
КАРЕН ЛЛОЙД
ОБИТАТЕЛИ ЗЕМНЫХ ГЛУБИН
О САМЫХ СТРАННЫХ СУЩЕСТВАХ НА ПЛАНЕТЕ
CORPUS
ПРИГОТОВЬТЕСЬ ВОЙТИ В МИР ЖИВОЙ ПРИРОДЫ, ПРЕВОСХОДЯЩИЙ ВАШИ САМЫЕ СМЕЛЫЕ ФАНТАЗИИ.
РОБЕРТ ХЕЙЗЕН

# Обитатели земных глубин. О самых странных существах на планете

## Карен Ллойд

Аннотация
Карен Ллойд. Обитатели земных глубин. О самых странных существах на планете
Вступление
Обитатели земных глубин
Часть I. Какова жизнь внутри Земли и как мы об этом узнали?
Глава 1. Живет ли кто-то в земной коре?
Жизнь в странных местах
Пища снизу и сверху
Глава 2. Вгрызаемся в твердую землю
Отбор проб на глубине до тридцати метров
Отбор проб на километровой глубине
Жизнь в пузырьках газа из земных недр
Глава 3. Две ДНК-революции
Первая революция в исследованиях ДНК
Вторая революция в исследованиях ДНК
Результаты второй революции в исследованиях ДНК
Часть II. Как обитатели земных глубин меняют

наше понимание жизни на планете?
Глава 4. Люди и другие растения
Новая ветвь на древе жизни
Мы неправильно представляли себе древо жизни
Глава 5. Как выжить в вулкане?
Спускаемся в активный вулкан
Как выжить в кислоте под взрывами
Жизнь в отбеливателе
Еще больше гадостей
Глава 6. Дышим минералами
Пика, Чили, 2022 год
Как жизнь добывает энергию, пользуясь термодинамикой?
Расширяем границы дыхания
Скорость тоже важна
Правила жизни
Глава 7. Жизнь на грани возможного
Шпицберген, Норвегия, 79° северной широты, 2016 год
Термодинамическое оружие
Дыхание наоборот
Активизация жизни в условиях скудного энергетического запаса
Часть III. Как обитатели земных недр влияют на наше понимание самих себя?

Глава 8. Бессмертные микробы
Бог-Саунд, округ Картерет, Северная Каролина, лето 1987 года
Доказательства сверхмедленного роста
И у обитателей земных недр бывает лето
Хронофилы
Глава 9. Переосмысливаем свое происхождение
Ныряем к истокам жизни
Загадка происхождения эукариот
Глава 10. Равновесие – это смерть
Когда возникла жизнь?
Хронофилы и второе начало термодинамики
Глава 11. Что обитатели земных недр могут сделать для нас?
Ню-Олесунн, Шпицберген, 79° северной широты
Глубоководная добыча
заключение. Наше (возможное) будущее
Командная работа и воплощение мечты
Благодарности
Список литературы
Вступление
Глава 1. Живет ли кто-то в земной коре?
Глава 2. Вгрызаемся в твердую землю
Глава 3. Две ДНК-революции
Глава 4. Люди и другие растения

Глава 5. Как выжить в вулкане?
Глава 6. Дышим минералами
Глава 7. Жизнь на грани возможного
Глава 8. Бессмертные микробы
Глава 9. Переосмысливаем свое происхождение
Глава 10. Равновесие – это смерть
Глава 11. Что обитатели земных недр могут сделать для нас?
Заключение. Наше (возможное) будущее

## Аннотация

Жизнь процветает в самых экстремальных местах па планете, от метановых источников па дне океана до арктической вечной мерзлоты, и там опа не похожа пи на что нам знакомое. В своей книге “Обитатели земных глубин” биогеохимик и микробиолог Карей Ллойд рассказывает о поисках жизни под поверхностью Земли и о том, как новые открытия бросают вызов нашим представлениям об эволюционных связях и природе жизни вообще. Обнаруженные в последние десятилетия подземные организмы демонстрируют, как жизнь существует в условиях кипящей воды, чистой кислоты, отбеливателя. Обитатели земных глубин раздвигают границы того что мы считали возможным: живые существа способны дышать горными породами и жить сотни тысяч лет, а то и дольше.

В формате PDF A4 сохранен издательский макет книги.

# Карен Ллойд
# Обитатели земных глубин. О самых странных существах на планете

Karen Lloyd
«Intraterrestrials: Discovering the Strangest Life on Earth»

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from the Publisher

*Перевод с английского* Татьяны Мосоловой



Copyright © 2025 by Karen G. Lloyd
© Т. Мосолова, перевод на русский язык, 2026
© А. Бондаренко, художественное оформление, макет, 2026
© ООО “Издательство Аст”, 2026
Издательство CORPUS ®

# Вступление

Пробуждаясь ото сна утром того дня, который *мог* стать днем моего первого глубоководного погружения, я стала молиться, не обращаясь ни к кому конкретно: “Пожалуйста, пусть ноги не бьются о матрас!” Иначе это означало бы, что море слишком бурное, чтобы спустить погружной аппарат с борта нашего исследовательского судна, на котором мы жили и работали в Мексиканском заливе в сотнях километров от берега уже три недели. И второй случай мог не представиться. Когда мозг постепенно начал осознавать происходящее, я почувствовала запах бекона из камбуза, услышала звук работающего кондиционера и, к счастью, ощутила, что моя койка совершенно неподвижна, словно я на суше. Вода за бортом была гладкой как стекло. Идеальные условия.

Я спрыгнула с койки и стала собирать вещи для погружения. Когда речь идет о погружении под воду, моду диктуют инженерия и океанография. На дне океана всегда холодно, вне зависимости от того, в какой точке планеты вы находитесь, и наш

батискаф “Джонсон-Си-Линк II” не предохранит меня от замерзания. Подводники на носу батискафа находятся в изумительной прозрачной камере из плексигласа, которая защищает их от холода и открывает великолепный полусферический вид на океан, но в этом уютном местечке помещаются лишь один ученый и один пилот. Я была исследователем более низкого ранга (аспиранткой) и не имела возможности путешествовать в таких роскошных условиях. Мое место было в “гробу” в задней части батискафа. “Гроб” — это прямоугольный ящик, где бок о бок лежат второй ученый (в данном случае эта роль отводилась мне) и второй пилот, и у них так мало места, что они не могут даже сесть. С теми, кто находится на носу в сферической камере из плексигласа, общение происходит через наушники с микрофоном, а физически сфера и “гроб” отделены друг от друга. Поскольку “гроб” сделан из металла, мне предстояло оказаться в холоде океанских глубин безо всякой термоизоляции. А там могло быть смертельно (в буквальном смысле слова!) холодно. Первая версия “Си-Линка” оставалась на дне более суток, и два человека, находившиеся в задней части (одним из них был сын конструктора батискафа Эдварда Линка), погибли от переохла-

ждения и отравления углекислым газом. После той трагедии батискаф был усовершенствован ради повышения безопасности, так что теперь подобные события гораздо менее вероятны.

Вот поэтому я одевалась так, будто собиралась выходить на улицу зимой. Странно надевать шерстяной свитер, чтобы погрузиться в воду, — казалось бы, мокрый гидрокостюм лучше подходит для этой цели. Но использовать мокрый гидрокостюм в такой ситуации совершенно неразумно. Контакт с морской водой на глубине около километра под поверхностью океана возможен только в том случае, если в корпусе батискафа возникнет трещина. Но если это произойдет, я умру до того, как пойму, что случилось.

Одевшись соответствующим образом, я присоединилась к остальным членам экипажа погружного устройства, собравшимся на задней палубе корабля. Фрэнк (второй пилот) и я (второй ученый) забрались в "гроб" и закрылись в нем наглухо. Находясь в этом замкнутом пространстве, мы не могли ничем управлять, что-либо решать или отбирать образцы. Мы здесь лишь для того, чтобы наблюдать, советовать и, возможно, спасти чью-то жизнь: Фрэнк объяснил мне, что, если три других человека окажутся недееспособными, я в

соответствии с протоколом должна буду сбросить внешний балласт, так что погружное устройство выскочит на поверхность, как надувной мяч. Я внимательно наблюдала. Мне не хотелось стать аспиранткой, которая погубила своих спутников на дне океана, поскольку не смогла запомнить, на какие кнопки нажимать.

Спустя мгновение я почувствовала, как мощная лебедка в форме буквы А подняла нас с палубы корабля и бережно перенесла на поверхность воды, где погружной аппарат стал судорожно подпрыгивать. После окончательной проверки первый пилот отпустил воздушный балласт, и мы начали свободное погружение в океанские глубины. Фрэнк, с которым мы лежали валетом, сообщил, что будет спать, и пожелал мне приятного погружения. Я и подумать не могла о том, чтобы заснуть. Я нервничала.

Нужно понимать, что океан — не пустое пространство. Конечно, в нем плавают рыбы, киты и морские черепахи, но я имею в виду, что каждый *кубический сантиметр* океанской воды населен беспозвоночными животными и всякой другой скользкой плавучей мелочью. И когда вы погружаетесь на глубину, при контакте с батискафом вся эта мелочь излучает люминесцентный свет.

В “гробу” с каждого бока есть небольшое “отверстие”. С моей стороны оно находилось у меня между плечом и щекой, и через него был прекрасно виден мерцающий океан (я старалась не обращать внимания на усиливающуюся боль в шее). Мимо проносились искорки света, внезапно озарившие длинное сегментированное тело красными, синими и лиловыми вспышками. Я могла бы часами, не отрываясь, вглядываться во тьму океана, наслаждаясь этой красотой.

Вскоре первый пилот снизил скорость, так чтобы плавучесть стала нулевой и мы не ударились о дно. Наконец-то я попала в то место, которое изучала на протяжении шести лет, но сама никогда не видела. Здесь было пусто. Но почему-то это мне понравилось еще больше. Океаны покрывают две трети поверхности Земли, но морское дно по-прежнему остается малоизученным. Очень невелика вероятность, что кто-нибудь когда-нибудь доберется до точно того же места, где я оказалась в тот день. Я почувствовала момент истины.

Пока на носу совещались, как переместиться оттуда, где мы сели, туда, куда мы хотели попасть, я с удивлением обнаружила, что жизнь на морском дне гораздо активнее, чем я предполагала.

Я видела, что один глубоководный краб решил объявить нам войну: он угрожающе поднял крохотные клешни и замер, готовый разрушить наш батискаф. Мимо проплыла ярко-лиловая медуза, а по дну пронеслась скользкая длинная рыбина в поисках каких-нибудь беспозвоночных. Но больше всего мне нравились голотурии — морские огурцы. Туловище этих пассивных существ имеет форму полой трубочки длиной примерно в два банана, и они очень харизматичны. Целыми днями только и делают, что засасывают ил с одной стороны туловища и выбрасывают с другой. Они поглощают питательные компоненты из органических веществ в составе ила и выделяют чистейший морской песок.

Пока я наблюдала за этими подводными пылесосами, другие члены команды аккуратно вели наш батискаф по дну. В поисках пути на дне моря есть две главные трудности. Во-первых, поскольку океан топит спутниковые сигналы столь же эффективно, как людей, здесь не работает система GPS. Вместо этого мы создаем собственную систему координат X-Y с помощью акустических импульсов между погружным устройством и кораблем. По этим сигналам мы определяем глубину и угол по отношению к

кораблю, остальное вычисляется по теореме Пифагора. Во-вторых, свет от погружного устройства не способен победить океанскую тьму, так что у нас нет возможности обозревать все пространство. Подводные горы мы видим только тогда, когда на них наталкиваемся. Сонары помогают избежать катастрофы, но невозможно понять, что вы находитесь всего в нескольких метрах от того места, куда хотите попасть. С помощью своей системы координат мы прокладываем путь в сторону цели, но потом в поисках конкретной точки вынуждены тыкаться, как слепые котята.

В тот день мы искали источники холодного метана, где древний метан из земных недр просачивается на поверхность морского дна через трещины, образовавшиеся в результате движения тектонических плит или геологического обнажения. Мы привыкли считать, что метан — это природный газ, которым пользуются для обогрева домов, но на морском дне это манна небесная (точнее, “манна из преисподней”). Метан — энергетически богатая пища в пустынном пространстве, поэтому живые существа собираются вокруг таких источников, как антилопы — у водопоя в саванне. Здешние животные не питаются метаном, но они питаются поглощающими

метан микробами (крохотными одноклеточными организмами, к числу которых относятся бактерии). И хотя метан вы не видите (если только его не так много, что он выделяется в виде пузырьков), вы понимаете, что нашли его источник, поскольку здесь кишмя кишат разнообразные моллюски, мидии, крабы, креветки, рыбы, морские анемоны и странные скользкие черви.

Лежа в батискафе и вытянув шею, чтобы наблюдать, как за моим неудобным иллюминатором проплывает морское дно, я сначала увидела обломки раковин, а потом торчащих из ила целых живых мидий, плотно прилепленных друг к другу. По мидиям перебирались крабы, подъедая ниточки бактерий и беспозвоночных животных. Вскоре все дно, не покрытое мидиями, оказалось устлано ярким белым ковром бактерий *Beggiatoa*, превращающих вонючие сульфиды в жемчужины из чистой элементарной серы. Мы прибыли к метановому источнику! Батискаф остановился, и мы принялись за работу.

Накануне вечером я занималась тем, что приделывала металлические ручки в форме буквы Т к цилиндрическим пластиковым пробиркам для проб, чтобы их можно было присоединить к роботизированным зажимам в передней части

нашего погружного устройства. Чтобы пробирки не уплыли при погружении, мы поместили их в пластиковые контейнеры и привязали на носу батискафа резиновыми лентами. Роботизированная рука могла такую ленту разорвать — и извлечь пробирку. В науке кустарные работы такого рода нередки: если вы занимаетесь чем-то таким, чем занимаются немногие, вы не можете просто купить в магазине нужное готовое оборудование. С помощью роботизированной руки первый пилот вынимал пробирки, заполнял их черным илом и возвращал обратно в пластиковый контейнер.

Пока шла работа, я лежала в своем маленьком “гробике” и время от времени переговаривалась с первым ученым о том, где отбирать образцы. Примерно через восемь часов первый пилот сбросил балласт, и мы начали получасовое всплытие.

Причина, по которой я так стремилась совершить это опасное путешествие, а потом немедленно стала обдумывать возвращение, заключалась в том, что я хотела ответить на вопрос, мучивший меня долгое время: *не прячутся ли в недрах Земли какие-то странные существа, способные изменить наши представления о жизни как таковой?* Давайте займемся этим вопросом?

