹³CH₃D, by Tunable Infrared Laser Direct Absorption Spectroscopy," *Analytical Chemistry* 86 (2014): 6487–94.
- 28 Самые свежие статьи: A. R. Whitehill et al., "Clumped Isotope Effects during OH and Cl Oxidation of Methane," *Geochimica et Cosmochimica Acta* 196 (2017): 307–25, и D. T. Wang et al., "Clumped Isotopologue Constraints on the Origin of Methane at Seafloor Hot Springs," *Geochimica et Cosmochimica Acta* 223 (2018): 141–58.
- 29 Оценку выходов углерода из главных вулканов можно найти в работе: Michel R. Burton, Georgina M. Sawyer, and Dominico Granieri, "Deep Carbon Emissions from Volcanoes," *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 75 (2013): 323–54.
- 30 Узнать о деятельности ученых DECADE и посмотреть их многочисленные публикации можно на сайте Deep Carbon Observatory в разделе "DECADE", доступном на 22 сентября 2018 г. по ссылке: <https://deepcarboncycle.org/home-decade>.
- 31 См.: NOVAC, "Project Partners", доступно на 27 июня 2018 г. по ссылке: <http://www.novac-project.eu/partners.htm>
- 32 Совместный учет сернистого и углекислого газа при наблюдении за вулканами описан в статье: A. Aiuppa et al., "Forecasting Etna Eruptions by Real-Time Observation of Volcanic Gas

- Composition,” *Geology* 35 (2007): 1115–18. О применении этого метода см. работу: J. M. de Moor et al., “Turmoil at Turrialba Volcano (Costa Rica): Degassing and Eruptive Processes Inferred from High-Frequency Gas Monitoring,” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 121, no. 8 (2016): 5761–75.
- 33 См.: посвящение редакторов Питера Липмена и Донала Муллино в издании: *The 1980 Eruptions of Mount Saint Helens, Washington*, Geological Survey Professional Paper 1250 (Washington, DC: US Government Printing Office, 1981), vii.
- 34 См.: R. V. Fisher, “Obituary Harry Glicken (1958–1991),” *Bulletin of Volcanology* 53, no. 6 (1991): 514–16.
- 35 Варианты описания событий, которые привели к многочисленным смертям 14 января 1993 г., см. в публикациях: Stanley Williams and Fen Montaigne, *Surviving Galeras* (New York: Houghton Mifflin, 2001) и Victoria Bruce, *No Apparent Danger: The True Story of Volcanic Disaster at Galeras and Nevada del Ruiz* (New York: HarperCollins, 2002).
- 36 Биографические сведения о Мари Эдмондс были получены из переписки с ней по e-mail 12 и 16 января 2018 г.
- 37 Emily Mason, Marie Edmonds, and Alexandra V. Turchyn, “Remobilization of Crustal Carbon May Dominate Volcanic Arc Emissions,” *Science* 357, no. 6346 (2017): 290–94.
- 38 Список вулканов Земли можно посмотреть на сайте Смитсоновского института, вкладка Global Volcanism Program, доступен на 27 июня 2018 г. по ссылке: <https://volcano.si.edu>
- 39 Флюидные включения в алмазах обсуждаются в работе: Steven B. Shirey et al., “Diamonds and the Geology of Mantle Carbon,” *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 75 (2013): 355–421.
- 40 См.: Shirey et al., “Diamonds and the Geology of Mantle Carbon.” Дополнительную информацию по исследованиям алмазов Стивен Шири предоставил для DCO в переписке по e-mail от 12 января 2018 г.
- 41 Kelemen and Manning, “Reevaluating Carbon Fluxes.” Альтернативная оценка резервуаров и потоков глубинного углерода была дана в статье: Rajdeep Dasgupta and

- Marc M. Hirschmann, "The Deep Carbon Cycle and Melting in Earth's Interior," *Earth and Planetary Science Letters (Frontiers)* 298 (2010): 1–13.
- 42 Оценку исторического потребления ископаемого топлива можно найти в документах Управления по энергетической информации США "History of Energy Consumption in the United States, 1775–2009," February 9, 2011, <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=10>
- 43 Литература по парниковым газам и глобальному потеплению обширна и многочисленна. Вот основные отчеты: Gabriele C. Hegerl et al., "Understanding and Attributing Climate Change," in *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007*, ed. S. Solomon et al. (Cambridge: Cambridge University Press, 2007), chap. 9; National Research Council, *Advancing the Science of Climate Change* (Washington, DC: National Academies Press, 2010) и Intergovernmental Panel on Climate Change, *Fifth Assessment Report*, 4 vols. (New York: Cambridge University Press, 2013).
- 44 Об этом рассказывалось в статье: Kendra Pierre-Louis and Nadja Popovich, "Of 21 Winter Olympic Cities, Many May Soon Be Too Warm to Host the Games," *New York Times* от 11 января 2018 г.
- 45 О положительных обратных связях в контексте высвобождения метана см. в работах: D. M. Lawrence and A. Slater, "A Projection of Severe Near-Surface Permafrost Degradation during the 21st Century," *Geophysical Research Letters* 32, no. 24 (2005): L24401; David Archer, "Methane Hydrate Stability and Anthropogenic Climate Change," *Biogeosciences* 4, no. 4 (2007): 521–44.
- 46 Дополнительную информацию см. на сайте Oman Drilling Project по ссылке: <http://www.omandrilling.ac.uk>, доступной на 27 июня 2018 г.
- 47 Этот раздел основан на работе: Jesse H. Ausubel, "A Census of Ocean Life: On the Difficulty and Joy of Seeing What Is Near and Far," *SGI Quarterly* 60 (April 2010): 6–8.

ЧАСТЬ III — ОГОНЬ

- 1 История зачисления очков в американском футболе рассматривается в книге: David M. Nelson, *The Anatomy of a Game* (Newark: University of Delaware Press, 1994).
- 2 См. обзорный труд по органической химии: Marye Anne Fox and James K. Whitesell, *Organic Chemistry*, 3rd ed. (Sudbury, MA: Jones and Bartlett, 2004).
- 3 Alasdair H. Neilson, ed., *PAHs and Related Compounds: Chemistry* (Berlin: Springer, 1998). См. также: Chunsham Song, *Chemistry of Diesel Fuels* (Boca Raton, FL: CRC Press, 2015).
- 4 Реки и озера Титана описаны в статье: E. R. Stofan et al., “The Lakes of Titan,” *Nature* 445 (2007): 61–64. См. также: A. Coustenis and F. W. Taylor, *Titan: Exploring an Earthlike World* (Singapore: World Scientific, 2008).
- 5 Про очищение нефти можно почитать в книге: James G. Speight, *The Chemistry and Technology of Petroleum*, 4th ed. (New York: Marcel Dekker, 2006).
- 6 См., напр.: A. I. Railkin, *Marine Biofouling: Colonization Processes and Defenses* (Boca Raton, FL: CRC Press, 2004) и Laurel Hamers, “Designing a Better Glue from Slug Goo,” *Science News*, September 30, 2017, 14–15. Интересный подход к очистке дна судна представлен в статье: Shahrouz Amini et al., “Preventing Mussel Adhesion Using Lubricant-Infused Materials,” *Science* 357, no. 6352 (2017): 668–72.
- 7 См.: Edward M. Petrie, *Handbook of Adhesives and Sealants* (New York: McGraw-Hill, 2000).
- 8 Мировая премьера состоялась 10 февраля 1975 г. в гарвардском историческом Театре Сандерса. На следующий день мы сделали запись в бостонской студии Intermedia Sound Studios (331 Newbury Street). Однако находящаяся по соседству строительная площадка создавала фоновый шум, так что запись не годилась для релиза. Дополнительные подробности я получил из переписки с Мартой Ким по e-mail 27 сентября и 1 октября 2017 г.
- 9 Исследование Гейма и Новоселова, за которое они получили Нобелевскую премию, было изложено в работе: K. S. Novoselov