## Обитатели земных глубин

На протяжении всей моей научной карьеры я много времени уделяла изучению необычных микробов, живущих на дне океана, в вулканах и в арктической вечной мерзлоте, чтобы ответить на этот важный вопрос о скрытой жизни в недрах Земли. Благодаря моим усилиям и усилиям других ученых мы узнали, что жизнь существует даже на глубине нескольких километров под океанским дном — гораздо глубже, чем может опуститься подводное устройство. Вообще говоря, мы пока не смогли спуститься на такую глубину, где уже нет живых организмов. И почти все подземные формы жизни совершенно непохожи на те, что мы видим на поверхности: вопреки всем ожиданиям, земные недра оказались неплохой средой обитания для живых организмов, если только они не нуждаются в кислороде или многоклеточной организации. Нам повезло, и эти крохотные формы жизни могут приоткрыть завесу над самой большой загадкой — рассказать, как на нашей планете впервые зародилась жизнь, перевернуть наши фундаментальные представления о законах жизни и даже изменить

понимание того, что есть живой организм. А в качестве подарка способны предохранить нас от нами же спровоцированных разрушительных тенденций, помогая ослабить последствия климатических изменений.

Биогеохимик Карстен Педерсен придумал термин *intraterrestrials* для описания живых существ, в изобилии населяющих земную кору[1]. *Intra* означает "внутри", *terrestrials* — "земные", а все слово целиком описывает "внутриземных" существ — обитателей земных глубин. Мне нравится этот термин, поскольку он отражает и странную "неземную" природу этих ранее неизвестных форм жизни. Я вовсе не собираюсь преуменьшать важность обнаружения новых видов *животных*: новые виды обезьян чрезвычайно интересны. Но большинство категорий видимых существ, обитающих на поверхности Земли, уже в целом определены. А вот открытия, которые мы делаем внутри земной коры, сопоставимы с обнаружением *всех* животных вообще и даже во сто крат важнее в связи с их эволюционной новизной по сравнению с уже известными формами жизни. Эти открытия, начавшиеся в конце 1980-х годов и продолжающиеся до сих пор, все с большей очевидностью доказывают, что раньше мы не

знали о существовании важнейших ветвей на древе жизни[2].

Причина столь сильного отличия этих существ от уже изученных форм заключается в том, что мы как бы сосуществуем в разных мирах, хотя и населяем одну и ту же планету. Дэвид Валентайн, тоже биогеохимик, красочно описал "микробное чистилище в глубинах земной коры", где процветают эти одноклеточные организмы: "Ограниченные снизу негостеприимными температурными условиями земных недр, обитатели земных глубин живут в условиях хронического недостатка энергии из пищи, поскольку слишком сильно удалены от солнечного света"[3].

Как только мы заглядываем себе под ноги, в темные глубины земных недр и океана, перед нами возникает новый мир. И этот неизвестный мир заставляет задавать множество вопросов. Откуда эти существа получают энергию, не имея доступа к солнечному свету? Как они дышат без кислорода? И как долго они могут выживать в негостеприимных средах с такими значениями pH, как в чистой кислоте или в чистой щелочи? Ответы на эти вопросы (энергию они получают из химических реакций, дышат минералами, а жить могут тысячи или даже миллионы лет)

показывают, что устоявшиеся представления о возможностях жизни, основанные на нашем ограниченном опыте в тонкой прослойке атмосферы на поверхности Земли, часто не соответствуют действительности.

Наше приключение, в ходе которого мы изучим эти организмы, я разобью на три части. В первой части книги я расскажу, что представляет собой этот подземный мир, как мы извлекаем из него живых существ и как можем “увидеть” эти микроскопические организмы с помощью секвенирования ДНК. Во второй части я объясню, как обитатели земных недр изменили наши представления об эволюционных связях между всеми живыми существами на планете, как они умудряются процветать в невообразимых условиях и как используют законы термодинамики[1] совсем иначе, нежели обитатели поверхности Земли. В третьей части я выдвину предположение, как эти существа изменяют наше понимание закономерностей жизни в разных временных рамках, позволяют по-новому взглянуть на про-

**[1] Примечания: 1**

Определение из Википедии мне кажется достаточно полным: “Термодинамика — это раздел физики, который описывает тепло, работу и температуру и их связь с энергией, энтропией и физическими свойствами вещества и излучения”. — *Здесь и далее, если не указано иное, прим. автора.*

исхождение жизни и, если мы грамотно поведем себя, помогут справиться с изменениями климата. Наконец, я попытаюсь предсказать, какой будет наша жизнь через тысячу лет, возможно, на других планетах, основываясь на новом расширенном понимании, достигнутом благодаря изучению обитателей земных глубин.

Путешествие, которое мы совершим в этой книге, полезно не только в интеллектуальном плане. Я хотела не просто рассказать, что мы узнали об этих новых формах жизни, но и описать, *как* были сделаны наши открытия. Для сбора образцов и для проведения исследований я отправлялась за обитателями земных недр в самые дальние точки планеты и хочу взять вас с собой на пустынное горное плато в Аргентине, в замерзшую арктическую тундру архипелага Шпицберген, на дно кратера действующего вулкана в Коста-Рике, к илистым берегам Северной Каролины, на дно океана.

Для изучения таких микроорганизмов приходится выполнять длительные лабораторные исследования образцов и компьютерный анализ полученных данных. Но также ползать на животе среди пауков и экскрементов летучих мышей, носить маску, защищаясь от токсичных паров,

и неделями или месяцами жить в таких отдаленных местах, где проверяется на прочность человеческая физиология. Невероятные открытия, о которых я расскажу в этой книге, были бы невозможны без трудностей и побед полевых исследований. Так что натягивайте водолазный костюм и забирайтесь в “гроб”: мы отправляемся в путешествие в глубины Земли.

# Часть I
# Какова жизнь внутри Земли и как мы об этом узнали?

# Глава 1
# Живет ли кто-то в земной коре?

Логично предположить, что все существа, оказавшиеся внутри земной коры, вдали от солнечного света, отделенные от внешнего мира, будут обречены на гибель и исчезнут с лица земли. Мы так сильно зависим от солнца, что с трудом представляем себе жизнь на дне океана, не говоря уже о километровой глубине под поверхностью океанского дна. Но несмотря на удаленность, многие пространства нашей планеты действительно обитаемы, хотя находятся ниже доступных нам глубин и погребены под стометровыми слоями камней и отложений. Казалось бы, каждое несчастное маленькое существо, живущее в глубоком темном подземном пространстве, должно пытаться выбраться на поверхность в поисках животворящего солнечного света. Однако любой человек, который, как я, приближался к метановым источникам на дне океана, знает, что это совсем не так: там, в темноте, жизнь бьет ключом. В этой главе я расскажу, каким образом, вопреки нашим представлениям,

глубокие темные уголки Земли могут быть удобным местом для жизни.

## Жизнь в странных местах

“Хочется вылезти из грузовика и побегать вместе с ними?” — спросил меня геолог из Океанографического института Вудс-Хоула Питер Бэрри, заметив, что я прилипла к окну, пока мы, подпрыгивая, пробирались по пустынному и каменистому высокогорному аргентинскому плато. Единственными живыми существами, которых я видела, были викуньи — мелкие, похожие на лам животные, обитающие в Центральных Андах. Они бежали за нами на тоненьких ножках, пока мы пересекали плато между возвышавшимися башнями вулканов.

Я пробормотала “ага”, вяло размышляя, чем же викуньи тут питаются (за несколько дней я не увидела никакой растительности), как вдруг Питер резко остановил машину и одобрительно кивнул мне. Поняв намек, я выскочила из грузовика и понеслась рядом со стадом. Как и следовало ожидать, викуньи не оценили мою компанию и быстро исчезли из виду. Но я продолжала бежать. В тот знаменательный момент

в моем поле зрения были только камни, вулканические горы, корки соли и грузовики, на которых ехали мои коллеги. Только так я могла выразить свой восторг от пребывания в столь удивительном месте, даже если этому празднику предстояло продолжаться недолго: на высоте около четырех тысяч метров воздух настолько разреженный, что становится трудно дышать. Кроме того, я прибыла в Аргентину из Теннесси не для того, чтобы гоняться за викуньями. Я была здесь из-за вулканов.

Если у вас, как и у меня, нет поблизости какого-нибудь вулкана, возможно, вы думаете, что вулканы — это полые конусы с расплавленной лавой, которая время от времени извергается, уничтожая города, как это было в Помпеях. Иногда это действительно так, и вулканы проявляют свою агрессивность, испуская огненные пары или выплевывая лаву. Но большинство вулканов, по крайней мере во временных рамках человеческой жизни, выглядят спокойными, маскируясь под обычные нагромождения камней. Однако не поддавайтесь обману. Земля под этими каменными насыпями движется. И когда горячая магма поднимается к земной поверхности и приходит в контакт с водой, создаются условия для бур-

ных процессов. Магма нагревает воду, давление поднимается, и в конечном итоге вся система взрывается. Представьте, что вы ставите стеклянную бутылку кока-колы в горячую духовку: газ в бутылке расширяется под действием тепла, бутылка взрывается, и осколки разлетаются по всей кухне. Неподвижные скалы на остроконечных вулканических горах — это плотно завинченные крышки, и их может сорвать в любой момент.

Такие взрывоопасные насыпи камней — не самое подходящее место для жизни. Даже наиболее стойкие существа при соприкосновении с раскаленной лавой расплавятся, как пастила в микроволновке. Почему же мы с моими коллегами[2] из Южной Америки колесили по Аргентине в поисках жизни внутри вулканов? Никто не способен выжить в лаве или магме, но мы хотели понять, насколько близко жизнь может подойти к активному вулкану и сохраниться. Вулканы жестоки, но у их жестокости есть и обратная сторона: они выносят на поверхность питательные вещества из глубоких земных недр. Мы приехали

**[2] Примечания: 2**

Это исследование было частью продолжающегося международного проекта, над которым в 2019 году работали геолог Агостина Кьоди из Аргентины и Герхард Йессен из Чили. В последующие годы к работе подключились и другие люди.

в Аргентину, чтобы обнаружить формы жизни, заключенные глубоко под землей и способные существовать за счет этих питательных веществ.

Не буду мучить вас и сразу сообщу, что мы *действительно* нашли жизнь в аргентинских вулканах. Многочисленные формы жизни. Мы нашли миллионы и миллионы микробов — бактерий и архей, большинство из которых невидимы невооруженным глазом, причем многие из них ранее не были известны ученым. Возможно, вас удивляет, что вы ничего не слышали о нашем грандиозном открытии в новостных программах. Громкий заголовок "Ученые открыли новые формы жизни, подкармливаемые вулканами!" вполне соответствовал бы действительности. Отсутствие шумных восторгов объясняется тем, что открытия подобного масштаба стали теперь обычным делом. Мы не единственные, кто обнаружил подобных существ. Ежегодно буквально тысячи ученых выкапывают ранее неизвестных микробов. И такие микробы живут не только у вулканов. Повсюду на Земле (или *в* земле), где ученые ведут поиски, они находят новые формы микробной жизни.

В свете подобных открытий приходится признать, что мы на самом деле плохо представляем

себе, какой бывает жизнь на Земле. И в прямом, и в переносном смысле мы ковырнули только самую поверхность. Что же мы обнаружим, если копнем немного глубже?

Чтобы ответить на этот вопрос, нужно определить, на какой именно глубине под поверхностью Земли начинается биосфера. Пока на сей счет нет единого мнения, и поэтому я придерживаюсь широкого определения: подземная биосфера охватывает любые пространства под поверхностью суши или океанского дна, куда обычно не поступает солнечный свет, но где может существовать жизнь[3]. И под такое определение подпадают многие реальные пространства: от грязи у нас под ногами до подземных пещер и отложений на океанском дне толщиной в десятки километров. Это могут быть твердые с виду скалы, на самом деле имеющие пористую структуру с мелкими полостями и трещинами, по которым просачивается вода, позволяя развиваться живым организмам; пещеры и шахты,

**[3] Примечания: 3**

Основное ограничение для существования живых клеток под землей — высокая температура, поскольку выше 120 градусов по Цельсию разрушаются биологические молекулы, из которых построена клетка. Температура растет по мере приближения к магме и в среднем доходит до значений, превышающих 120 градусов, на глубине 3,5–5 километров от поверхности. Ниже не может быть жизни в том виде, в каком мы ее знаем. — *Прим. науч. ред.*

через которые кислород с поверхности поступает к химическим соединениям в земных глубинах; глубоко залегающие базальтовые породы и геотермальные источники; ил и отложения, накопившиеся за миллионы лет. Часть подземной биосферы заморожена во льдах и вечной мерзлоте, где микробы остаются живыми в крохотных солевых протоках, не замерзающих при температуре ниже точки замерзания чистой воды.

И все эти разнообразные среды роднит общее свойство: в них есть жизнь. Как бы глубоко мы ни бурили земную кору, мы пока не достигли такого слоя, где нет жизни. Земля имеет гигантское внутреннее ядро, еще более обширную мантию, которая его покрывает, и, наконец, тонкий слой коры, на поверхности которой мы живем. Радиус Земли составляет шесть с лишним тысяч километров, а кора уходит на глубину лишь около семидесяти километров. Если сравнить Землю с драже M&M's, то земная кора — лишь окрашенная в яркий цвет оболочка. Однако семьдесят километров — чрезвычайно много как для биологии, так и для наших методов бурения. Вообще говоря, это намного глубже, чем нам когда-либо удавалось пробурить. Несмотря на все наши знания о мантии и ядре Земли, мы никогда их не видели.

Все, что нам известно, было установлено по анализу камней, выброшенных на поверхность при извержении вулканов, движении тектонических плит или землетрясениях, проходящих через центр планеты[4]. Но те несколько километров земной коры, которые нам удалось пробурить на сегодняшний день, судя по всему, бурлят жизнью. Используя образцы из подобных мест, ученые сумели вырастить микроорганизмы и проанализировать их ДНК, РНК, белки, метаболиты и липиды. Мы даже можем напрямую определять продукты метаболизма, соответствующего тем биомолекулам, которые мы находим. Очевидно, что над границей между корой и мантией есть обширный плодородный слой, где и процветают подземные формы жизни.

## Пища снизу и сверху

Представители подземной биосферы относятся к двум основным типам. Первые в большей степени зависят от хемосинтеза (их называют хемолитоавтотрофами), чем от фотосинтеза. Хе-

**[4] Примечания: 4**
На основании информации о землетрясении в США ученые из Китая могут узнать состав минералов в центре Земли, поскольку скорость и форма волн разные при прохождении через различные среды.

мосинтез — это процесс, в результате которого живые организмы создают биомассу исключительно с помощью химических реакций, им не нужен солнечный свет. Организмы другого типа (хемоорганогетеротрофы) поедают продукты фотосинтеза, проникающие вниз с поверхности Земли. В некоторых средах встречаются микробы обоих типов.