- et al., “Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films,” *Science* 306 (2004): 666–69. См. также: Andre K. Geim and Konstantin S. Novoselov, “The Rise of Graphene,” *Nature Materials* 6 (2007): 183–91.
- 10 Andre K. Geim and Phillip Kim, “Carbon Wonderland,” *Scientific American* 298 (April 2008): 90–97; Edward L. Wolf, *Applications of Graphene: An Overview* (Berlin: Springer, 2014).
 - 11 Mitch Jacoby, “Graphene Finds New Use as Hair Dye,” *Chemical and Engineering News*, March 10, 2018, 4.
 - 12 Sumio Iijima, “Helical Microtubules of Graphitic Carbon,” *Nature* 354 (1991): 56–58.
 - 13 Вариации наноархитектуры углерода рассматриваются в работе: Peter J. F. Harris, *Carbon Nanotube Science: Synthesis, Properties and Applications* (New York: Cambridge University Press, 2009).
 - 14 H. W. Kroto et al., “C₆₀: Buckminsterfullerene,” *Nature* 318, no. 6042 (1985): 162–63. См. также: Richard E. Smalley, “Discovering the Fullerenes,” *Reviews of Modern Physics* 69 (1997): 723–30.
 - 15 См., напр.: Guillaume Povie et al., “Synthesis of a Carbon Nanobelt,” *Science* 356, no. 6334 (2017): 172–73.
 - 16 Цит. по викицитатнику к фильму «Выпускник», ссылка https://en.wikiquote.org/wiki/The_Graduate доступна на 21 января 2018 г.
 - 17 История получения резины рассказывается в книге: Howard Wolf and Ralph Wolf, *Rubber: A Story of Glory and Greed* (Akron, OH: Smithers Rapra, 2009).
 - 18 Hermann Staudinger, “Über Polymerisation,” *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft* 53, no. 6 (1920): 1073–85.
 - 19 См.: Mary Ellen Bowden, *Chemical Achievers: The Human Face of the Chemical Sciences* (Philadelphia: Chemical Heritage Foundation, 1997). См. также: Jeffrey L. Meikle, *American Plastics: A Cultural History* (New Brunswick, NJ: Rutgers University Press, 1997).
 - 20 Жизнь и работа Уоллеса Карозерса описываются в упомянутой выше книге Meikle, *American Plastics*.
 - 21 Этот полиуретановый демонстрационный набор продается фирмой Flinn Scientific (Батавия, штат Иллинойс)

- под названием “Polyurethane Foam System — Chemical Demonstration Kit”, артикул #C0335; он доступен на 22 апреля 2018 г. по ссылке: <https://www.flinnsci.com/polyurethane-foam-system---chemical-demonstration-kit/c0335>.
- 22 Хорошая статья о генетической мутации, которая вызывает серповидноклеточную анемию: D. C. Rees, T. N. Williams, and M. T. Gladwin, “Sickle Cell Disease,” *Lancet* 376, no. 9757 (2010): 2018–31.
 - 23 См.: Aamer Ali Shah et al., “Biological Degradation of Plastics: A Comprehensive Review,” *Biotechnology Advances* 26 (2008): 246–65.
 - 24 Деполимеризация нейлона обсуждается в статье: M. Moezzi and M. Ghane, “The Effect of UV Degradation on Toughness of Nylon 66/Polyester Woven Fabrics,” *Journal of the Textile Institute* 104, no. 12 (2013): 1277–83.
 - 25 См.: Marcella Hazan, *Essentials of Classic Italian Cooking* (New York: Knopf, 1992). Информацию о приготовлении традиционной итальянской пасты я получил отчасти в личных беседах с Терезой Форнаро в мае 2018 г.
 - 26 См.: Library of Congress, “The Deterioration and Preservation of Paper: Some Essential Facts,” доступно на 15 марта 2018 г. по ссылке: <https://www.loc.gov/preservation/care/deteriorate-brochure.html>.

ЧАСТЬ IV — ВОДА

- 1 Среди множества книг по философии поиска происхождения жизни см.: Iris Fry, *The Emergence of Life on Earth: A Historical and Scientific Overview* (New Brunswick, NJ: Rutgers University Press, 2000), а также Constance M. Bertka, ed., *Exploring the Origin, Extent, and Future of Life: Philosophical, Ethical and Theological Perspectives* (Washington, DC: American Association for the Advancement of Science, 2009).
- 2 Время образования Луны рассматривается в работе: Tais W. Dahl and David J. Stevenson, “Turbulent Mixing of Metal and Silicate during Planet Accretion — an Interpretation of the Hf-W Chronometer,” *Earth and Planetary Science Letters* 295,

- по. 1–2 (2010): 177–86. Возраст древнейших ископаемых остатков Земли остается предметом споров, но большинство палеонтологов считают ими строматолиты возраста 3,5 млрд лет из Западной Австралии: Abigail Allwood et al., “Stromatolite Reef from the Early Archean of Australia,” *Nature* 441, no. 7094 (2006): 714–18. Возможные ископаемые возраста 3,7 млрд лет были описаны из Гренландии: Т. Hassenkam et al., “Elements of Eoarchean Life Trapped in Mineral Inclusions,” *Nature* 548 (2017): 78–81. Есть предположения и о еще более древних признаках жизни — в статьях: Matthew S. Dodd et al., “Evidence for Early Life in Earth’s Oldest Hydrothermal Vent Precipitates,” *Nature* 543 (2017): 60–64; Takayuki Tashiro et al., “Early Trace of Life from 3.95 Ga Sedimentary Rocks in Labrador, Canada,” *Nature* 549 (2017): 516–18.
- 3 Вероятность того, что причиной образования биосферы Земли были марсианские метеориты, изучается в работе: С. Mileikowsky et al., “Natural Transfer of Microbes in Space, Part I: From Mars to Earth and Earth to Mars,” *Icarus* 145, no. 2 (2000): 391–427.
 - 4 См.: Simon Mitton, *Fred Hoyle: A Life in Science* (New York: Cambridge University Press, 2011).
 - 5 Более полные обсуждения определения понятия «жизнь» и теорий происхождения жизни см. в книгах: Noam Lahav, *Biogenesis: Theories of Life’s Origins* (New York: Oxford University Press, 1999); Fry, *Emergence of Life on Earth*; Robert M. Hazen, *Genesis: The Scientific Quest for Life’s Origin* (Washington, DC: Joseph Henry Press, 2005); David Deamer and Jack W. Szostak, eds., *The Origins of Life* (Cold Spring Harbor, NY: Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2010); Eric Smith and Harold J. Morowitz, *The Origin and Nature of Life on Earth: The Emergence of the Fourth Geosphere* (New York: Cambridge University Press, 2016).
 - 6 Гипотеза глиняного мира представлена в книгах: А. Graham Cairns-Smith, *Seven Clues to the Origin of Life* (Cambridge: Cambridge University Press, 1985) и А. Graham Cairns-Smith and Hyman Hartman, *Clay Minerals and the Origin of Life* (Cambridge: Cambridge University Press, 1986).