Химические вещества, необходимые для жизни хемосинтезирующих организмов, либо происходят из земных недр, где условия слишком неблагоприятные для поддержания жизни, какой мы ее себе представляем, либо производятся в непосредственной близости от потребляющих их микробов. Преимущество жизни на глубине по сравнению с жизнью на поверхности вот в чем: тут есть тепло и давление. Под действием тепла и давления породы и минералы превращаются в химические соединения. Обитатели земных недр используют эти соединения для получения энергии и для построения своих тел (растения делают то же самое на поверхности с помощью солнечного света). Но в отличие от солнца, которое орошает фотонами всю поверхность нашей планеты, источники жизни в земных глубинах распределены неравномерно и дают начало раз-

ным химическим соединениям. Будто в земной коре рассеяны миллионы маленьких солнц — каждое со своей собственной крохотной орбитой в подземной экосистеме.

Солнечный свет достигает буквально всех уголков на поверхности Земли, какие мы только можем увидеть. Но под поверхностью химические вещества должны переместиться по многочисленным канальцам, прежде чем попадут к живым клеткам, которые в них нуждаются. В рамках человеческой жизни земная кора может казаться неизменной, но в геологическом масштабе времени она находится в непрерывном движении. Тектонические плиты сталкиваются между собой, давят и наползают друг на друга. В результате таких перемещений создаются трещины, которые служат скоростными шоссе для переноса богатых энергией химических веществ. Чтобы лучше понять, что при этом происходит, представьте себе мячик, покрытый кусочками пластилина разной жесткости и плотности. Когда вы будете передвигать один кусочек пластилина по поверхности мяча, остальные фрагменты начнут изгибаться, деформироваться, растягиваться, чтобы прийти в соответствие с этими изменениями. А теперь представьте, что в од-

ном месте пластилин гораздо тяжелее, чем на соседнем участке, куда он наползает. Если мяч изготовлен из мягкого и пористого материала, тяжелый фрагмент начнет погружаться вглубь, а легкий окажется сверху. Если одна тектоническая плита оказывается под другой, этот участок называют субдукционной зоной, и там в плите возникают трещины и слабые места, что создает дополнительные возможности для перемещения химических веществ.

Иногда на поверхности таких утопленных океанических плит образуются подводные горы — небольшие холмы, возвышающиеся над океанским дном. Когда тектонические плиты оказываются под континентом, они вызывают такой же эффект, как если проткнуть пальцем желе: они продавливают континентальную кору, поднимая ил, камни и воду и создавая вертикальные потоки, называемые грязевыми вулканами. Грязевые вулканы извергают химические соединения и микробов из земных глубин в морскую воду и в поверхностные отложения.

Еще один процесс, способствующий перемещению химических веществ в земной коре, называют спредингом или рифтингом: это когда две тектонические плиты расходятся и между

ними остается пустое пространство. Словно вы роете песок на пляже, а в образующиеся траншеи устремляется вода. Однако при спрединге происходит кое-что еще. Разъединение двух фрагментов земной коры толщиной в сотню километров производит мощный эффект, нарушающий стабильность лежащей под ними мантии. Нестабильная мантия высвобождается и поднимается к поверхности. Когда это происходит, давление на мантию резко падает (примерно то же самое случается при слишком быстром всплытии водолаза, что приводит к кессонной болезни), температура плавления мантии понижается — и она становится жидкой, что дополнительно усиливает ее выброс. Такой каскад событий высвобождает дьявольские силы и вызывает извержение вулкана. Аналогичный процесс разжижения мантии происходит и в субдукционных зонах, поскольку погружение океанической плиты сопровождается попаданием в мантию воды и выбросом магмы. Так образуются вулканические дуги — удивительные цепи гор вроде тех, что пронизывают западную часть Южной, Центральной и Северной Америки, а также Японию, Индонезию и другие территории Земли.

При извержении вулканов, как и при субдукции, в прочных и твердых камнях возникают полые трещины и разломы, позволяющие химическим соединениям перемещаться. Даже когда все спокойно, морская вода продолжает просачиваться под землю благодаря тепловым конвективным ячейкам, создаваемым градиентом температуры, который всегда существует под поверхностью. Когда океанская вода оказывается в контакте с глубокими слоями земных недр, она переходит в перегретое состояние и насыщается металлами и разными химическими соединениями. А при выбросе обратно на поверхность она смешивается с другими компонентами морской воды. И на всех стадиях процесса живые организмы из подземной биосферы получают энергию, выделяющуюся в ходе этих реакций. Если представить себе Землю не как место обитания, а как единый живой организм, эти глубокие трещины можно сравнить с артериями, доставляющими к клеткам необходимые для жизни питательные вещества. Подобные процессы заполнения пустот оставили заметные следы в виде гигантских шрамов, словно от ударов огромной бейсбольной битой, на дне Тихого, Атлантического и Индийского океанов.

Однако для доставки богатых энергией химических соединений в подземную биосферу не всегда нужно пробиваться через океаническую плиту. В некоторых местах, таких как Мексиканский залив или Средиземное море, есть глубоко залегающие отложения соли, оставшиеся от древних озер, высохших и превратившихся в соляную корку миллионы лет тому назад. Эти солевые отложения характеризуются более высокой плавучестью, чем наслоения на их поверхности. И когда соль медленно всплывает сквозь слои отложений, она проделывает новые бреши, через которые подземные жидкости поднимаются с больших глубин.

Аналогичные процессы происходят и на суше. Однако в этом случае тепловая конвекция приводит в движение не морскую воду, а то, что геологи называют “метеорной водой”[5]. Когда я впервые услышала это выражение, я подумала, что речь идет о воде из метеоров (потрясающе!), однако, как выяснилось, так называют банальную подогретую дождевую воду. Перемещения воды создают для микробов места обитания, и такие экосистемы могут существовать за счет

**[5] Примечания: 5**

Это дождь, выпадающий на поверхность Земли и просачивающийся в ее глубины. — *Прим. науч. ред.*

химических веществ, а не солнечного света. Я говорю “могут”, поскольку большинство таких сред остаются неизученными.

Таким вот образом необходимые для жизни химические соединения циркулируют в земной коре. Но как они попадают туда изначально? Одна из самых мощных реакций, приводящих к образованию подобных соединений, происходит при смешивании воды с минералами — оливинами и перидотитами — в условиях повышенных давления и температуры, что сопровождается выделением водорода и восстановленного железа. Сейчас этот процесс, называемый серпентинизацией, считается одним из главных кандидатов на роль источника первой жизни на Земле, поскольку он приводит к образованию всех необходимых для жизни химических соединений и не нуждается в солнечном свете для их окисления. Кроме того, химические соединения образуются при погружении тектонических плит в зонах субдукции (вспомните о кусочках пластилина на мячике). При этом из минералов высвобождаются диоксид углерода, монооксид углерода[6], металлы, сера и азот, которые растворяются в воде, где могут

**[6] Примечания: 6**

Диоксид углерода широко известен как углекислый газ ($CO_2$), а монооксид углерода — это угарный газ (CO). — *Прим. науч. ред.*

использоваться микробами. Поддерживающие жизнь химические соединения возникают даже в таком простом процессе, как трение горных пород при землетрясениях. Хемолитоавтотрофы, существующие за счет этих химических соединений, погибая, превращаются в пищу для целого ряда других микроорганизмов и подобно растениям способствуют организации сложных и разнообразных экосистем.

Одна из самых удивительных движущих сил хемолитоавтотрофии — это радиация. Если подвергнуть воду воздействию радиации, она расщепляется на кислород и водород, которые относятся к числу наиболее ценных химических молекул для питания хемолитоавтотрофов. Мы знаем о радиации в связи с созданием ядерного оружия и его захоронением. Однако вокруг нас постоянно распространяется естественная радиация. Энергия, благодаря которой миллиарды лет назад возникли все химические элементы, в том числе способствовала образованию радиоактивных элементов вроде тория и урана, распадающихся спонтанно, но очень медленно. И поэтому все отложения в любом месте непрерывно излучают микроскопические дозы радиации — слишком незначительные, чтобы оказывать

на нас негативное влияние, но достаточные для расщепления воды и поддержания жизни микробов. В глубочайших недрах Земли (в шахте на глубине почти трех километров)[7] был обнаружен микроорганизм, именуемый *Desulforudis audaxviator*, его видовое название переводится как “отважный путешественник”[8]. Он очень давно не контактировал с внешним миром и, возможно, существует исключительно за счет химических веществ, образующихся под действием радиации[1]. Совсем неплохо жить прямо рядом с кормушкой! Единственный недостаток заключается в том, что уровень этой радиации настолько низкий, что и пища образуется очень медленно. Такой способ существования подходит только отпетым лентяям и как будто специально

**[7] Примечания: 7**

Главный автор работы Туллис Онстотт объяснил мне, что трудно понять, на каком именно уровне обитают эти микробы. Ученые спустились в золоторудную шахту на глубину 2,8 километра, где отобрали пробы жидкости из трещин в камнях, однако источник этих жидкостей должен находиться где-то гораздо глубже.

**[8] Примечания: 8**

В честь героя романа Жюля Верна “Путешествие к центру Земли”. Интересно, что точная копия этого десульфорудиса, обнаруженного в африканской шахте, была выделена из глубинной термальной скважины в поселке Белый Яр Томской области. Специалисты по эволюции микроорганизмов до сих пор не могут разгадать загадку: как две абсолютно идентичные бактерии попали в столь удаленные уголки земного шара? — *Прим. науч. ред.*

предназначен для обитателей земных глубин.

Некоторые из подземных жителей сочетают химические вещества из-под земли с кислородом и окисленными соединениями из внешнего мира. Однако другие, такие как метаногены и ацетогены, могут жить исключительно за счет химических веществ из земной коры, так что отсутствие солнечного света их вообще не беспокоит.

Чтобы оценить, насколько это необычно, представьте, что произошло бы, если бы сейчас исчезло солнце. Все фотосинтезирующие организмы, такие как домашние растения и водоросли, погибли бы за несколько лет. Другие формы жизни еще какое-то время продержались бы, поедая остатки растений. Полагаю, что люди протянули бы лишь несколько лет после гибели растений. Наверное, какие-нибудь тараканы прожили бы еще сотню лет, но не другие животные. Грибы и бактерии, поглощающие растительный материал и кислород, просуществовали бы еще несколько миллионов лет, но с исчерпанием всей пищи и всего кислорода погибли бы и они. А вот у подземных жителей, как вы можете догадаться, все было бы прекрасно. Возможно, они бы даже не заметили, что чего-то не хватает. На самом

деле даже те обитатели земных недр, которые в обычной ситуации зависят от поступления кислорода с поверхности, могут избежать асфиксии, поскольку *другие их собратья производят небольшое количество кислорода*[2][9]. И никого из этих ребят не волнует, встает ли солнце по утрам или нет. Они зарыты в земной коре слишком глубоко, чтобы это замечать.

Организмы из подземных экосистем, о которых я рассказывала до сих пор, почти не зависят от условий на поверхности (даже от существования солнца), однако организмы из подземных экосистем второго типа — их полная противоположность. Они целиком и полностью зависимы от продуктов жизнедеятельности верхнего мира, как жители островов — от поставок пищи с континента. Самая обширная подземная среда, нуждающаяся в пище из верхнего мира, — это морские отложения. Толщина морских отложений может достигать десятков километров, и они есть на дне всех океанов мира, а это весьма значительное пространство для жизни. Отложения накапливаются за счет непрерывного осаждения всякой всячины из толщи океана или из стоков

**[9] Примечания: 9**

Недавно был открыт удивительный метаболический путь, который может в корне изменить наше понимание процессов образования кислорода на Земле.

с поверхности суши. Этот ил[10] служит источником питательных веществ, энергии и твердых субстратов для подземных микроорганизмов. В устьях крупных рек, таких как Ганг или Нил, отложения накапливаются быстро. В таких местах упавшая частица остается на поверхности дна лишь несколько столетий, а затем оказывается захороненной под свежими слоями отложений.

Однако в других местах, например в центре Тихого или Атлантического океана, дно покрывается илом медленно. Поблизости нет континентов с реками, которые разбрызгивают все, как грязные пожарные шланги. Даже песчаные бури из Сахары или Гоби сюда не долетают. Но удаленность от континентов не только снижает скорость накопления осаждений, но и уменьшает количество планктона на поверхности, а ведь этот планктон тоже мог бы выпадать на дно после того, как его съедят, переварят и переработают при прохождении через толщу океана. Дело в том, что фитопланктон нуждается не только в солнечном свете, но и в железе, которое поступает главным образом с речной водой и с ветром из пустынь. Таким образом, срединная часть океана

**[10] Примечания: 10**

Это технический термин. Так называют остатки умерших организмов, осаждающиеся на дне океана.

— обширнейшее пространство искрящейся чистой голубой воды шириной в сотни километров. В таких местах осевшие частицы могут лежать на дне тысячи лет или дольше, пока их не покроют новые слои отложений и не вдавят под поверхность дна.

Как ни странно, хотя отложения поступают на дно из рек или разлагающегося планктона, многие обитатели земных недр, которые тут живут, имеют другое происхождение. Микробы из глубоких слоев придонных отложений мало похожи на тех, что встречаются в реках и океанах. Это самостоятельные существа, хотя и питаются они готовыми обедами из других источников.

Возможно, вам интересно узнать, как выглядят образцы из подобных экзотических сред, которые ученые отбирают на дне океана. Чаще всего на вид в них нет ничего примечательного. Они выглядят как обычная грязь, камни или жидкость, и это может разочаровать, если учесть, как сложно их добывать. Время от времени со мной связываются продюсеры или сценаристы научных телепередач и документальных фильмов, заинтересовавшиеся (вполне оправданно) исследованиями глубоких земных недр. В ходе беседы мне обязательно задают вопрос: “Как

ваши образцы будут выглядеть в кадре?" Когда я отвечаю: "Ну, наши образцы — это грязь. Они выглядят как… грязь", собеседник обычно говорит, что ему было приятно пообщаться и он свяжется со мной позднее.

Но именно своей "банальностью" подземная биосфера Земли так интересна. Грязь есть повсюду, и это означает, что она важна. Объем ила[11] на дне всего Мирового океана эквивалентен объему Атлантического океана[3]. И в расчете на кубический метр содержание микробных клеток в иле от ста до ста тысяч раз выше, чем в морской воде[4]. Трудно даже представить, сколько живых организмов обитает в глубинах земных недр. Общее количество микробов в подземных морских отложениях оценивается в $2{,}9 \times 10^{29}$ клеток, что примерно в сто тысяч раз больше, чем количество звезд во Вселенной[5]. Но это еще *не весь* подземный мир. С учетом живых организмов, обитающих под поверхностью суши, это число как минимум удваивается[6]. Кроме того, некоторые клетки могли найти ниши с более вы-

**[11] Примечания: 11**

На самом деле правильнее сказать "отложений", поскольку в техническом смысле под "илом" подразумеваются частицы определенного размера. Однако в данном случае я использую слово "ил", чтобы показать, что речь идет о всем нам хорошо знакомой вязкой материи.

сокой концентрацией пищи, чем в среднем, и там больше живых организмов, чем предсказывают модели. Поэтому реальное количество микробных клеток в подземной биосфере, безусловно, намного превышает эти оценки.

Важно отметить, что два типа подземных сред, о которых я рассказала, не являются взаимоисключающими. Например, вспомним об иле, который мы с моими коллегами собирали в пластиковые пробирки с помощью роботизированного устройства на погружном аппарате “Джонсон-Си-Линк II” у метановых источников на дне океана. Когда я потом анализировала образцы в нашей лаборатории в Университете Северной Каролины, я обнаружила, что в этой липкой черной грязи содержались бактерии и археи, поедавшие пищу, которая оседала на дно океана из толщи воды вместе с другими частицами. В этом ничего удивительного нет. Но интересно, что еще я обнаружила микробов, питающихся метаном и водородом, которые выделяются в виде пузырьков из старых нефтяных отложений[7]. И соседствуют они с микробами, питающимися тем, что падает сверху. Замечательно, что такое сочетание поверхностных и подповерхностных источников пищи приводит к росту численности

микробных популяций и делает эти сообщества устойчивыми и разнообразными. Не исключено, что нам предстоит открыть еще много таких горячих точек в земной коре по всей планете.

Вероятно, так и будет. Однако в отложениях, не имеющих хорошего источника химических веществ, с увеличением глубины среда меняется критическим образом. На глубине нескольких метров наблюдается безнадежная ситуация: в более глубоких слоях отложений нет свежих источников пищи. И микробы вынуждены находить иные способы существования, питаясь тем небольшим количеством пищи, с которой они были захоронены. Представьте, что вам выдали прекрасный обед для пикника, но с условием, что этой еды вам должно хватить на всю оставшуюся жизнь. Удивительно, но подземные организмы каким-то образом с этим справляются. Как им это удается? Мы точно не знаем. Отчасти потому, что, как мы увидим в следующей главе, проникнуть в глубины твердой земли в поисках образцов намного сложнее, чем кажется.

# Глава 2
# Вгрызаемся в твердую землю

Для всех подземных сред, откуда бы в них ни поступала пища — снизу или сверху, справедливо одно и то же утверждение: там сложно отбирать образцы. Обычно невозможно просто прийти и начать копать. В таких местах нет ведущих вниз лестниц или эскалаторов. И даже спуск устройства для отбора проб с кормы корабля в морскую воду требует техники, навыков и удачи. Доступ к подземным пространствам не дается без усилий.

Эта глава о том, как ученые извлекают образцы из-под поверхности земли: из неглубоких мест, куда можно добраться руками, из таких глубоких, где для бурения необходимы усилия нескольких государств, или из таких удачных мест с природными источниками, где микробы сами выходят на поверхность. Однако вне зависимости от того, как это происходит, сбор подповерхностных образцов — всегда в какой-то степени приключение, которое, как я расскажу дальше, иногда сопряжено с болью или неудобствами. Мы делаем эту работу не потому, что она легкая.

## Отбор проб на глубине до тридцати метров

Один из простейших способов проникнуть вглубь земной коры — вручную затолкать пластиковую полую трубку в ил и вытянуть ее обратно с попавшими внутрь отложениями. Примерно как опустить соломинку в вязкий напиток, прижать ее сверху пальцем и извлечь попавшую внутрь жидкость. Метод с соломинкой (он работает одинаково хорошо и когда я вручную устанавливаю пластиковые пробоотборники в устье реки в Северной Каролине, и когда направляю их с помощью подводного автоматического устройства в океане) не позволяет проникнуть очень глубоко, но иногда для наших исследований этого достаточно. Если образцы берут из слабо освещенных мест с очень незначительным притоком свежих питательных веществ из внешнего мира, их можно считать подповерхностными. Такие условия всегда соблюдаются на дне глубокого океана. Весь материал, который извлекают из ила с глубины в сотни метров под толщей воды, был полностью лишен солнечного света и подвергался очень

незначительному влиянию внешнего мира.

Небольшие модификации наших полых пробоотборников позволяют использовать метод соломинки и на большей глубине. Такая модифицированная технология, названная гравитационным методом отбора, предполагает замену полой трубки на гигантскую девятиметровую стрелу, которую укрепляют с помощью металлических стабилизирующих ребер и нескольких тонн металлического груза в области головки. Гравитационный пробоотборник поднимают краном с кормы исследовательского судна, а затем сбрасывают в воду. Стрела пронзает толщу воды и врезается в морское дно, глубоко погружая трубу пробоотборника. Заполненную трубу лебедкой поднимают со дна обратно на судно, следя, чтобы она не раскачивалась и не убила кого-нибудь на палубе. Внутреннюю пластиковую трубку (сердечник) выдвигают из металлической трубы, кладут на палубу и разрезают циркулярной пилой. И потом исследователи могут рассмотреть все слои и отобрать пробы из любого места.

Когда я разглядываю поперечные срезы гигантских кернов, меня всегда поражает, что, хотя это “всего лишь грязь и камни”, разные пласты морского дна немного различаются между собой,

и это бывает очень красиво. Цвет их меняется от коричневого до белого, красного, серого, черного или даже ярко-голубого либо зеленого, как морская пена, а иногда образуются слои или тигровые полоски. Время от времени встречаются небольшие вкрапления железной ржавчины или крохотные кристаллики карбонатов, и это показывает, что над созданием минералов трудились микробы. А иногда попадаются слои гравия или ракушек, что позволяет представить, каким было морское дно много тысяч лет назад. В 2009 году, наклоняясь над собственным животом (я была беременна), я отбирала образцы жидкости из керна на палубе корабля в заливе Орхус в Дании. Как обычно, по мере того, как я брала пробы со все большей глубины, выдавить воду становилось все труднее, поскольку отложения со временем спрессовываются. Но вдруг я наткнулась на слой гравия, где было полно воды. Я быстренько произвела расчеты, и у меня получилось, что эти крупнозернистые отложения, скорее всего, оказались на дне в то время, когда Данией правили викинги, — примерно тысячу лет назад.

Когда вы изучаете керн, вы не просто его рассматриваете. Иногда еще больше информации можно извлечь из запаха. Образцы прямо с по-

верхности почти не пахнут — примерно как глина, из которой лепят горшки. Но если провести носом над более глубокими слоями керна, вы почувствуете запах тухлых яиц. Он объясняется наличием сульфидов — продуктов жизнедеятельности микробов, которые дышат сульфатами. Керны из устья реки Уайт-Оук в Северной Каролине, где я частенько бываю, пахнут уже на глубине сантиметров в десять. В кернах из глубокого моря зловоние начинается ниже нескольких метров. Это различие связано с тем, что в устье реки попадает гораздо больше органических веществ, чем в глубокое море, поэтому процессы идут гораздо быстрее. Часто к аромату сульфидов примешиваются запахи других продуктов жизнедеятельности микробов, расщепляющих мертвые организмы. Эти пахучие молекулы — родственники тех, что придают специфический запах благородным винам и сырам, но поверьте, морские отложения пахнут куда менее приятно. И однако же мой чудесный научный руководитель Андреас Теске вдыхал эти пары, как сомелье, комментируя тонкие ноты кадаверина и богатый аромат путресцина[12].

---

**[12] Примечания: 12**

Кадаверин и путресцин — это одни из главных составляющих трупного запаха. — *Прим. науч. ред.*

По мере перемещения вдоль керна, а значит, дальше назад во времени запах серы потихоньку отступает. Сульфиды — очень активные соединения и любят взаимодействовать с железом, которое на морском дне присутствует в изобилии. Большинство плавающих в океане микробов экономят железо, запасают его и борются друг с другом, чтобы завладеть любым доступным атомом. Но в глубоких слоях на долю железа приходится до 8 % общей массы отложений, так что у здешних обитателей его предостаточно. И оно быстро связывает все зловонные сульфиды, образуя черный пирит[13]. Еще глубже отложения черного пирита исчезают, но остаются глины и карбонаты, которые часто пахнут мелом, а иногда источают амбре бензозаправочной станции. В таких местах, как Мексиканский залив, древние залежи нефти, привлекающие компании вроде *Shell* или BP, придают нашим образцам сильный запах.

Отбор проб может быть сопряжен с опасностью. Метан плохо растворяется в воде, он выделяется,

**[13] Примечания: 13**

На самом деле пирит, кристаллический дисульфид железа, имеет сероватый оттенок, а черный цвет характерен для аморфного моносульфида железа, гидротроилита. Моносульфид железа образуется очень быстро, за счет активной реакции сероводорода с железом, а для его преобразования в пирит требуется время. — *Прим. науч. ред.*

как пузырьки газа из бутылки кока-колы. Однако на глубине под давлением толщи океанской воды он растворяется. И в результате придонный ил часто перегружен метаном. Когда мы поднимаем ил со дна и вытягиваем его на корабль, из-за резкого перепада давления метан может взорваться, как бомба. В 2006 году я работала на корабле в Мексиканском заливе. Мы вынимали керн за керном, надеясь, что найдем метан, но почти ничего не нашли. Мы добросовестно изучали керны и анализировали образцы сутки напролет, но они не оправдывали наших ожиданий. Наконец мы забросили еще один гравитационный керн. И когда мы вытащили его на палубу, как длинную металлическую рыбу, из верхней части трубки мощным фонтаном хлынул ил. Мы рассчитывали найти какое-то количество метана, но попали в жилу, и метан взорвался. Я глядела на мои драгоценные образцы, разлившиеся по палубе корабля, и думала: “Ну что ж, ты получила, что хотела…”

## Отбор проб на километровой глубине

А если мы хотим пробурить морское дно гораздо глубже? На сотни метров? Для этого недостаточно

сбросить тяжелую стрелу с кормы корабля, сколько бы тонн стальных пластин мы ни прикрепили к ее головке. Для таких целей требуется промышленное буровое оборудование, а оно стоит дорого, и такая работа должна быть организована на государственном или международном уровне.

В настоящее время научные изыскания, требующие глубокого бурения морского дна, проводятся тремя ведущими группами из США, Европы и Японии, а глубокое бурение на континентах осуществляется в рамках крупного международного проекта. В этих программах задействовано несколько кораблей: “Джойдес Резолюшен” (США), “Тикю” (Япония) и суда, переоборудованные для бурения в ограниченном пространстве (Европа). Судно “Джойдес Резолюшен” долгое время было главной рабочей лошадкой в научных проектах по глубоководному бурению, с его помощью в морском дне можно бурить скважины длиной около километра — в зависимости от глубины воды в выбранном месте и от типа пород в составе донных отложений. Мощные стабилизаторы удерживают судно на поверхности воды, даже когда волны или течения пытаются сдвинуть его с места. Благодаря этому из-под судна удается выдвинуть сотни или тысячи метров

“бурильной колонны”, которая на самом деле представляет собой полую металлическую трубу, прикрепляющую судно к морскому дну, так что получается как бы огромный плавучий леденец на палочке. Через эту трубу пропускают массивное буровое сверло, пробивающее ил и породы, а морская вода служит смазкой.

Однако в морской воде тоже есть микробы, и они могут загрязнять образцы. Чтобы этого избежать, бурильщики, если позволяет ил, используют технологию *Advanced Piston Coring* (“отбор кернов поршневой трубкой”). По дну скважины производят мощный удар, в результате чего девять метров трубы продавливаются вглубь морского дна меньше чем за три секунды — и контакта с буровой жидкостью не происходит. В качестве другой меры предосторожности мы работаем только с центральной частью керна и добавляем в буровую жидкость летучее вещество. И периодически проверяем материал из керна на наличие этого вещества, чтобы удостовериться в отсутствии контакта с буровой жидкостью. Эти меры предосторожности вполне оправданны: если вы высверливаете в придонных отложениях дыру глубиной в несколько сотен метров под километровыми слоями морской воды, десятки

таких труб возвращаются на корабль с ценными подповерхностными отложениями, которые не контактировали с океаном, не говоря уже о солнечном свете, сотни тысяч или миллионы лет. С помощью летучих маркеров мы проверяем, аккуратно ли проведено бурение и не заражены ли образцы обычными морскими микробами.

К сожалению, судно “Джойдес Резолюшен” вскоре будет выведено из эксплуатации, а следовательно, его уже нельзя будет использовать в научных экспедициях. Пока я пишу эти строки, у США еще нет конкретных планов по его замене, поэтому скоро мы не сможем бурить морское дно в рамках государственных научных проектов. Частные компании продолжат работу, извлекая богатства из подводных недр, однако общество получит выгоду от этой деятельности лишь в той степени, в какой компании захотят продать нам то, что обнаружат. И все же я надеюсь, что общество увидит пользу от научного бурения и продолжит его поддерживать.

Японское судно “Тикю” было сконструировано для решения такой задачи, которая не ставилась никогда прежде: для бурения сквозь всю земную кору вплоть до мантии. Помните, я говорила, что никто раньше не бурил скважины

до мантии? Так вот судно “Тикю” предназначено именно для этой работы. И хотя эта ранее невыполнимая задача пока так и не реализована, на сегодняшний день в рамках проекта *Leg* 370 судно осуществило научные поиски жизни на глубине 1,2 километра в морском дне у берегов Японии. Чтобы пробурить кору в самом тонком месте и достать до мантии, придется продвинуться еще на несколько километров. Участники этого проекта, объединяющего ученых из Японии, Германии, Дании, США, Великобритании, Канады, Швейцарии, Австралии и Кореи, показали, что живые организмы процветают в морских отложениях по всей этой глубине. В образцах отложений обнаружено множество микробов, захороненных много миллионов лет назад[1]. Судя по всему, даже в этой отдаленной части глубинной биосферы по-прежнему есть какое-то тепло, подогревающее захороненную пищу и делающее ее более питательной. Поскольку на сегодняшний день лишь несколько экспедиций сумели пробурить кору достаточно глубоко, чтобы наблюдать такую реактивацию источников пищи, пока трудно сказать, насколько это распространенное явление.

Однако, несмотря на все эти впечатляющие усилия, жизнь на самых больших глубинах была

обнаружена не за счет бурения морского дна. Жизнь в самых глубоких недрах Земли была обнаружена учеными, спускавшимися в горнорудные шахты в ужасно шатких и душных шахтерских клетях. Для тяжелой промышленности, например для добычи золота, необходимо прокладывать многокилометровые туннели вглубь земной коры. Недра Земли горячие, и поэтому в шахтах жарко — из-за слабого излучения первозданного тепла, оставшегося от момента возникновения планеты. Если ученым удается наладить отношения с владельцами шахт, им позволяют время от времени спускаться и откачивать жидкость из глубинных трещин в породах. И, как и в случае морских отложений, на какой бы глубине ни проводился анализ, ученые всегда обнаруживают изобилие живых организмов. Одним из самых значительных достижений было открытие бактерии *Desulforudis audaxviator*, упомянутой в предыдущей главе, которая питается продуктами разложения воды под действием радиоактивного излучения. Вот так. И как вы, возможно, помните, ее нашли на глубине 2,8 километра в золотоносной шахте в Южной Африке[2].