- 7 Исходные статьи, описывающие добиологический органический синтез: Stanley L. Miller, "A Production of Amino Acids under Possible Primitive Earth Conditions," *Science* 117 (1953): 528–29 и Stanley L. Miller, "Production of Some Organic Compounds under Possible Primitive Earth Conditions," *Journal of the American Chemical Society* 77 (1955): 2351–61. См. также: Christopher Wills and Jeffrey Bada, *The Spark of Life: Darwin and the Primeval Soup* (Cambridge, MA: Perseus, 2000).
- 8 Краткое жизнеописание см. в работе: S. L. Miller and J. Oró, "Harold C. Urey 1893–1981," *Journal of Molecular Evolution* 17 (1981): 263–64.
- 9 Miller, "Production of Amino Acids."
- 10 Claude Lévi-Strauss, *La pensée sauvage* (Paris: Librairie Plon, 1962).
- 11 См.: Robert M. Hazen, "Deep Carbon and False Dichotomies," *Elements* 10 (2010): 407–9.
- 12 Цит. по: Wills and Bada, *Spark of Life*, 41.
- 13 Критика Миллером гидротермальной гипотезы цитируется в работе: P. Radetsky, "How Did Life Start?" *Discover*, November 1992, 74–82. Дополнительный контекст см. также в уже упоминавшейся работе: Hazen, *Genesis*, 109–110, 266.
- 14 Paul M. Schenk et al., *Enceladus and the Icy Moons of Saturn* (Tucson: University of Arizona Press, 2018).
- 15 См.: David W. Deamer and R. M. Pashley, "Amphiphilic Components of the Murchison Carbonaceous Chondrite: Surface Properties and Membrane Formation," *Origins of Life and Evolution of the Biosphere* 19 (1989): 21–38. Более общий обзор см.: David W. Deamer, "Self-Assembly of Organic Molecules and the Origin of Cellular Life," *Reports of the National Center for Science Education* 23 (May — August 2003): 20–33.
- 16 Письмо Дарвина Джозефу Хукеру под номером 7471 в онлайн-базе данных Дарвина, доступно на 6 октября 2018 г. по ссылке: <https://www.darwinproject.ac.uk/letter/DCP-LETT-7471.xml>
- 17 Биографические сведения о Шарлин Эстраде были получены в ходе бесед и переписки с ней по e-mail в январе 2017 г.

- 18 Об исследованиях поглощения аминокислоты, проводимых Эстрадой, см.: Charlene Estrada et al., "Interaction between l-Aspartate and the Brucite $[Mg(OH)_2]$ — Water Interface," *Geochimica et Cosmochimica Acta* 155 (2015): 172–86.
- 19 Биографические сведения о Терезе Форнаро были получены в ходе бесед и переписки с ней по e-mail в январе 2017 г.
- 20 О проводимом Форнаро исследовании нуклеотидов на брусите см. работу: Teresa Fornaro et al., "Binding of Nucleic Acid Components to the Serpentinite-Hosted Hydrothermal Mineral Brucite," *Astrobiology* 18, no. 8 (August 2018): 989–1007, <https://doi.org/10.1089/ast.2017.1784>
- 21 См.: Smith and Morowitz, *Origin and Nature of Life on Earth*, 186, 201 и последующие.
- 22 Этот раздел является адаптацией статьи: Robert M. Hazen, "Chance, Necessity, and the Origins of Life," *Philosophical Transactions of the Royal Society. Series A* 375 (2016): 20160353.
- 23 Jacques Monod, *Chance and Necessity: An Essay on the Natural Philosophy of Modern Biology* (New York: Vintage Books, 1972). Известная цитата Моно приведена в заключительном абзаце книги.
- 24 Ernest Schoffeniels, *Anti-chance: A Reply to Monod's Chance and Necessity*, trans. B. L. Reid (Oxford: Pergamon, 1976), 18.
- 25 Эти идеи были впервые представлены на лекции в Институте Карнеги: Robert Hazen, "Chance, Necessity, and the Origins of Life" (Carnegie Public Lectures, Carnegie Institution for Science, November 12, 2015), доступной на 12 октября 2018 г. по ссылке: <https://carnegiescience.edu/events/lectures/special-event-robert-hazen-chance-necessity-and-origins-life>
- 26 Charles Darwin, *The Origin of Species* (London: John Murray, 1859).
- 27 См.: Paul G. Falkowski, *Life's Engines: How Microbes Made Earth Habitable* (Princeton, NJ: Princeton University Press, 2015). Есть перевод этой книги на русский язык: Фальковский П. Двигатели жизни: Как бактерии сделали наш мир обитаемым. — СПб.: Питер, 2016. См. также: J. D. Kim et al., "Discovering the Electronic Circuit Diagram of Life: Structural Relationships

- among Transition Metal Binding Sites in Oxidoreductases,” *Philosophical Transactions of the Royal Society. Series B* 368 (2013): 20120257.
- 28 Биографические сведения о Поле Фальковски взяты из упомянутой выше книги: Falkowski, *Life’s Engines*, 1–7. Дополнительная информация была получена из переписки с ним по e-mail 9 июня и 10 декабря 2017 г., а также из неопубликованного жизнеописания от 11 июня 2017 г.
- 29 Benjamin I. Jelen, Donato Giovannelli, and Paul G. Falkowski, “The Role of Microbial Electron Transfer in the Coevolution of the Geosphere and Biosphere,” *Annual Review of Microbiology* 70 (2016): 45–62.
- 30 Изучение жизни глубинных микробов является предметом исследований Отделения глубинной жизни Обсерватории глубинного углерода: Deep Carbon Observatory, “Deep Life,” доступно на 16 мая 2020 г. по ссылке: <https://deepcarbon.net/community/deep-life> (ссылка исправлена. — Прим. ред.).
- 31 Census of Deep Life, доступно на 6 октября 2018 г. по ссылке: <https://deepcarbon.net/tag/census-deep-life>
- 32 Биографические сведения о Стивене Д’Ондте были получены в ходе переписки с ним по e-mail 20 декабря 2017 г.
- 33 См.: Anurag Sharma et al., “Microbial Activity at Gigapascal Pressures,” *Science* 295 (2002): 1514–16.
- 34 Обсуждение фотосинтеза см. в: Falkowski, *Life’s Engines*, 96 и последующие.
- 35 В недавнем исследовании описаны организмы с модифицированным хлорофиллом, который может поглощать близкое к инфракрасному излучение: Dennis J. Nürnberg et al., “Photochemistry beyond the Red Limit in Chlorophyll f-Containing Photosystems,” *Science* 360 (2018): 1210–13.
- 36 Robert M. Hazen et al., “Mineral Evolution,” *American Mineralogist* 93 (2008): 1693–1720.
- 37 Происхождение многоклеточности описано в работе: Andrew H. Knoll, *Life on a Young Planet: The First Three Billion Years of Evolution on Earth* (Princeton, NJ: Princeton University Press, 2003), 161–78.