## Жизнь в пузырьках газа из земных недр

Но не отчаивайтесь, если у вас нет погружных устройств, гравитационных бурильных установок и судов, а также знакомых среди владельцев шахт. Есть другой способ отбирать образцы из земных глубин: нужно подождать, когда они сами выйдут на поверхность. В предыдущей главе я рассказывала, что на Земле много мест, где в результате движения тектонических плит, плавучести солевых отложений или тепловой конвекции грунтовых вод происходит перемешивание химических соединений, служащих пищей для хемолитоавтотрофных организмов. Если повезет, эта богатая микробами вода выходит из глубин на поверхность. Прямо туда, где мы можем ее поймать.

Такие выходы подповерхностных вод в океане называют гидротермальными источниками. Они часто образуют трубообразные структуры из минеральных отложений, накапливающихся в результате реакции между растворенными в этой жидкости веществами и холодной, богатой

кислородом морской водой[14]. Гидротермальные источники подобны природным портам для отбора проб глубинной подповерхностной жидкости[3]. Понятно, что для отбора проб на дне океана нужно спуститься туда на погружном устройстве. Следующая сложность заключается в том, чтобы найти способ отобрать образцы с помощью роботизированной руки, не засасывая при этом большое количество морской воды. Проработав много лет с подобными образцами из океана, недавно мы с моими коллегами решили попробовать применить аналогичную методику на суше.

Когда вода из-под земли выходит на поверхность на суше, мы называем это природными источниками. Часто эта вода горячая, поскольку в земных недрах жарко. Если в ней содержатся карбонаты или силикаты, вокруг источников образуются наросты или террасы, как в знаменитом парке Йеллоустон. Одно из преимуществ отбора проб на суше в том, что не нужно беспокоиться из-за возможного загрязнения образцов морской водой. Мы сразу пропускаем чистые жидкости

**[14] Примечания: 14**

В хорошем разрешении их можно увидеть в документальных фильмах Джеймса Кэмерона “Чужие из бездны” и “Вулканы в морских глубинах”.

через фильтры, чтобы отобрать микробов. Кроме того, организация работы на суше в миллион раз легче, чем под водой. Я даже описать не могу, насколько проще пользоваться навигатором, чтобы добраться до легко различимого горячего источника и отобрать пробу собственными руками в перчатках, чем искать гидротермальный источник на темном океанском дне и управлять неуклюжей роботизированной рукой. Недостатки работы на суше в большей степени связаны с антропогенным влиянием. Не раз, добравшись до горячего источника, я обнаруживала в нем купающееся семейство и вынуждена была упрашивать людей выйти, чтобы нам удалось подобраться поближе к воде. Неудивительно, что в таких образцах вместе с ДНК из-под земли часто содержатся примеси антропогенного происхождения.

Второй недостаток работы на суше имеет отношение скорее к ученым, чем к науке как таковой. На суше мы не защищены прочной титановой сферой и часто оказываемся в сложных условиях. Пребывание в высокогорной местности может быть опасным для жизни, а вождение автомобиля в таких богом забытых местах, как высокогорье Аргентины, — занятие не для слабонервных: на

бездорожье с глубокими рытвинами и небольшими валунами зубы стучат так, что сотрясается мозг. Знаю по собственному опыту.

Впервые я оказалась в Аргентине в 2019 году. Нам нужно было попасть на высоту более четырех тысяч метров, и многим из нас было и страшно, и любопытно узнать, что же там произойдет с нашими телами. При низком парциальном давлении кислорода можно почувствовать одышку, просто вставая со стула. И даже умеренная физическая нагрузка становится невозможной. Однако настоящие трудности связаны с непредсказуемыми побочными эффектами. Пальцы рук опухают, превращаясь в сосиски. В голове происходит такое, будто вы всю ночь пили. Вас может вырвать один раз, или два, или рвать постоянно. Вы можете побледнеть и не иметь сил поднять руку или просто оставаться в вертикальном положении. Вы глупеете. Однажды во время посещения высокогорной обсерватории Мауна-Кеа на Гавайях я стояла и притопывала ногами, страдая от холода и кляня себя, что не взяла теплую куртку. А вернувшись на обычную высоту, обнаружила куртку поверх всех вещей в том самом рюкзаке, с которым ходила. Я просто забыла, что куртка у меня была. И такая тупость

напала на меня всего за несколько часов пребывания на Мауна-Кеа. А в Аргентине мы провели на высокогорье две недели.

Мы заселились в небольшую гостиницу в Сан-Антонио-де-лос-Кобрес на высоте 3700 метров, поужинали и завалились спать в общих номерах. Утром я вошла в столовую и узнала, что все участники экспедиции пережили худшую ночь в своей жизни: ворочались и просыпались каждые несколько минут, пытаясь дышать. В столовой было тихо и мрачно. Я раздавала ибупрофен, как конфеты, но он слабо помогал от острой боли.

Наши мучения частично сглаживались предвкушением того, что ждало нас впереди: мы должны были первыми отобрать микробиологические образцы в этих отдаленных местах. Мы мчались на грузовиках по плато Альтиплано безо всяких дорог, ориентируясь только по GPS-координатам и вулканам. По сравнению с изуродованными дорогами, по которым мы сюда добрались, здесь мы чувствовали себя так, будто летели по воздуху. Вулканы Анд — самые высокие вулканы в мире — извергаются с неимоверной силой, уничтожая цивилизации, а затем медленно разрушаются на протяжении сотен тысяч или миллионов лет. Образовавшиеся в результате

эрозии обломки рассеиваются по долинам между вулканами, покрывая пространство плоским гравием. Даже за большие деньги не удалось бы найти компанию, которая сделала бы эту работу лучше.

С вулканов ссыпается не только гравий — дожди вымывают соли и откладывают их в долинах. Со временем дождевая вода из этих солевых растворов испаряется, оставляя многокилометровые поверхности блестящей белой соли — солончаки. Когда мы пересекали один из них, на горизонте появились светло-розовые точки. Мы подъехали ближе, и я увидела, что у точек есть крылья и стоят они на одной ноге. Это были фламинго. Любой, кто хоть что-то знает о Южной Америке, не удивился бы при виде этих птиц. Фламинго — важнейший элемент культуры и естественной истории региона. Но я до той первой поездки в Аргентину почти ничего не знала о Южной Америке и при виде фламинго, раскачивавшихся на одной ноге в пространстве без единого зеленого растения, посреди соленой высокогорной пустыни, смиренно признала, что в мире есть очень много мне неизвестного.

Обнаружить горячий источник в пустынной каменистой местности несложно. Любое ярко-

зеленое пятнышко на склоне указывает, куда нужно идти. Дожди здесь настолько редки, что подобные источники — единственное место, где могут существовать организмы, имеющие листья. Мы издалека заметили такой миниатюрный зеленый оазис и начали медленно продвигаться к нему по склону. Поскольку по здешним дорогам ездят редко, за ними никто не следит, и нам постоянно приходилось останавливать машину, чтобы выйти и убрать с пути небольшие валуны. Когда мы подобрались к источнику, мы увидели около него маленькую хижину из глины и соломы, а вокруг бродили ламы. Уже несколько часов мы не видели никаких построек и очень удивились, обнаружив дом. Но еще больше мы удивились, когда оттуда, широко улыбаясь, выбежал человек, обрадованный, что в нашей группе есть женщины. Он сообщил, что уже сколько-то лет не отлучался из дома и за это время его посетило лишь несколько человек. Он с радостью показал нам свой источник, принял небольшую плату и бейсболку и с удовольствием воспользовался возможностью поговорить.

Закончив фильтровать жидкость и заполнив несколько небольших пробирок осадочными породами и газами, мы заспешили, чтобы вернуться

в гостиницу до наступления ночи. Но прежде нужно было удовлетворить самую насущную физиологическую потребность, то есть найти место, чтобы сходить в туалет на равнине, где растительность в лучшем случае доходит до щиколотки. Вообще я считаю, что туалет на природе — преимущество нашей работы: вид на горы лучше стандартной холодной плитки на полу перед глазами. Но в тот день, когда я попыталась удалиться от группы в поисках подходящего места, я не могла отделаться от семи любопытных лам. Они следовали за мной, пока я наконец не сообщила им: “Ладно, устроюсь здесь”. Я сделала свои дела, а они стояли полукругом, пережевывая свою жвачку, и тупо на меня глазели. В другой такой поездке единственным вертикальным элементом, увиденным нами за весь день, была большая черная труба, по которой вода поступает в отдаленные деревни. Я решила, что это отличное место: выскочила из грузовика, присела на корточки за трубой и прислонилась низом спины к ее теплой поверхности. Но когда я влезла обратно в машину, торжествующе протирая руки дезинфицирующим средством, я почувствовала неладное. Нижнюю часть спины ужасно жгло. Труба была сделана из стекловолокна, и крохот-

ные иглы врезались в мою кожу при каждом толчке грузовика. Таковы были последствия моего гениального решения.

Впрочем, подобные гениальные решения — неотъемлемая часть экспедиционной работы, особенно в стране с уровнем инфляции выше 45 %. Из-за финансовой нестабильности в Аргентине мы должны были менять деньги на месте. После трех дней пребывания в той маленькой высокогорной гостинице в Сан-Антонио-де-лос-Кобрес пришло время переезжать к следующему месту для отбора образцов. Оплачивая счет, мы покрыли стойку регистрации толстыми пачками купюр, поблагодарили хозяев за приятно проведенное время и вышли на улицу, пока они убирали деньги. Однако, оказавшись снаружи, мы поняли, что оставили в гостинице последние наличные. За снятие наличных с американских счетов с нас брали 25 % комиссионных, и поэтому геолог из Национального университета Сальты Агостина Кьоди, руководившая нашей поездкой, предложила снять деньги со своего личного банковского счета, чтобы покрыть расходы всей группы. Мы остались на улице, рассказывая глупые анекдоты и поднимая ногами пыль, а она пошла в банк. Однако вскоре вернулась в полном

изумлении и сообщила: “В банке нет наличных”. Мы оказались в неприятной ситуации. Мы были в далекой деревне и не имели возможности платить за еду, воду и постель. И знаете, что мы сделали? Мы вернулись в гостиницу и попросили свои деньги назад. Невероятно, но нам их отдали! Агостина уже была здесь во время предыдущих экспедиций, и хозяева поверили, что она заплатит позднее, как она и сделала.

В итоге мы взяли образцы из двенадцати горячих источников, рассеянных по всему аргентинскому плато Ла-Пуна. Каждый образец мы немедленно замораживали в контейнере с жидким азотом (металлическом резервуаре размером с газонокосилку, стенки которого выдерживают охлаждение до температуры жидкого азота), который мы возили с собой на грузовике[15]. Насколько нам было известно, до нас никто не изучал подземных микробов этого региона и уж тем более не анализировал их связь с геоло-

**[15] Примечания: 15**

Я могла бы написать целую книгу о том, как провезти сосуды Дьюара с жидким азотом через международные аэропорты, но она была бы очень скучной — с бесконечным ожиданием, множеством улыбок, попытками произвести хорошее впечатление. Тот факт, что наше оборудование одобрено Федеральным управлением гражданской авиации США, ничего не означал для служащих аэропорта Буэнос-Айреса, которые в ужасе смотрели на гигантское дымящееся устройство, изобретенное сумасшедшими учеными.

гией местности. Но вот собралась такая группа: несколько геологов, привыкших думать, что биология — это просто зеленая грязь на камнях, и несколько биологов, знающих, что для жизни нужен свет. И мы объединились, чтобы взять пробы из такого мира, где и то и другое было неправдой. Но если бы вы просто прочли статью, написанную по результатам нашей работы, вы бы никогда не узнали, как *в действительности* происходил отбор образцов. Чтобы заниматься наукой, требуется недюжинная страсть к приключениям.

Научная работа ускоряется, когда мы привозим добытые с таким трудом образцы к себе в лабораторию. Будь это обычные микробы, мы бы, наверное, подолгу разглядывали под микроскопом их малюсенькие выросты и оболочки. Я, например, считаю, что большинство микробов обворожительны. Но не эти. Эти микробы плотные, крохотные, голодные и находятся в состоянии стресса. К их изучению приходится подходить творчески.

# Глава 3
# Две ДНК-революции

Изучать обитателей земных недр было бы намного проще, если бы можно было распределить по чашке Петри немного свежего образца из горячего источника или глубоководного ила и наблюдать, как микробы станут прорастать аки грибы. Мы бы отобрали их стерильной зубочисткой и провели эксперименты, чтобы понять их особенности. Исследователи многократно пытались это сделать, и каждый раз им удавалось вырастить некоторое количество микробов, но, даже если жидкости или ил выдерживали под большим давлением, чтобы воспроизвести естественные условия обитания этих организмов, редко удавалось вырастить именно таких микробов, каких находили в природе.

Почему мы вообще решили, что они есть в наших образцах, если не получается их вырастить? Дело в том, что мы знаем об их существовании благодаря методам, разработанным в результате революции в исследованиях ДНК. Эта революция полностью изменила наши научные представле-

ния. В данной главе я расскажу, что революции в мире ДНК (их было две) означали лично для меня и как они позволили обнаружить шокирующие пробелы в наших знаниях о жизни на Земле.

## Первая революция в исследованиях ДНК

ДНК — это сокращенное название дезоксирибонуклеиновой кислоты, главной информационной молекулы во всех живых клетках. Фактически любая функция клетки закодирована в ее ДНК, которая представляет собой последовательность всего четырех оснований (их сокращенно называют A, G, T и C), сцепленных друг с другом, как бусины на ниточке или слова на странице текста. Эти "слова" (гены) играют важную роль в клетке, поскольку направляют создание других молекул, в частности РНК и белков, в том числе ферментов. А эти биомолекулы работают в каждой живой клетке.

Метод секвенирования ДНК позволяет определить порядок расположения тысяч оснований. Для этого молекулы ДНК помещают в аппарат, который считывает последовательность оснований и превращает эти данные в компьютерный

файл. В середине 2000-х годов, когда я была студенткой старших курсов, биология находилась в середине первой революции, связанной с развитием методов секвенирования ДНК. До того времени единственный способ определить последовательность ДНК заключался в медленном ручном анализе каждого основания трудоемкими методами с применением радиоактивных и токсичных веществ. Если бы нам не удалось усовершенствовать этот медленный и опасный метод, мы бы никогда не открыли богатейшее разнообразие жизни, о котором знаем теперь.