- 38 Knoll, *Life on a Young Planet*, 122–60.
- 39 Биографические сведения о Линн Маргулис были получены в ходе беседы с ней в Амхерсте, Массачусетс, 3 и 4 ноября 2011 г., всего за три недели до ее кончины.
- 40 Lynn Sagan, “On the Origin of Mitosing Cells,” *Journal of Theoretical Biology* 14 (1967): 225–74. См. также: Lynn Margulis, *Origin of Eukaryotic Cells* (New Haven, CT: Yale University Press, 1970).
- 41 Цит. по: Charles Mann, “Lynn Margulis: Science’s Unruly Earth Mother,” *Science* 252 (April 19, 1991): 379–81.
- 42 Эдиакарские ископаемые рассматриваются в уже упоминавшейся работе: Knoll, *Life on a Young Planet*, 164–78. Дополнительную информацию предоставил Дрю Масенте в письме от 10 июня 2017 г.
- 43 Биографические сведения о Майкле Мейере были получены в беседах с ним весной 2017 г. и переписки по e-mail 7 июня 2017 г.
- 44 Paleobiology Database, доступна на 29 сентября 2018 г. по ссылке: <https://paleobiodb.org>.
- 45 Эдиакарское исследование “Deep-Time Data-Driven Discovery and the Coevolution of the Geosphere and Biosphere” было представлено как часть лекции Роберта Хейзена и др. в Национальном научном фонде, Арлингтон, штат Вирджиния, 4 мая 2017 г.
- 46 Использование сетевого анализа для идентификации массовых вымираний по ископаемым находкам описывается в работе: A. Drew Muscente et al., “Quantifying Ecological Impacts of Mass Extinctions with Network Analysis of Fossil Communities,” *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 115 (2018): 5217–22.
- 47 Основные ссылки на литературу о биоминерализации приведены в работе: Patricia Dove, “The Rise of Skeletal Biominerals,” *Elements* 6, no. 1 (2010): 37–42. Гипотезы образования кораллов — в статье: Stanislas Von Euw et al., “Biological Control of Aragonite Formation in Stony Corals,” *Science* 356, no. 6341 (2017): 933–38.
- 48 Биографические сведения о Патриции Дав были получены в результате переписки с ней по e-mail 23 июня 2017 г. и 11 января 2018 г.

- 49 См.: S. Weiner et al., “Biologically Formed Amorphous Calcium Carbonate,” *Connective Tissue Research* 44 (2003): 214–18. См. также: D. Wang et al., “Carboxylated Molecules Regulate Magnesium Content of Amorphous Calcium Carbonates during Calcification,” *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 106 (2009): 21511–16.
- 50 См.: Hans R. Thierstein and Jeremy R. Young, *Coccolithophores: From Molecular Processes to Global Impact* (Berlin: Springer, 2004).
- 51 О появлении земной биосферы рассказывается в книге: David Beerling, *The Emerald Planet: How Plants Changed Earth's History* (New York: Oxford University Press, 2007).
- 52 Heather M. Wilson and Lyall I. Anderson, “Morphology and Taxonomy of Paleozoic Millipedes (Diplopoda: Chilignatha: Archipolypoda) from Scotland,” *Journal of Paleontology* 78 (2004): 169–84.
- 53 Биографические сведения о Ниле Шубине были получены в ходе бесед и переписки с ним по e-mail в январе 2018 г.
- 54 Это открытие описано в работе: Edward B. Daeschler, Neil H. Shubin, and Farish A. Jenkins Jr., “A Devonian Tetrapod-like Fish and the Evolution of the Tetrapod Body Plan,” *Nature* 440, no. 7085 (2006): 757–63. Изложение в научно-популярном жанре приведено в книге: Neil H. Shubin, *Your Inner Fish: A Journey into the 3.5-Billion-Year History of the Human Body* (New York: Vintage Books, 2008).
- 55 Классический обзор см. в книге: Dirk Willem van Krevelen, *Coal: Typology, Chemistry, Physics and Constitution*, 3rd ed. (New York: Elsevier Science, 1993).
- 56 Роль глинистых минералов в связывании органического углерода рассматривается в статье: Martin J. Kennedy and Thomas Wagner, “Clay Mineral Continental Amplifier for Marine Carbon Sequestration in a Greenhouse Ocean,” *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 108 (2011): 9776–81.
- 57 О методе радиоуглеродного анализа и его применении рассказывается в книге: R. E. Taylor, *Radiocarbon Dating: An Archeological Perspective* (Orlando, FL: Academic Press, 1987).
- 58 Taylor, *Radiocarbon Dating*, chap. 6.

- 59 Michael R. Waters et al., "Late Pleistocene Horse and Camel Hunting at the Southern Margin of the Ice-Free Corridor: Reassessing the Age of Wally's Beach, Canada," *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 112, no.14 (2015): 4263–67.
- 60 Quan Hua, Mike Barbetti, and Andrzej Z. Rakowski, "Atmospheric Radiocarbon for the Period 1950–2010," *Radiocarbon* 55 (2013): 2059–72.
- 61 Занятное альтернативное вычисление молекулярного циркулирования представлено в книге: Sam Kean, *Caesar's Last Breath: Decoding the Secrets of the Air around Us* (New York: Little, Brown, 2017).

Предметно-именной указатель

А

Абеллаит 91

Абелсонит 66

Абиотические химические реакции
154

Адсорбция

органических молекул
поверхностями минералов 281

РНК 284

экспериментальные исследования
механизмов 280, 282, 283

Азот 259

Алмазы

вкрапления, информация 107,
112, 114

гигантские 107

глубокие недра, ценность 105, 106

заменители 95

и глубинный углеродный цикл
179, 180

металлические включения, выводы
109, 110

минеральные включения, изучение
113

научная привлекательность 105

образование в водных мантийных
флюидах 163

образование при соединении
атомов углерода 49, 50, 106

определение возраста и глубины
образования 112, 113

примеси, научная ценность 107

редкие включения 95

твёрдость 225

тип I и тип II 108

характерные особенности 114

эксперименты с высоким
давлением в NBS 96–98

Алмазы типа I

атомы азота 108

мантийные минералы 112

Алмазы типа II

анализ (Смит) 109

включения металлов 109, 110

и гетерогенность мантии 111

образование 110

характерные особенности 108

Альфа-частицы 38, 41, 45, 309

Аминокислоты

адсорбция 282

в живых клетках 277

виды 235

синтез, эксперименты 270, 271,
276

создающие белки 235, 278

Аморфный карбонат кальция (АКК)
330

Анализ алмазов типа II, открытия и
выводы 108, 109, 111

- Антислучайность (Шоффенильс) 290
Антрацен 209
Аризонский университет 74, 76, 84, 85, 282
Атмосфера
 гадейская (катархейская) 144–149
 углекислый газ 140, 187
 углерод-14, образование 341
 углерод 140
 углеродные виды топлива, воздействие 186
 эволюция первичной 137, 140–144
Атомные слои 221, 222
Аусубел, Джесси 15, 16, 18, 67, 68, 195, 196, 198, 199
- Б**
- Баварский геологический институт 122
База данных минералов RRUFF 75, 77
 страница «Минеральная эволюция» 77
Базы данных по минералам 75–77
Бакеланд, Лео 230, 231
Бакелит 231
Бакиболы 226, 227
Бассет, Уильям (Билл) 95, 99, 100, 102, 104
Бейлиит 72
Белки
 аминокислоты, строительные блоки 139, 215, 234, 260, 269, 276–278, 283, 286, 350, 352
 в пище 215, 238, 264, 351
 и болезни 235
 и прочность материалов 329
 молекулы жизни 295
 мутации, последствия 235
 образование 278
 полимерная сеть 238
 разрушение 308
 структура 234, 235
 управляющие клетками 266
Бензол 209
Бёрч, Фрэнсис 116–118
Биогенные карбонаты 157
Биоминерализация 329
 карбонатная 154, 330, 331
 образование АКК 330
Биомолекулы
 возникновение 269, 273, 276
 самокопирование 286, 288
 синтез 276
Биополимеры 215, 230
 белки 234, 235
Биосфера, глубинная 304–306
 и геосфера, коэволюция 302
 и геосфера, петли обратной связи 333
Болезнь Тея — Сакса 235
Большие данные в минералогии 73
Бранденбергер, Жак 231
Брусит
 адсорбция аминокислот 282
 адсорбция РНК 285
Буквенное обозначение звезд (Флеминг) 35
Бумага, деполимеризация 240
Бутан 208, 211, 214
- В**
- Ван Волкенбург, Элвин 96, 98
«Ваша внутренняя рыба» (Шубин) 337
Великое кислородное событие 315, 316
Велш, Билл 70
Велшит 70
Вернер, Абраам Готлоб 272
Взаимодействия минералов и микробов, поддержание жизни 301
Витамины 209
Включения оксидов 113
Включения эклогита, значение 114
Внутреннее ядро 120