Первая революция в исследованиях ДНК произошла благодаря появлению двух важнейших методов: капиллярного электрофореза для секвенирования по Сэнгеру и полимеразной цепной реакции (ПЦР). Секвенирование по Сэнгеру — великолепный метод для чтения длинных последовательностей ДНК хорошего качества. Однако нужно сделать одно важное замечание: он работает только в том случае, если у вас есть огромное количество точных копий конкретной последовательности ДНК, и только ее одной. Долгие годы это было очень серьезным ограничением, поскольку реальная ситуация запутаннее и сложнее. В любом фрагменте почвы размером

с ластик содержатся миллиарды микробов. У каждого микроба есть как минимум один геном. В каждом геноме — по меньшей мере несколько тысяч генов. А каждый ген построен из сотен или тысяч оснований A, G, T и C. И в результате почти повсюду мы находим тысячи миллиардов последовательностей ДНК, поскольку микробы вездесущи. Как извлечь из этой мешанины какой-то один конкретный фрагмент ДНК?

Доставив образцы в лабораторию, мы первым делом должны физически отделить ДНК от всего остального, что попало в собранную нами жижу. Нам нужно удалить все жиры, сахара, белки, а также кусочки почвы и грязи. Затем мы разрушаем микробные клетки, чтобы ДНК вышла наружу, добавляем химические реактивы, чтобы она ни с чем не слипалась, а потом выделяем ее и очищаем. Существует несколько способов для решения каждой из этих задач, но у нас нет возможности проверять их все на каждом этапе, перебирая все возможные комбинации, поэтому, как только мы находим работающий метод, мы дальше пользуемся им и больше уже ничего не меняем. Мой коллега Костас Кормас из Университета Фессалии в Греции однажды безуспешно пытался выделить ДНК из образцов, отобранных

из гидротермального источника, и в порыве бешенства прогрел их в микроволновке. К его изумлению, это сработало! А иногда, наоборот, известный метод оказывался совершенно непригодным: однажды я целое лето выделяла ДНК из образцов, пока не поняла, что всякий раз на последней стадии процесса, не осознавая этого, почти полностью выливала всю ДНК в раковину. Когда я это осознала, я заплакала, а потом собрала друзей в баре, чтобы попрощаться с результатами трехмесячной работы[16]. Вообще говоря, выделение ДНК — одна из наименее точных процедур в моей исследовательской деятельности, и когда я задумываюсь об этом, мне становится не по себе.

Когда в начале 2000-х годов я работала над диссертацией, каждый раз после процедуры выделения ДНК на следующем этапе мы неизменно проделывали хитроумный трюк с помощью бактерии *Escherichia coli*. Эта бактерия, кишечная палочка, которую обычно называют просто *E. coli*, часто попадает в организм человека с немытым салатом и может вызвать кровавый понос, рвоту

**[16] Примечания: 16**

А еще я начала обдумывать, как обнародовать свой неудачный опыт в виде статьи, что и сделала впоследствии (Lloyd K. G. et al. *Quantitative PCR methods for RNA and DNA in marine sediments: Maximizing yield while overcoming inhibition*. FEMS Microbiol. Ecol. 72, 143–51 (2010)). Злость очень сильно повышает работоспособность.

и если не смерть, то острое желание умереть[17]. Она размножается со скоростью лесного пожара и умеет подбирать в окружающей среде гены, позволяющие ей ловко пробивать защиту нашей иммунной системы. Однако существуют штаммы *E. coli*, которые растут так же быстро и тоже поглощают гены из окружающей среды, но не могут нас заражать. Эти безвредные клетки благодушно соглашаются принять в себя последовательности чужой ДНК и создают миллионы ее копий, которые мы затем используем для секвенирования по методу Сэнгера. Этот подход называют созданием “библиотек клонов”, поскольку каждая последовательность ДНК происходит из отдельного клона *E. coli*.

Понятно, что если мы предоставим клеткам *E. coli* всю ДНК, выделенную из измельченных камней или подповерхностных жидкостей, то в результате получим разнородную смесь нужных и ненужных ДНК-фрагментов. Поэтому мы тщательно отбираем то, что давать *E. coli*. Чтобы выбрать из генетического бульона только один

**[17] Примечания: 17**

Автор говорит о патогенных штаммах, но большинство штаммов *E. coli* безвредны и присутствуют в любом организме. Безобидные кишечные палочки служат модельным организмом в биологии: именно благодаря им были открыты многие фундаментальные процессы в живых клетках. — *Прим. науч. ред.*

ген и получить достаточное количество его копий, мы сначала проводим ПЦР. Изобретение ПЦР сыграло важнейшую роль в революции исследований ДНК, поскольку это единственный способ получить достаточное количество молекул, чтобы с ними можно было работать. К сожалению, для проведения этой реакции необходимо много различных ферментов и мелких молекул. Если выделение ДНК вгоняет в депрессию, то ПЦР может сделать человека верующим. Я неоднократно видела аппараты для ПЦР, разукрашенные молитвенными флажками, маленькими алтарями или котиками, приносящими удачу. Вы спросите почему? Чтобы ПЦР сработала правильно, нужно выбрать из смеси ДНК один конкретный ген — это делается с помощью маленького фрагмента ДНК, называемого праймером, он состоит примерно из двадцати оснований. А еще нужна точно подобранная смесь компонентов и реагентов. Знаете, почему ПЦР может не получаться? Потому что в смеси слишком много соли, металлов и органических молекул. Знаете, почему еще ПЦР может не получаться? Потому что в смеси слишком мало соли, металлов и органических молекул. Создать идеальную среду для реакции невозможно по той простой причине, что невозможно извлечь

идеально чистую ДНК из той сложной смеси веществ, где она содержится. Бывает даже, что *сама ДНК* мешает проведению ПЦР. Вот почему каждая попытка провести ПЦР как минимум отчасти обречена на провал, и остается только надеяться (или молиться), что в образце достаточно ДНК, чтобы преодолеть влияние всех ингибиторов[18].

Невзирая на все сложности и на периодические ночные кошмары, настигавшие нас в процессе амплификации генов с помощью ПЦР, их клонирования в клетках *E. coli* и секвенирования по Сэнгеру, метод работал достаточно хорошо, чтобы мы осознали: разнообразие микробного мира намного превосходит разнообразие всей видимой жизни на нашей планете[1]. Однако такой подход имел свои ограничения. Прежде всего, он медленный. Мы были вынуждены описывать миллиарды микробных клеток, анализируя лишь несколько десятков последовательностей ДНК. Это все равно что описывать экологию дождевых лесов, наблюдая всего за четырьмя видами животных. Попытайтесь оценить общее число видов в дождевых лесах на основании списка,

**[18] Примечания: 18**

Моя коллега Эмили Флеминг-Нейстер из Чикагского университета в шутку говорит, что сокращение PCR (ПЦР) расшифровывается как *Pure Chance Reaction* (“абсолютно случайная реакция”).

состоящего из двух видов деревьев, одного вида обезьян и одного вида лягушек. Это статистически невозможно.

Примерно в таком состоянии находились исследования в области экологии микроорганизмов в начале 2000-х годов. С помощью ПЦР-праймеров и библиотек клонов мы обнаруживали невероятное разнообразие видов буквально во всех средах и поэтому успокоились в ложной уверенности, будто знаем их все. Но мы нашли не всех существующих микробов, далеко не всех[2]. Понять это нам помогла вторая революция в исследованиях ДНК.

## Вторая революция в исследованиях ДНК

Пока я корпела над созданием библиотек клонов, началось развитие многомиллиардной индустрии[19], вызванное необходимостью разработать более быстрые методы секвенирования большого количества ДНК с меньшим числом

**[19] Примечания: 19**

Исследования в области экологии микроорганизмов не имеют такой финансовой поддержки, которая позволяла бы делать большие технологические прорывы. Но исследования человеческого генома имеют. Спасибо вам, коллеги!

ошибок и с более низкой стоимостью в расчете на одно основание. Первый значительный прорыв сделала компания *Roche*, которая использовала метод так называемого 454-пиросеквенирования для получения десятков тысяч прочтений отдельной ДНК в образце. Этот метод открыл широкий путь для поиска новых видов микробов, поскольку научный прогресс больше не зависел от того, сколько колоний *E. coli* несчастный аспирант сумеет подцепить зубочисткой.

В середине 2000-х годов Джули Хьюбер и Митч Согин из Морской биологической лаборатории использовали новую технологию и определили последовательности генов примерно десяти тысяч микробов из литра океанской воды с большой глубины[3]. Чтобы вы поняли, насколько они опередили всех остальных, скажу, что в том же году я опубликовала статью с описанием генов примерно пятидесяти микробов из одного образца[4]. Джули и Митч осознали, что в морской воде содержатся тысячи микробов, которых нельзя обнаружить с помощью метода Сэнгера, поскольку их там очень мало. Каждый представитель этой так называемой редкой биосферы в подходящих условиях готов был дать начало более многочисленной популяции, однако все

они реагировали на разные изменения условий. В результате Джули и Митч пришли к немыслимому заключению: в мире существуют еще миллионы видов микробов, о которых мы даже не подозревали. Когда они впервые представили свои результаты на конференции, я услышала, как один из присутствующих достаточно громко заявил, что это полная чушь.

Поначалу тема редкой биосферы оставалась спорной — по той причине, что метод пиросеквенирования выдавал ошибки. Кстати, отчасти из-за этого меня не очень смущал тот факт, что в 2006 году я все еще по старинке пользовалась методом Сэнгера и клетками *E. coli*. В методе пиросеквенирования используется однонитевая ДНК, иммобилизованная на твердой поверхности. Но ДНК не любит оставаться в виде одной нити, она предпочитает сворачиваться в двойную спираль. Разделяя две нити, вы разделяете две группы оснований, и одна группа как будто кричит “Марко…” и ждет, что кто-то в ответ выкрикнет “Поло…” — и они опять найдут друг друга[20]. Но

**[20] Примечания: 20**

В Америке популярна детская игра, когда в бассейне один ребенок с закрытыми глазами пытается поймать других детей, выкрикивая “Марко”, тогда как остальные отвечают “Поло”. Эта же игра подходит для взрослых в состоянии алкогольного опьянения.

только в данном случае однонитевая ДНК кричит “AGTCCC…” и ждет, что кто-то ответит “…GGGACT”, чтобы воссоединиться. Дело в том, что основание A имеет тенденцию спариваться с T, а G — с C. Правильный порядок образуется по правилу, воспетому в знаменитой строчке из песни Мисси Эллиотт: “Нужно развернуть и перевернуть”[21].

Метод пиросеквенирования заключается в том, что при каждом связывании “Марко” и “Поло” происходит вспышка света, и это позволяет определять последовательность ДНК. Связывание оснований само по себе не сопровождается вспышками света, иначе наши тела постоянно искрились бы, а наш мир, к сожалению, не такой яркий. Вспышки света возникают благодаря смеси ферментов, которые используются в реакциях пиросеквенирования, причем один из них выделяют из брюшка светлячков. Хорош этот метод тем, что его можно автоматизировать: на крохотном чипе иммобилизуют миллионы различных фрагментов ДНК, промывают раствором, содержащим основания одного типа (например, G),

**[21] Примечания: 21**

Слова из песни Мисси Эллиотт *Work It*, написанной в 2002 году. В случае ДНК это называют принципом обратной комплементарности, но думаю, если бы ДНК открыли после 2002 года, мы бы назвали это принципом “разворот-переворот”, поскольку песня великолепная.

и фотометр высокого разрешения регистрирует место на чипе, где происходит вспышка (то есть где связывается основание G), а затем тот же процесс повторяют с другим основанием и так далее, еще и еще, проводя необходимое количество циклов со всеми четырьмя основаниями. Плохо то, что метод не работает для последовательностей ДНК с длинными повторами одного и того же основания. Учитывая это ограничение, многие исследователи с трудом верили в реальность всех тех редких последовательностей, которые обнаружили Джули и Митч. Это могло быть просто ложным световым сигналом ферментов из брюшка светлячков.

Скептический настрой развеялся благодаря исследованиям, проведенным компанией *Illumina*. Как и при 454-пиросеквенировании, в этом методе тоже используют иммобилизованную ДНК, которую амплифицируют в отдельных точках чипа, и излучение света. Однако в данном случае вспышки света контролируют тщательнее, так что проблем не возникает, даже если в последовательности есть участок из повторов. Так была решена основная проблема 454-пиросеквенирования и окончательно подтверждено существование редкой биосферы. Впрочем, ме-

тод, предложенный компанией *Illumina*, тоже иногда выдает ошибки по той простой причине, что он основан на определении местоположения миллионов светящихся точек на чипе размером с почтовую марку, что трудно осуществить с идеальной точностью. Однако небольшие недочеты качества анализа компенсируются тем, что исследователи получают гигантский массив данных и могут себе позволить отбросить сомнительные последовательности, сохраняя только самые достоверные.

## Результаты второй революции в исследованиях ДНК

Благодаря второй революции в исследованиях ДНК ученым уже не приходится оценивать общее количество видов животных в гипотетическом дождевом лесу на основании данных лишь о нескольких видах обезьян или деревьев. Теперь у нас есть информация о миллионах видов, позволяющая составлять обширные списки. Однако анализ этих новых, мощных баз данных привел к очень разным оценкам количества видов земных микробов — от миллиона до нескольких триллионов[5]. И этот разброс позволил нам понять

две вещи. Во-первых, вне зависимости от того, каким именно оценкам мы доверяем, в мире существует астрономическое количество микробов — намного больше, чем мы думали еще двадцать лет назад. А во-вторых, все оценки *ошибочны*. Абсолютно все.

Да-да, именно так: они *все* ошибочны. И уверена я в этом потому, что все подобные эксперименты проводятся с помощью амплификации методом ПЦР. Помните, что такое ПЦР? Прихотливый процесс, который ставит на колени отпетых атеистов?

Главная проблема всех методов секвенирования связана с необходимостью использовать ДНК-праймеры для выбора нужных нам последовательностей ДНК. Чтобы составить полный список всех микробов в конкретном образце, нам нужно подобрать ДНК-праймер, подходящий для всех видов микробов на Земле. По сути, праймеры определяют предварительный выбор последовательностей на основании предположения, что мы уже знаем, какую последовательность хотим найти. И это не очень хороший рецепт, чтобы обнаружить нечто новое.

Если использовать все ту же аналогию с дождевыми лесами, можно сказать, что применение

праймеров для описания всего разнообразия видов сравнимо с попыткой описать всех обитателей лесов при умении находить только крылатых существ. В дождевом лесу много животных с крыльями: птицы, насекомые, летучие мыши, белки-летяги, и даже некоторые растения имеют крылатые семена. Вообще говоря, в мире столько крылатых существ, что исследователь может ошибочно предположить, будто такой критерий отбора дает ему хорошее представление об общем разнообразии обитателей дождевых лесов. Однако на самом деле он ничего не будет знать о бескрылых жуках, муравьях, растениях, грибах, млекопитающих и земноводных, которые там живут. Он едва-едва коснется этого множества, но еще хуже, что он этого так и не поймет. И не узнает о собственной слепоте.