- Вода
 как источник энергии для жизни 314, 315
 модель глубинной воды Земли 161–163
 полярность 159
 свойства при экстремальных условиях 159
Вода в мантии 160
Вода и тепло, спор о геологической роли 58, 60–64
Водород
 выгорание 39
 образование 29
 слипание 43
 формирование молекул жизни 259
Вонезит, натриевая слюда 89
Вселенная, расширение 28
Вулканизация 229
Вулканические выбросы
 алмазы 179, 180
 изотопы углерода 176
 погруженный при субдукции углерод 176
 проблема глубины образования карбонатов, решение 176
Вулканические гидротермальные источники «черных курильщиков» 273
Вулканический углерод 151, 170, 174, 176, 178
 выброс сернистого газа (SO_2), измерение 172
 выброс углекислого газа (CO_2), измерение 170, 171
Вулканологи, гибель 173
Вулкан Сент-Хеленс, США 173–175
Вулкан Ундзэн, Япония 173
Вулканы островных дуг 175, 181
 выбросы CO_2 , изучение 175
Г
Гадейская (катархейская)
 атмосфера, подсказки 144–146, 148, 149
Гадейский эон (катархей) 144
Галапагосские острова 305
Галерас, вулкан 173
Галли, Джулия 160, 161
Гарвардская спектральная классификация 36, 37
Гарвардские вычислители 36
Гарвардский университет 32
Гейм, Андрей (Нобелевская премия) 222
Гелий
 выгорание 40, 44
 образование 29, 30
 образование в звездах 40, 41
 преобразование в углерод 40, 41
Гелит 72
Геммологический институт Америки (GIA) 109
Генетические болезни 235
Геология утесов Сиккар-Пойнт, объяснение 60
Геосфера и биосфера
 коэволюция 302
 петли обратной связи 333
Геохимия 147
 и гадейская (катархейская) атмосфера 146–148
 переход к биохимии 289, 291
 теория древней атмосферы 197
Герероит 70
Геттон, Джеймс 59–62, 272
Гидроксильные группы (OH^-), соединение с атомами углерода 217
Гидротермальные зоны на других планетах 274
Гипотеза Геи 320
Гипотеза гидротермального происхождения жизни 273, 274
Гипотеза глиняного мира 267
Гипотеза мира РНК 284
Глаукосферит 72
Гликен, Генри 173

Глинистые минералы
 связывание богатых углеродом молекул 339
 формирование в виде плоских чешуек 339
 Глобальное потепление 186–190
 Глубинная биосфера 303
 концентрация микробов 305, 306
 Глубинная зомби-сфера 305
 Глубинная подповерхностная жизнь 302–309
 Глубинный углерод
 исследование 63, 96
 цикл 64, 136, 143, 153, 155, 157, 158, 161, 162, 164, 169, 178, 179, 333
 Глютен 238, 239
 Гранат 113, 115
 Графен
 использование в наноразмерных устройствах 222
 наноинженерия, применение 222, 225
 плоские листы 224, 225
 прочность 224, 226
 слои 222, 223, 226, 227
 теплопроводность 223
 Графит
 атомные слои 221
 образование и структура 51
 Грибы, обитающие в древесине 338
 Группы CO_4 (тетраэдры) 102

Д

Дав, Патриция 328–330
 Даниэль, Изабель 160, 161, 163
 Дарвин, Чарльз 279, 305
 атрибуты жизни 295, 296
 парадигма эволюции и симбиогенез 319
 теплый маленький пруд 279
 Даунс, Роберт 74–77, 81, 282
 Двигатели жизни (Фальковски) 312
 Двухэтапный фотосинтез 313–315

Дегазация глубинного углерода Земли (DECADE) 171
 Дейтерий 29, 30, 165, 270
 образование 29
 Деполимеризация (ослабление)
 бумаги 240, 241
 нейлона 237
 под воздействием тепла (при готовке) 239
 Джин-сосульки 98
 Джойнер, Фред 218
 Джонстон, Дэвид 173
 Диэлектрическая постоянная
 глубинной воды, вычисление
 квантово-механическая модель (Галли) 160
 экспериментальная проверка (Даниэль) 161
 Добиологическая химия
 в глубинных гидротермальных зонах 275
 вклад газов 270
 эксперименты 277, 278, 285
 Добиологические молекулы 277, 278
 Доломит, структуры высокого давления 103
 Доломит-II, конфигурация 3+1 104
 Драгоценные камни
 синтетические 106
 условия для роста 106
 Дрейпер, Генри 34
 Дрейпер, Мэри 34
 Дэшлер, Тед 336, 337

Е

Европейский центр синхротронного излучения 104

Ж

Железо-56, роль в смерти звезд 45
 Женщины в астрономии XIX в. 32, 34, 37, 38
 гарвардские вычислители 35

Жизнь

- главный элемент, требования 258
- глубинная 304
- землецентричность 255
- земная таксономия 255
- как химическая система 256–263
- кислород, роль 333
- компоненты 247
- многоножки 334
- на других планетах 290, 291
- на суше, появление 333–338
- озон, роль 334
- переход из моря на сушу 336, 337
- подповерхностная 302–309
- позвоночные 335
- температурные ограничения 308
- формы, компьютерные 256

З**Закон Бёрча 116****Звездное выключение, последствия 45****Звездные спектры 33, 34**

- взаимосвязи с химическим составом 38

Звезды, богатые углеродом, формирование 43, 44**Зеленые серобактерии 312, 313****Землеподобные планеты**

- минералогия, сходство 123–125
- определение параметров 127, 128
- открытие 126, 127
- химический состав 127

Землецентричность жизни, определение 255**Земля**

- внутреннее ядро, элементы 120–122
- гадейская (катархейская) атмосфера, подсказки 144–149
- запасы углерода, источники 137–139
- как электрическая цепь 300, 302

минералогия 123–125**минералы мантии 94****недра, описание 117, 118****открытие неизведанной, препятствия 199****первичная атмосфера, эволюция 137, 140, 141, 143, 270****преобразование 134****стратегия потребления энергии 302****структура 135****сферические зоны 135****эволюция 134, 135, 294–297****экология минералов 72, 81–83, 85–89****Земная таксономия 255****Зеркальная симметрия, аминокислоты 277****Знания, препятствия к получению 196–198****Зоны субдукции 114, 154****изъятие углерода 176, 180****погружение океанического дна 333****И****Извержения вулканов****и углерод 177, 178****отношение CO_2 к сере 178****прогнозирование 174****эманации CO_2 151****Известняк****земной коры 176****использование 56–58****состав 64****Известь, получение и использование 57****Изменение климата****влияние на Зимние Олимпийские игры 188****влияние на экосистемы 189****глобальное потепление 186, 187, 189, 190****и человеческая деятельность 186****критические точки 189, 190**

- последствия 187–190
- решения 190, 191, 193
- роль офиолитов 193
- роль углерода 185, 186
- Изобутан 208
- Изомеры 208
- Иидзима, Сумио 225
- Импактные минералы 53
- Инертные газы 205
- Иокко, Фабио 30
- Ионизации, теория 39
- Ионы 205
- Ископаемые виды топлива 207–211
- К**
- Калифорнийский технологический институт 42
- Кальцит 64, 65
 - формы высокого давления 95, 99, 103
- Кальцит-II 99, 104
- Кальцит-III 99
- Каменноугольный период 338
- Карбид кремния 94
- Карбидные соединения, в мантии 94
- Карбонат кальция
 - аморфный (АКК) 330
 - формы высокого давления 100
- Карбонат магния, структура
 - пироксена 102
- Карбонатные минералы 90
 - запасы Земли 55
 - образование 154, 157
 - распад 158
- Карбонатообразующий планктон 156, 182
- Карбонат урана 92
- Карбонаты (CO_3)
 - аморфный (АКК) 330
 - биогенные 157
 - биоминерализация 154, 155, 329–331
 - группа 55
 - минералы, растворение 162
 - проблема глубины происхождения, решение 176
 - раковины 154, 155
 - треугольники 101
 - формы высокого давления 100
- Карозерс, Уоллес 231, 232
- Каталог Генри Дрейпера 34
- Катастрофисты 272
- Каучуковый полимер 228, 230
- Квантово-механические модели
 - кристаллических структур 101
- Квантовые скачки (электроны) 33
- Кварки, возникновение 28
- Келемен, Питер 181, 191–194
- Кембрийский взрыв 331
- Кернс-Смит, Грэм 267
- Килоновая 46
- Кимберлиты 111
- Кислородный фотосинтез 314, 316
 - кристаллы, как следствие 316
- Кладноит 72
- Клетки
 - консорциумы 317, 318, 326
 - мембраны, появление 278
 - создание минералов 328, 330, 332
 - эволюция 317, 326, 327
 - энергетический поток 287
- Клеящие вещества 217
- Кокколитофорида 332
- Кокколиты 332, 339
- Кометы, источник жизни на Земле 254
- Конечная функция распределения
 - Ципфа — Мандельброта (кЦМ) 85
- Консорциумы, образование
 - многоклеточных 317, 326
- Конфигурация 3+1 доломита-II 104
- Космическая жизнь 255, 256
- Космические преобразования 289, 290
- Космический путь, атомы углерода 349–351

Крафт, Катя 173
Крафт, Морис 173
Кривые накопления, выведение
(получение) 88
Кристаллические структуры,
выдерживающие давление
100 000 атм 101–103, 105
квантово-механическая модель и
результаты 101, 102
Кристаллография высокого давления
95, 102
Кристаллы, рентгеноструктурный
анализ при высоком давлении
98, 99, 103
Критические точки, глобальное
потепление 190
Критические точки, изменение
климата 189, 190
Кувер-мл., Гарри 218
Кэннон, Энни Джамп 35, 36, 37

Л

Лавуазье, Антуан 61
Леви-Стросс, Клод 271
Левосторонние аминокислоты 277
Леосилардит 92
Лептоны, возникновение 28
Леса, как резервуары углерода 337
Либби, Уиллард 342, 344
Ли, Джи (Джеки) 121
Литий-7, образование 29
Люди, эволюционная роль 354–357

М

Мантийные минералы, в древних
алмазах 114, 115
Манчестерский университет 222
Маргулис, Линн 319–321
Марклит 92
Марс, как источник жизни 253
Масенте, Дрю 323–325
Массивные звезды, смерть 43, 45–47
Материалы, прочность 224

Международная минералогическая
ассоциация (ММА) 75, 91
проверка заявок на новые виды
минералов 75
Мейер, Майкл 322–325
Мерлини, Марко 103–105
Меррилл, Лео 95, 99, 104
Металл, определение астрофизиков
31
Метан (CH_4) 141, 147
механизмы высвобождения 169
молекулы, дважды замещенные
165
молекулы, разделение 168
образование 48
обратная связь 176, 189, 190
роль в изменении климата 185,
186, 190, 195
Метан (CH_4), происхождение
глубинное абиотическое
против поверхностного
биотического, споры 164
определение количеств 165
открытия модели DEW 164
Метеориты и гадейская
(катархейская) атмосфера
148
Миддлбекит 92
Микробная биосфера, изучение 302,
305–307
Микробы
бурение с целью найти глубинных
303, 304, 308
выживание при высоких
температурах 308
выживание при высоком давлении
306, 307
источники энергии 300, 308–316
консорциумы 317, 318, 326
концентрация 305, 306
метаболическая деятельность 304
потребляющие минералы 298,
300–302
Миллера — Юри 273, 274, 278

- аппарат 271, 278
 модель 274
 ортодоксия 273
 Миллер, Стэнли 270–272, 274, 279
 Минералогия
 большие данные 73, 75–81, 87, 89
 Земли 123–125
 расплавленного ядра 116, 117
 Минералогия углерода
 появление на Земле 53, 56
 широта охвата 64, 66
 Минералы
 виды, ранжирование 123, 124
 включения в более молодых
 алмазах 113
 земные 64–66, 69, 70, 72, 73
 и биологическая эволюция 316
 и слова, сравнение распределения
 83–85
 определение возраста 112
 предсказание неизвестных 87–90
 раковины, появление 328–331
 роль в создании жизни 280–283
 содержащие углерод, редкость 66,
 69–73
 Минералы земной коры
 карбонаты 55, 103
 силикаты 102
 Минералы, распределение на Земле
 83
 пока неизвестные 86
 понимание 82
 соответствие кЦМ и ООГП 85
 формулы 84, 85
 Минералы углерода
 использование 55
 каталогизация 56
 многообразие 51, 53, 54
 формы высокого давления 95
 Митохондрии 255, 318, 319
 Многоклеточные организмы
 образование и проблемы 326, 327
 эдиакарский период 321, 322,
 324–326
 Многоножки, первые 334
 Модель глубинной воды Земли
 (DEW) 161, 162, 164
 Модель недр Земли (по Бёрчу) 117,
 118, 120
 предсказание легкого элемента
 118, 120
 примечание 118
 Молекулы $^{12}\text{CH}_2\text{D}_2$, измерение
 165–167
 Молекулы $^{13}\text{CH}_3\text{D}$, измерение
 165–168
 Молекулы аспарагиновой кислоты
 283, 352
 Молекулы глюкозы, соединение 314
 Молекулы ДНК 209
 информация 284
 митохондрия 318
 органеллы 318, 319
 структурные единицы 260
 Молекулы РНК 209
 изучение 285, 288
 информация 284
 саморепликация 284, 288
 структурные единицы 260
 Молекулы, самоорганизация 286
 Молекулярные устройства, машины
 223, 227
 Моно, Жак (Нобелевская премия)
 290
 Мономеры 228, 230, 233
 Муассанит 94
 Музыкальные инструменты и углерод
 242, 243
 Мэннинг, Крэг 181
- ## Н
- Наноразмерные формы 222,
 225–227
 Нафталин 209
 Национальное бюро стандартов
 США (NBS), эксперименты
 с алмазами при высоком
 давлении 96–98