И поскольку все современные оценки общего разнообразия микробной жизни на Земле сделаны с помощью методов с использованием ДНК-праймеров, я с большой уверенностью могу сказать, что у нас нет правильного ответа. К счастью, новые технологии секвенирования ДНК обладают другим преимуществом: они позволяют получить такое большое количество последовательностей, что мы можем отказаться

от ПЦР вовсе и секвенировать любой фрагмент ДНК, который выделяем. А это даст нам более точные представления о разнообразии обитателей Земли. Такой анализ без использования ПЦР пока еще не применялся для этих целей потому, что секвенирование без ПЦР дает меньше таксономической информации, чем с ПЦР. Поскольку мы не нацеливаемся на какой-то конкретный таксономический ген, мы находим лишь небольшое количество таксономических маркеров в общем пуле всех остальных генов в образце. Однако в конечном итоге новые методы превзойдут старые.

Важнее, что новый метод высокопроизводительного секвенирования имеет еще одно преимущество, и это, возможно, самое значительное достижение революции в исследованиях ДНК: он позволяет предсказать образ жизни странных микробов. Анализ ДНК показывает, способен ли микроб формировать свои клетки только из диоксида углерода, как это делают растения, или поедает других, как это делают животные. Метод показывает, как клетки движутся, создают оболочку, защищаются, захватывают питательные вещества, выделяют отходы, дышат, реагируют на стресс, синтезируют антибиотики и многое другое. На основании последовательностей ДНК

мы можем предсказывать, какой пищей питаются обитатели земных глубин или образуют ли они споры — прочные структуры, сохраняющие клеткам жизнь в неблагоприятных условиях. Конечно, мы не вправе сказать наверняка, что эти гены делают именно то, что мы предполагаем. Даже если ген обитателя земных глубин похож на какой-то хорошо известный ген, он может работать иначе. Однако существуют способы для проверки наших предположений. Например, мы можем превратить ген в белок и определить его функцию в лабораторных условиях. Или, еще лучше, найти прямые доказательства его функции в природе. Если гены показывают, что микроб производит метан, мы можем отправиться к месту его обитания и проверить, есть ли там метан. И в результате мы определим возможный образ жизни обитателей земных недр исключительно на основании анализа ДНК и среды.

Теперь, возвращаясь с большим количеством замороженных образцов из горячих источников или буровых скважин в океанском дне, мы просто выделяем ДНК, отправляем ее на секвенирование и получаем последовательности миллионов коротких фрагментов ДНК, случайным образом рассеянных по геномам всех микробов в каждом

образце. Для большинства сегодняшних аспирантов кропотливая часть работы заключается не в отборе колоний *E. coli*, как это было у меня, а в биоинформатическом анализе. Биоинформатика — это общий термин для методов анализа и интерпретации терабайт последовательностей ДНК-фрагментов. Эти методы позволяют с помощью компьютерных алгоритмов определить локализацию крохотных фрагментов ДНК в геномах тех клеток, из которых их выделили.

В современной версии метода *Illumina* мы вынуждены секвенировать очень короткие последовательности ДНК. Но не лучше было бы секвенировать ДНК в ее исходном виде, а не собирать обратно последовательность, после того как мы ее целенаправленно разрушили? Кроме умения секвенировать только мелкие фрагменты, у современных методов секвенирования ДНК существует еще один недостаток: они на самом деле не анализируют ДНК непосредственно из образца. Они “видят” ДНК только тогда, когда делают копии копий исходных последовательностей. Если провести аналогию с книгами, наши современные технологии секвенирования ДНК — это чтение копий вместо оригиналов. Для копирования ДНК мы пользуемся природным

ферментом, который называют ДНК-полимеразой, причем этот фермент допускает некоторое количество ошибок. И в природных условиях это важно: изредка он позволяет встраиваться неправильным нуклеотидам — и возникают мутации, а без мутаций нет эволюции. Такие ошибки в копировании обеспечивают живым организмам великолепную возможность обзавестись перьями или хвостом, однако для точного прочтения последовательностей ДНК это недостаток.

К счастью, существует единое решение сразу обеих проблем: вынужденной работы с короткими фрагментами ДНК и вынужденного использования фермента, который синтезирует слегка искаженные последовательности. Нам нужно научиться секвенировать длинные последовательности ДНК. Однако это легче сказать, чем сделать. Современное решение — так называемое нанопоровое секвенирование. В технологии с применением нанопор ферменты используют не для создания копий ДНК, как в других методах, а для развертывания и разделения нитей ДНК, которые пропускают через крохотные отверстия в заряженной мембране. По мере того, как отдельная нить ДНК протягивается через одно из отверстий, аппарат определяет

и регистрирует проходящий нуклеотид по его влиянию на заряд мембраны. Это первый прямой способ секвенирования ДНК. А еще одно преимущество нанопорового метода в том, что с его помощью можно секвенировать длинные последовательности[22]. Как минимум теоретически эта технология когда-нибудь позволит в одно прочтение определить последовательность целого генома.

Однако пока нельзя сказать, что началась третья революция в исследованиях ДНК. Это все еще сравнительно новая технология, с бóльшим количеством ошибок в расчете на одно основание по сравнению с другими методами. Но она быстро совершенствуется, и я очень надеюсь, что уже скоро наступит день, когда мне больше не понадобятся сложные компьютерные алгоритмы, чтобы собрать воедино те кусочки ДНК, которые я сама же накромсала для проведения секвенирования.

Два этапа в революции исследований ДНК,

---

**[22] Примечания: 22**

К сожалению, нанопоровое секвенирование, избегая ошибок ДНК-полимеразы, используемой в методе *Illumina*, подвержено еще более ошибочному определению заряда. В настоящее время ученые часто используют сочетание этих двух методов: прочитывают длинные последовательности ДНК нанопоровым методом, а потом корректируют его ошибки благодаря прочтению той же последовательности методом *Illumina*. — *Прим. науч. ред.*

которые мы пережили за время моей научной работы, изменили правила игры. Они отменили ограничения традиционных лабораторных методов микробиологии. Как мы увидим в следующем разделе книги, новые знания, полученные с помощью этих современных технологий, навсегда изменили наши представления о жизни на Земле.

# Часть II
# Как обитатели земных глубин меняют наше понимание жизни на планете?

# Глава 4
# Люди и другие растения

Революция в исследованиях ДНК показала, что на нашей планете обитает какое-то немыслимое количество видов живых существ. Однако еще она показала, насколько эти неизвестные доселе существа отличаются в эволюционном плане от тех, что мы знали раньше. Сравнимо ли по масштабу наше открытие с обнаружением нового вида обезьян? Или оно намного важнее и сопоставимо с обнаружением всех позвоночных животных? В этой главе я опишу странные новые формы жизни, найденные нами в глубинах Земли, и даже расскажу, как вы можете найти их самостоятельно, если вам это интересно.

## Новая ветвь на древе жизни

Когда в 2001 году я начала работать над диссертацией в Университете Северной Каролины, я очень скоро поняла, что ДНК становится мощным инструментом в охоте за организмами, обитающими под поверхностью Земли, и открывает нам

новые возможности для исследований, которых еще за несколько лет до того не существовало. Однако это было самое начало революции ДНК, и мы должны были выбрать, какой ген использовать для идентификации новых организмов.

Откуда мы знали, какой ген следует искать? Чтобы ответить на этот вопрос, нам нужно вкратце обсудить суть эволюционного процесса. Любая живая клетка, чтобы жить и делиться, должна копировать свою ДНК, однако при копировании клеточный аппарат часто допускает ошибки[23]. Эволюция может происходить, если эти ошибки дают организму какое-либо преимущество, так что его потомки оказываются более успешными и передают эту ошибку далее своему потомству. Таким образом мутировавший ген закрепляется в популяции. Однако не все гены переносят неточное копирование. Любая неточность в жизненно важных генах летальна для организма, и такая мутация не будет передана потомству. Именно гены такого типа, стойко сопротивляющиеся

**[23] Примечания: 23**

Некоторые мутации возникают из-за ошибок ДНК-полимеразы при копировании ДНК, как я описывала в предыдущей главе, но есть и другие причины: отдельные фрагменты ДНК случайным образом перекрещиваются друг с другом, нити ДНК разрезаются ферментами, а также повреждаются из-за ультрафиолетового излучения и активных химических веществ.

эволюционным изменениям, мы и должны были исследовать, чтобы определить положение организма на древе жизни. Последовательности таких генов отражают эволюционную историю организма, а не только изменения, дающие преимущество в текущий момент.

Для нас с моим научным руководителем Андреасом Теске выбор был очевиден: нужно анализировать ген 16S рибосомной РНК (рРНК). В 1980-е годы Карл Вёзе и сотрудники его лаборатории по этому гену установили таксономию микроорганизмов, а в начале 2000-х его стали использовать при анализе повсеместно. Что такого особенного в этом гене? Он кодирует компонент рибосомы, который важен для любой клеточной активности, и поэтому даже незначительное изменение нуклеотидов (скажем, замена А на Т) в определенной части гена может привести к гибели дочерней клетки. По этой причине данная последовательность остается почти без изменений по сравнению с остальным геномом. И хотя ген 16S рРНК не абсолютно стабилен, скорость его изменений такая низкая, что даже за 3,8 миллиарда лет существования жизни на Земле все живые существа на планете сумели сохранить ту или иную его версию. Насколько нам известно,

ни одно живое существо не избавилось от него полностью.

Заманчиво, конечно, было бы живописать вам, как я глядела в сверкающий иллюминатор батискафа и одновременно с помощью этого гена обнаруживала ранее неизвестные формы жизни. Но все происходит иначе. После возвращения с корабля на берег требуются месяцы работы для секвенирования ДНК. На самом деле я часами сидела на старом, видавшем виды стуле в аспирантской комнате без окон и загружала файлы с последовательностями генов 16S рРНК. Выглядели они примерно так:

>DQ521765.1 Ген 16S рРНК из некультивированного клона археи SURF-GC205-Arc3, частичная последовательность

cccgactgctatttgggtgaggataagccatgc
gagttgaatgggaaacctaaagttcccatg
gcaaactgctcagtaacacatgatcaact
taccctatagagaaaaataacctcgggaaactgag
gataatgtttcatagttgaattggcttg
gaaaagtttttcgacgaaaggggtaaaaaaaatg
gtttttatccgctataggataggatcgtgttcgat
tatggttgttggtgagataatggctcaccaagcc
gataatcgataggggccgtgagagcgggagccccga

gatgggtactgagacaacgacccaggccttacgag
gcgcagcaggcgcggaacctccgcaatacac
gaaagtgtgacggggttacccaaagtgttc
aatagaactgtggtaggtgagtaatgtcccctac
tagaaaggagagggcaaggctggtgccagccgccgc
ggtaaaaccagctcttcaagtggtcgggataat
tattgggcttaaagtgtccgtagccggtttagta
agttcctggtaaaatcgggtagcttaactatctgcat
gctaggaatactgctatactagagggcgggagag
gtctgaggtactacaggggtaggggtgaaatctta
taatccttgtaggaccaccagtggcgaaggcgt
cagactggaacgcgcctgacggtgagggacgaaagc
caggggagcgaaccggattagatacccggg
tagtcctggccgtaaacgatgcatactaggtgatgg
tacggccatgagctgtatcagtgccgtagggaaaccg
ttaagtgtgccgcctgggaagtacggtcgcaaggc
taaaacttaa

>DQ521781.1 Ген 16S рРНК из некультивированного клона археи SMI1-GC205-Arc38, частичная последовательность

ggaggtcactgctattgggattcgactaagccatgc
gagtcgagagggttcggccctcggcgaactgctcag
taacacgtggataatttgcccttaggtggaggata
acctcgggaaactgagaataatactccatagatc
taggatgctggaatgcacttagattaaaagctccg

gcgcctaaggataagtctgcggactatcaggttg
tagtcagggtaaagacctgactagcctacaacg
gatacgggttgtgagagcaataacccggagac
gatatctgagacacgatatcgggccctacggggcg
cagcaggcgcgaaaccttcgcactgtgcgaaagcgc
gatgaggggatcccaagtgcttgctcgtaagagta
agctgtttttatgtctaaaaagcatagagagta
agggctgggtaagacgggtgccagccgccgcggta
atacctgcagctcaagtggtgatcattattatt
gggcctaaaacgtccgtagccggtttggtaaat
gcctgggtaaatcgtgtagcttaactatacgaattc
cgggtagactgccaaacttgagaccgggagaggc
tagaggtactcctggggtagaggtgaaattctgta
atcctaggggaccaccagtggcgaaaggcgtc
tagctagaacgggtctgacggtcagggac
gaagccctggggcgcgaaccggattagatacccggg
tagtccagggtgtaaacgctgcttgcttgatgt
tagttgggcttcgagcccaattagtgtcggagaga
agttgttaagcaagctgcctgggaagtacggtcg
caagactgaaacttaaaggaattggcgggggagca
cagcaacgggtggagcgtgcggtttaattg
gattcaacgccggaaaactcaccggaggcgacggt
tacatgaaggccaggctgatgaccttgcctgattt
tccgagaggtggtgcatggccgccgtcagttcgtac
cgtaaggcgttctgttaagtcagataacgaacgaga
ccctcatctttaattgctactagtaagtccgct

tactgggcacattagagagaccgctggcgataagt
cagaggaaggcgggggcaacggtaggtcagtat
gccctgaatcctccgggctacacgcgcgcta
caaaggctaggacaatgagtttcaacaccgagaggt
gaaggtaatctcgaaacctagttatagttcggatt
gagggttgaaactcaccctcatgaagctggaatccg
tagtaatcgcagatcaaaatcctgcggtgaatat
gcccctgctccttgcacacaccgcccgtcaaaccat
gcgagttgggtttgagtgaggatgtagtttttgc
tacgttcaaacttaggcttagtaagcggggtt

Вряд ли такая работа станет темой для фильма Майкла Бэя[24], но меня она очень увлекает. Представленные выше последовательности — это фрагменты генов 16S рРНК из двух микробов, содержавшихся в образцах, которые мы подняли с глубины около девятисот метров в Мексиканском заливе. Для чтения таких последовательностей мы используем компьютерную программу, которая сравнивает их с генами из базы данных, например той, что хранится в Национальном центре биотехнологической информации (NCBI, *National Center for Biotechnology Information*), и определяет, с какими из них имеется макси-

**[24] Примечания: 24**

Майкл Бэй — американский кинорежиссер и продюсер, один из самых кассовых режиссеров в мире. — *Прим. перев.*

мальное сходство. Вы можете проделать это самостоятельно прямо сейчас, если хотите. Наберите *NCBI blast* в поисковой строке в интернете, выберите первый выпавший результат, потом на сайте, который откроете, выберите функцию *Nucleotide BLAST* или *blastn*, скопируйте одну или обе последовательности, которые я привела выше, вставьте их в поле *Enter Query Sequence* и нажмите кнопку BLAST, которая обозначает *Basic Local Alignment Search Tool* (“базовый инструмент для поиска локального выравнивания”). И вуаля, теперь у вас есть список генов из базы данных, которые больше всего похожи на эти два гена. Первыми должны выпасть эти же самые последовательности, поскольку я уже подала запрос на их включение в базу данных. А вообще вы получите список из нескольких последовательностей генов 16S рРНК разных организмов, которых другие исследователи обнаружили в разных океанах, — просто кликните на какую-то из них, и вы увидите ее описание. Трудно переоценить, в какой степени эти новые инструменты упростили доступ к информации о ДНК: любой человек в любом месте, фактически без каких-либо специальных навыков, может найти любую последовательность ДНК, имеющуюся в

открытых базах данных, и оценить ее сходство с другими последовательностями из других мест.