- Нейлон 232, 237
Нейтронные звезды, образование 46
Нейтроны, образование 28
Неопрен 231
Нептунисты 58, 62, 272
Новоселов, Константин
 (Нобелевская премия) 222
Нуклеосинтез 40
Нуклеосинтез Большого взрыва
 (НБВ) 28–32
- О**
- Обсерватория Гарвардского колледжа 34
Обсерватория глубинного углерода (DCO) 42, 68, 81, 89, 98, 159, 160, 162, 164, 165, 167–169, 171, 172, 181, 302, 304
 основание 159
Обсерватория Земли Ламонт — Дозрты 157, 191
Общая обратная функция распределения Гаусса — Пуассона (ООГП) 85
Одноклеточные, консорциумы 317
Озон 333
Октан 208
Оливин (хризолит) 115, 301
Оно, Сухей 167, 169
Органеллы 318, 319
Органические молекулы, источники 139
Основанные на углероде молекулы жизни 277
Открытие неизвестной Земли, препятствия 199
Офиолиты 192–194
- П**
- Палеобиологическая база данных, включение эдиакарских ископаемых (Мейер и Масенте) 323
«Панорама», масс-спектрометрия 167
Панспермия 42
 направленная 250, 254
 посредством комет 254
Паризит 92
Парниковые газы
 роль в изменении климата 185
 роль в эволюции атмосферы 146
Паста ручной работы, отличающие факторы 238, 239
Пейн-Гапошкина, Сесилия Хелена 38, 39, 41
Пентан 208
Первобытное мышление (Леви-Стросс) 271
Первые звезды, появление 42
Перепись глубинной жизни 303, 306
Перидотит 115
Петли обратной связи 297, 333
Печать 3D, устройств из графена 223
Пикеринг, Эдуард Чарльз 34, 36
Пирокластические потоки 177
Пироксен 53, 113, 260
 структура, у карбоната магния 102
Планетезимали 52, 53, 134
Планеты
 гидротермальные зоны 274
 образование 52, 53
Планк, Терри 157, 158, 181
Планктон, карбонатообразующий 156, 157
Пластики, пластмасса 229, 236, 237
Плутонисты 58
Поверхности, добиологические молекулы на них 277
Полимеризация (упрочнение) 231, 233, 234
Полимер ПВХ 214
Полимер ПЭТФ 214
Полимеры 228–231
Полициклические углеводороды 209
Правило «ноль, один, много» 291
Правосторонние аминокислоты 277

- Преобразование графита в алмаз 102
Прешер, Клеменс 122
Природные газы, происхождение 42, 48
Проблемы изучения углерода 200
Продукты химии углерода 203, 204, 207–209, 211
Проект бурения в Омане, открытия 192, 194
Происхождение жизни
 гидротермальная гипотеза 273
 дебаты 272–275
 и эксперименты 291–293
 как последовательность химических реакций 292
 минералы, роль 280, 282
 ортодоксия Миллера — Юри 273
 основные допущения 257
 от геохимического окружения 285, 289
 пять главных вопросов 249–251, 253–257
 сценарии 267, 268
 шаги к проведению исследований 268–270, 273, 275–278, 280, 281, 283–286, 288, 289
Пропан 208, 213, 214
Противоборство миллеристов и вентистов 275
Противоборство нептунистов и плутонистов 58, 61, 62
 по поводу структуры земной коры 272
 решение проблемы 60–64, 194
Протоны, возникновение 28
Протопланеты 53
Процесс «фотосистема I» 312, 314
Процесс «фотосистема II» 313, 314
Прочность материалов 224
Пурпурная бактерия 313
- Р**
- Радиоуглеродный анализ, метод датирования 341–344
Раковины, появление 328–331
Ральф, Джолион 78–81
Раппапорт, Фил 237
Распад рения-187, определение возраста минералов 112
Распределение Большого числа редких событий (БЧРС) кривые накопления, выведение (получение) 87
 применение 84
 прогнозирование неизвестных минералов 86–88
Р-волны 120
Революционные полевые исследования Джеймса Геттона 59
Редкие минералы
 виды 66, 92
 научная ценность изучения 73
 причины редкости 70
 условия местонахождения 72
 характерные особенности 71
Резонанс 41
Ректификационные колонны 213, 214
Рентгеноструктурный анализ 98, 99, 102, 103
Решение несоответствия распространённости углерода 41
Рибосомы 255
Риджуэлл, Энди 156
Рифы, влияние на кислотность морской воды 156, 157
Ричардсон, Стивен 113
Род-Айлендский университет 303
Рыбы и амфибии, недостающее звено 335–337
- С**
- Свартцит 72
Сверженски, Димитри 160–163, 282
Сверхновые 43, 46, 47
 химические элементы, появившиеся при взрыве 47

Связи углерод-углерод 211
и сила графена 224, 225
Северо-Западный университет
Пердью 85
Сейсмические волны 120, 135, 197
Сера
бактерии 312
включения в алмазах типа II 110
Силикатные минералы 102
включения 109, 113
Симбиогенез 319
Симбиоз против мутации 319, 321
Синильная кислота (HCN),
образование 49
Синтетические аналоги
углеродосодержащих
минералов 55
Скотт, Дэниел 188
Скотт, Мэттью 82
Сложные системы, эволюция 125
Случайность и необходимость
(Моно) 290
Случайность против неизбежности,
относительные роли 125
Смена фауны 325
Солнце
будущее 44
и гадейская (катархейская)
атмосфера 145, 146
как источник энергии для жизни
298, 310, 311, 313–316
Соотношение углерод-12/углерод-13
119, 342
Состояние Хойла 42
Спектральные линии
информация 37
эффект ионизации 39
Спектроскопия
абсорбционная нейтринная 198
квантово-каскадная лазерная 168
лазерная 168
«Панорама», эксперимент 167
Сравнение распределений, минералы
и слова 83, 84

Среднемезозойская революция 156
Стекланные фотопластинки 33, 34,
38
Столкновение Тейи и Земли,
последствия 142, 251
Строматолиты 251, 317, 328
Стэнфордский университет,
лаборатория Bio-X 82
Субдукция базальта 114
Субдукция углерода 158, 176, 182
Сульфидные включения 112
Суперклеи 218
Сценарий «нефть в воде» 277

Т

Теория Земли (Геттон) 61
основания и испытание 62
процессы, отстаиваемые
нептунистами и
плутонистами, совмещение
62
Теплый маленький пруд (Дарвин)
279
Тетраэдры, группы (CO_4) 102
Тиннункулит 92
Точки бифуркации 198
Треугольники CO_3 (карбонатные)
101
превращение в пирамиды CO_4 104
Тройной альфа-процесс 41
Тройные связи в углероде 265, 266
Туманности 49
Туманность Конская Голова,
открытие 35
Тяжелые ядра, образование 45

У

Уайтинг, Сара Фрэнсис 35
Угарный газ (CO) 141
молекулы, образование 49
Углеводороды
абиотическое происхождение 164
виды топлива 207–209, 213, 214

- в условиях недр Земли 163
- длинноцепочечные молекулы 265
- за пределами Земли 210
- и кислород, реакции 210
- как источник тепла 211
- метеоритное происхождение 139
- молекулы, разнообразие 208
- полициклические 209
- похожие на нефть 179
- продукты 208, 209
- скользкие молекулы 219
- способность к образованию связей 211
- структура 207–209
- Углекислый газ (CO_2)
 - абиотические химические реакции 154
 - в атмосфере Земли 140
 - выделение вулканами 150, 151
 - молекулы, образование 49
 - офиолиты, поглощающие 193
 - преобразование углерода, последствия 148
 - роль в изменении климата 185, 195
 - рост концентрации в атмосфере, последствия 187
 - рост концентрации в океанах, последствия 187
 - точечный источник (вулкан Этна) 170
- Углерод
 - аспект, объединяющий сущности 356, 357
 - атомы, конденсация 106
 - атомы, космический путь 349–351
 - атомы, местоположение 31
 - включения в алмазах типа II 110
 - в космосе 141
 - в музыкальных инструментах 242, 243
 - возникновение при НБВ 29–31
 - в равновесии 180, 182, 183
 - вулканический 151, 171, 172, 176, 178
 - в ядре Земли 115, 118–120
 - глубинный (высокого давления) 95
 - горючий 207–209, 211
 - двойные связи 265
 - звездный 32, 38, 40, 41
 - и жизнь 109, 263–266
 - и изменение климата 185, 186, 343
 - и смерть 351–353
 - и электроны 206, 264
 - кольца 209
 - минералогия 123
 - молекулы 263–266
 - нанотрубки 225, 226
 - несоответствие
 - распространенности, решение проблемы 42
 - образование, роль звезд 37–39, 43–45, 47
 - основа для жизни 257, 263–266
 - основной элемент жизни 258, 300
 - отпечаток людей, изменения 184, 185, 187
 - перемещение 129, 133
 - переходы 101
 - погруженный при субдукции 181, 182
 - слои, отделение по одному 222
 - соединение атомов 48–50, 206, 207
 - соединение с гелием в звездах 43
 - солнечный 44
 - спектр 33
 - субдукция 157, 158, 176, 182
 - тройной альфа-процесс 41, 254
 - тройные связи 232, 265
 - удерживание, накопление 153–157, 180
 - химия 48, 50, 217, 219
 - часы 340–342
 - чешуйки, пластинки, листы, слои 51, 221, 222, 225
- Углерод-12
 - образование 30, 41
 - синтез в звездах 45

Углерод-14 341–346
Углеродизация космоса 43, 44, 47
Углеродные виды топлива, открытие 184
Углеродные слои
 единичные атомарные, применение 222
 образование графита 221
 плоские 51
 свертывание 225
 структура 221
Углеродный цикл
 баланс углеродного цикла Земли 180, 181, 183
 в Земле 151–153
 глобальный 133, 138, 153, 180
 глубинный 63, 136, 144, 332
 диаграмма глубинного 181
 и алмазы 179, 180
 механизм 151–153
 начало 137–141, 144, 146, 148
 подповерхностный 154, 155
 понимание сложного 91
 скорость оборота 152
Углеродсодержащие минералы, редкость 65, 66, 69–72
Углеродсодержащие соединения
 клей 217
 свойства 215–220
 сухой лед 140, 215, 216
 туман на сцене 216
Углеродсодержащие химические вещества 212
Уголь, образование 338
Уиджимулталит 66
Университет Джорджа Мейсона, демонстрация полимеризации 233
Университет Райса 226
Университет Сассекса 226
Униформисты 272
Уплотнение (застывание) 28
Уравнение состояния Бёрча — Мурнагана 116

Ф

Фальковски, Пол 298–300, 312
Фингерит 71
Фингер, Ларри 71
Флеминг, Вильямина 34–36
Форнаро, Тереза 283–285
Фотосинтез 298, 311–313
Фуллерены, синтез 226

Х

Хазенит 71
Хаммер, Дэн 91, 92
Хатрурит 70
Химические связи и электроны 205, 206
Химические элементы и жизнь 258–263
Химические элементы, образование в процессе ядерного синтеза 40, 43, 44
 в результате события килоновая 47
 при взрыве звезды 45
 при НБВ 29–31
Химия углерода 48, 50, 215, 217, 218
Химия углерода клейких веществ 217, 218
Химия углерода скользких веществ 219
Хистад, Грета 84–87, 123–125
Хлоропласты 318, 319
Хойл, сэр Фред 40–42, 254
Холл, Джеймс
 и известняковое противоречие 62, 63
 исследование глубинного углерода 63
 исследования высокого давления, начало 63
 эксперименты с ружейными стволами 63, 95
Холодные продукты химии углерода 215
Хондры 52, 134

Хрутфонтейнит 66

Хуангодойит 66

Ц

Целлофан 231

Целлюлоза 314

Цианоакрилат 218

цикл лимонной кислоты (цикл
Кребса) 287
обратный 287, 288

Ч

Человеческая жизнь, роль углерода
340, 341, 345

Черные дыры, образование 46

Чешуйчатые глинистые частицы 155

Чикагский университет 270, 336,
342

Ш

Шеллак, синтетический 230

Шири, Стивен 113

Шоффенильс, Эрнест 290

Штаудингер, Герман (Нобелевская
премия) 230

Штрихкод жизни 67

Шубин, Нил 336, 337

Шуп, Фред 239–241

Э

Эволюция жизни 256

компоненты 247

симбиоз против мутации 319, 321

Эдиакарский период

многоклеточные организмы,

появление 321, 323, 324

сетевая диаграмма фауны (Мейер и
Масенте) 325

стадии 324, 325

Эдмондс, Мари 174–176, 181

Экология минералов, земная 72, 81,
85, 89

Эксперименты с высоким давлением
95–100, 102–105

Эксперименты с ультравысоким
давлением 104, 105

Электроны

и химические связи 204–207

контроль 264

магические числа 205, 206

неоднозначность, у углерода 206

Эстрада, Шарлин 281–285

Этан 207, 210, 213

Эукариоты 318, 319, 321, 326

Ю

Юингит 92

Юри, Гарольд (Нобелевская премия)
270, 271

Я

Ядерный синтез, в звездах 39, 40

Ядра атомов, образование
стабильных 28

Янг, Эдвард 166, 167

Ячейка Меррилла — Бассета 99, 102

Ячейка с алмазными наковальнями
38, 97, 121, 161, 307

А

American Mineralogist 75

В

Bio-X лаборатория (Стэнфорд) 82

С

The Canadian Mineralogist 75

Carbon Mineral Challenge, программа
89, 90, 92

Д

DECADE (Дегазация глубинного
углерода Земли) 171, 178

DuPont 231

Предметно-именной указатель

Е

Earth and Planetary Science Letters
(Хистад) 125
Eastman Kodak 218

Г

Goodrich, компания 218

М

Mindat.org, база данных
местонахождения минералов
78, 81, 82, 88
дополнение к RRUFF 78

Н

NOVAC (Сеть наблюдения
за вулканическими и
атмосферными изменениями)
171

Р

Pneumodesmus newmani
(многоножки) 334

Р

Review of Scientific Instruments
(Меррилл и Бассет) 99

С

S-волны 121

Т

Tiktaalik roseae, переходная форма
335–337

Хейзен Роберт

СИМФОНИЯ № 6

Углерод и эволюция почти всего

Издатель *П. Подкосов*

Руководитель проекта *И. Серёгина*

Корректоры *О. Петрова, С. Чупахина*

Компьютерная верстка *А. Фоминов*

Дизайн обложки *Ю. Буга*

Фото на обложке Shutterstock

Фото автора на обложке Michelle Scholtes

Подписано в печать 17.09.2020. Формат 60×90/16.

Бумага офсетная № 1. Печать офсетная.

Объем 25,5 печ. л., вкл. 0,5 печ. л. Тираж 3000 экз. Заказ №

ООО «Альпина нон-фикшн»

123007, г. Москва, ул. 4-я Магистральная, д. 5,
строение 1, офис 13

Тел. +7 (495) 980-5354

www.nonfiction.ru

Отпечатано с готовых файлов заказчика

в АО «Первая Образцовая типография»,

филиал «УЛЬЯНОВСКИЙ ДОМ ПЕЧАТИ»

432980, Россия, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 14

Знак информационной продукции

(Федеральный закон № 436-ФЗ от 29.12.2010 г.)