В первый раз, когда я запустила программу поиска для двух последовательностей, приведенных выше, компьютер выдал список, где не было никаких известных микробов. Ближайшее сходство наблюдалось с последовательностями ДНК из образцов, отобранных другими учеными где-то глубоко в море[25]. Проверка следующей по сходству последовательности дала такой же бессмысленный результат. И следующая за ней — тоже. Почти все последовательности, которые мы выделили из наших образцов, поднятых с морских глубин, не имели никакого сходства с ДНК известных организмов. Это была совершенно другая ДНК из другой среды. Мой лабораторный журнал заполнен списками идентификаторов этих случайных фрагментов ДНК, не несущих никакой осмысленной биологической информации.

В какой-то момент я стала сомневаться, действительно ли эти мои последовательности

**[25] Примечания: 25**

На момент написания книги ситуация не изменилась, но, быть может, в тот момент, когда вы запустите поиск, в базе данных NCBI уже будет информация о чистых культурах, и тогда вы увидите названия организмов.

принадлежат реальным существам. Может быть, я анализировала ДНК, которая свободно плавала в воде и осталась от каких-то мертвых клеток, разрушившись до неузнаваемости? На самом деле "голая" ДНК действительно может сохраняться удивительно долгое время. В частности, если вы зачерпнете ведро морской воды (без рыбы), то сможете определить последовательности фрагментов ДНК рыб, которые недавно через эту воду проплывали. Это хорошая новость для людей, отслеживающих популяции рыб, но плохая для тех, кто анализирует последовательности ДНК, чтобы узнать о живых организмах, незаметных для человеческого глаза. Я испугалась, что просто гоняюсь за призраками.

В этом и заключается парадоксальность стремления к монументальным открытиям. Если кроме вас никто этого открытия не сделал, с большой вероятностью его и нет, это пустышка. Вполне возможно, просто бессмысленный статистический выброс. Если вы действительно обнаруживаете нечто чрезвычайное, скорее всего, другие люди тоже это видели. И поэтому, хотя мы и прославляем авторов великих открытий, часто самые значительные открытия по своей природе коллективные. К счастью, мое

аспирантское “открытие” было результатом коллективного труда. Иными словами, оно было реальным.

Пока я сидела за компьютером, сотни других ученых по всему миру делали то же самое (надеюсь, хотя бы у кого-то из них в помещении были окна). Когда я проанализировала ближайшие совпадения с генами из базы данных NCBI, я обнаружила, что последовательности длиной примерно в девятьсот оснований A, G, C и T из осадочных пород со дна Мексиканского залива очень сильно походили на последовательности, найденные другими людьми на дне Южно-Китайского моря, в солончаках Великобритании и в глубоководных впадинах Японии. Сходство между нашими последовательностями было слишком велико, чтобы оказаться случайным совпадением. Итак, мои последовательности ДНК не были бесполезным молекулярным мусором. Мы с моими коллегами по всему миру открыли ДНК из живых организмов, находящихся на древних ветвях древа жизни, о существовании которых никто даже не подозревал.

## Мы неправильно представляли себе древо жизни

Чтобы понять смысл наших исследований, давайте обсудим, что нам было известно о древе жизни в то время, когда мы сделали наши открытия. В 1970-е годы живые организмы принято было подразделять на пять царств: животные, растения, грибы, протисты и монеры. В значительной степени эта классификация опиралась на исследования Линн Маргулис (1938–2011)[1]. В такой схеме археи[26] и бактерии объединялись в царство монер, поскольку считалось, что они составляют единую ветвь древа жизни, эквивалентную остальным четырем ветвям. Такое деление на пять царств стало доминирующей концепцией и вошло в большинство учебников биологии.

Однако в конце 1980-х Карл Вёзе (1928–2012) и его коллеги поняли, что деление на пять царств ошибочно[2]. Они провели секвенирование генов из организмов, которых называли метаноген-

**[26] Примечания: 26**

Отметим, что в то время о существовании архей еще никто не знал. — *Прим. науч. ред.*

ными бактериями (а теперь их называют метаногенными археями или просто метаногенами), использовав гены 16S рРНК, что побудило меня и моих коллег использовать эти же гены в нашей работе через несколько десятилетий. Сравнив эти последовательности с последовательностями из “обычных” бактерий, таких как *E. coli*, они обнаружили удивительно слабое сходство. Считалось, что эти организмы относятся к одному царству, однако родство между ними оказалось не ближе, чем между ними и людьми, растениями или грибами. Археи представляли собой нечто совершенно новое. И поэтому Вёзе предоставил им отдельную ветвь на древе жизни и назвал их доменом, так он и его коллеги обозначали таксономические группы, расположенные выше царств. Затем он поместил бактерий на другую ветвь и назвал их вторым доменом. И наконец, объединил остальные четыре царства (по сути, всех видимых обитателей Земли) в третий домен — эукариот. Наверное, вы понимаете, что это понравилось не всем биологам.

Многих ученых чрезвычайно раздражал такой захват древа жизни микроорганизмами. В 1998 году биолог Эрнст Майр (1904–2005), протестуя против классификации Вёзе, выразил мнение

многих своих коллег:

Геном эукариот на несколько порядков превосходит геном прокариот [архей и бактерий]… И это касается не только генетической программы для ядра и митоза, но и способности к половому размножению, мейозу и созданию невероятного органического разнообразия, представленного медузами, бабочками, динозаврами, колибри, дрожжами, гигантскими водорослями и гигантскими секвойями. Я не понимаю, как можно пренебречь всем этим и утверждать, будто разница между двумя типами бактерий имеет такой же масштаб, как разница между прокариотами и удивительным миром эукариот[3].

Он был прав. Разглядывая под микроскопом две маленькие точки, трудно поверить, что они имеют между собой меньше общего, чем гриб и павиан, или дерево и акула, или слизевик и мой дядюшка, а ведь все они относятся к эукариотам.

Но теперь нам известно, что Майр кое-чего не знал. Дело в том, что он не учитывал фактор времени. Клетка бактерии и клетка археи под микроскопом похожи друг на друга, однако они эволюционировали независимым образом миллиарды лет. Напротив, большинство мно-

гоклеточных форм жизни, которые, как считал Майр, являются ярчайшим проявлением диверсификации, эволюционировали лишь около полумиллиарда лет. Этого времени достаточно, чтобы создать сотню вариантов ног, отрастить крылья или научиться выбрасывать желудок через рот, чтобы поймать ужин и засосать его вместе с желудком обратно внутрь тела (так делают черви сипункулиды), но все это лишь косметические модификации. Гораздо более внушительная эволюционная пропасть лежит между умением дышать кислородом (как делают 100 % многоклеточных эукариот) и умением дышать различными химическими соединениями (как бактерии и археи), поскольку для изменения способа дыхания требуются модификации основных принципов функционирования жизни.

Сам факт, что археи и бактерии начали эволюционировать на три миллиарда лет раньше, чем животные, позволяет предположить, что на их долю приходится максимальное разнообразие жизни на Земле. Но в 1998 году было трудно согласиться, что микробы занимают доминирующее положение по разнообразию среди всех живых организмов. Майр продолжал: “Насколько я понимаю, на сегодняшний день описано лишь

около 175 различных видов [архей]. Вполне вероятно, что в ходе будущих исследований удастся обнаружить тысячи, но вряд ли больше. Нам известно приблизительно 10 тысяч [бактерий]. А число видов эукариот, судя по всему, превышает 30 миллионов. Иными словами, оно на несколько порядков больше”[4].

Мне немного неловко критиковать Эрнста Майра. Он не мог воспользоваться достижениями революции в изучении ДНК, которые доступны нам теперь, а самого его уже нет, так что защищаться он не может. Если бы в 1998 году я не была девятнадцатилетней студенткой, ведрами поглощавшей “Гиннесс” во время обучения в Ирландии, а оказалась в его положении, вполне возможно, я пришла бы к таким же выводам. Однако теперь мы обладаем мощными методами секвенирования, а не теми слабыми возможностями, какие были у Вёзе, и мы точно знаем, что количество видов бактерий и архей составляет как минимум десятки миллионов (Майр считал, что это невозможно), а их реальное число почти наверняка на несколько порядков больше. Теперь количество известных нам бактерий и архей превышает количество эукариот.

Конечно, для корректного сравнения нужно

дать определение термину “вид”, которое было бы применимо ко всем доменам, однако у нас такого определения нет. В настоящее время видом растений или животных называют группу организмов, которые не могут производить потомство с представителями других групп половым путем. Да, львы и тигры, в принципе, могут скрещиваться и производить на свет очаровательных детенышей, однако в естественных условиях они не спариваются, а значит, относятся к разным видам. К сожалению, это определение неприменимо к археям, бактериям, протистам и грибам, которые преимущественно размножаются бесполым путем, то есть без участия партнера[27]. В микробиологии определение вида основано на способах функционирования или генетических особенностях. Обычно у представителей одного вида более 70 % генома должны быть идентичны, а гены 16S рРНК должны совпадать более чем на 97 %[28]. Если применить такое правило к жи-

**[27] Примечания: 27**

На самом деле многие растения и животные тоже используют бесполый способ размножения. Тля, поселяющаяся на садовых растениях, настолько преуспела в бесполом размножении, что может рождаться беременной! (Moran N. A. *The evolution of aphid life cycles*. Annu. Rev. Entomol. 37, 321–48 (1992).)

**[28] Примечания: 28**

Это немного устаревший стандарт. Сейчас для разграничения видов используют показатель 98,7 %. — *Прим. науч. ред.*

вотным, количество их видов резко сократится, поскольку у всех животных значительная часть ДНК фактически одинакова. Все мы, представители ветви животных на древе жизни, дышим кислородом и питаемся органическими соединениями углерода, и поэтому наши геномы не так разнообразны, как у бактерий и архей. Учитывая эти объективные различия в определениях вида в мире микробов и в мире животных и растений, пока сложно сравнивать между собой эти домены.

Альтернативный способ подсчитать группы организмов в каждом из трех доменов заключается в том, чтобы рассмотреть более высокий уровень таксономической классификации, чем вид, — например, тип. Таксономическая иерархия строится следующим образом: домены, царства, типы, классы, порядки, семейства, рода и виды. К счастью, теория трех доменов не меняет этот порядок, а просто вводит уровень “доменов” и располагает его выше уровня “царств”. Эта иерархия помогает понять, как давно родственные ветви разошлись друг от друга. Два вида могли разделиться сравнительно недавно — к примеру, всего несколько сотен лет назад. Напротив, два типа должны были разделиться миллиарды лет назад.

Поскольку с течением времени эволюционные изменения накапливаются, два вида одного и того же рода должны походить друг на друга в большей степени, чем два вида разных типов. А что, если мы теперь отложим вопрос о сравнении видов внутри каждого домена и поднимемся выше по иерархической лестнице? Что, если мы сравним количество типов? Определение типа дать еще сложнее, чем определение вида, но, поскольку типы охватывают гораздо более протяженные эволюционные периоды, они гораздо важнее для биологического разнообразия.

На сегодняшний день мы выделяем как минимум 27 типов архей[5] и 95 типов бактерий[6], хотя в эпоху быстрого секвенирования ДНК эти числа постоянно увеличиваются. В соответствии с альтернативным филогенетическим методом, предложенным микробиологом Филом Гугенгольцем и его коллегами из Австралии, мы имеем 18 типов архей и 148 типов бактерий. Что же касается эукариот, нам известно 75 типов, однако растения, животные и грибы, столь милые сердцу Майра, составляют лишь два из них, а все остальные — это одноклеточные организмы, которых раньше в системе из пяти царств называли протистами[7].

С учетом этой новой информации можно заключить, что глаза обманули Эрнста Майра: микробы, в частности археи и бактерии, демонстрируют гораздо более широкое эволюционное и функциональное разнообразие, чем эукариоты. Прошедшие 3,8 миллиарда лет не были потеряны для развития жизни на Земле. Жизнь активно эволюционировала. И в значительной степени этот процесс происходил среди обитателей земных недр, которых я пыталась исследовать во время своей аспирантской работы.

Наши результаты ошеломляли: добытые нами последовательности ДНК показывали, что речь идет о новых типах организмов. Всего за одно погружение мы обнаружили типы, которые до нас никто не описывал[29]. Если мы нашли их с такой легкостью, следовательно, их должно быть намного больше. Внезапно мы поняли, что Вёзе открыл лишь вершину айсберга. Домены бактерий и архей имеют гораздо больше глубоких ветвей, чем ученые могли разглядеть с помощью старых технологий, а некоторые организмы во-

**[29] Примечания: 29**

Эти новые типы были названы Thermoplasmatota и Lokiarchaeota, и я хочу подчеркнуть, что мы были не единственными, кто их нашел, информация о них стала появляться по всему миру. В главе 9 я расскажу, как обнаружение Lokiarchaeota изменило наши представления о древнейшей жизни на Земле.

обще с трудом вписываются в какой-либо из трех доменов. Они настолько странные, что грозят сломать трехдоменную структуру древа жизни, которая получила широкое признание лишь несколько лет назад.

Недавно я просматривала свой текст, который готовила к публикации, и обнаружила, что случайно написала такую фразу: “Микробы из земных недр отличаются от *людей и других растений*”. Фраза странноватая, но в целом ожидаемая. Если вы проводите столько же времени, как я, разбираясь в эволюционных связях между всеми живыми существами на Земле, то постоянно убеждаетесь, что на фоне широчайшего разнообразия микробов люди и растения не так уж сильно друг от друга отличаются. Метод прямого секвенирования ДНК из природных образцов настолько мощный, что открытие новых видов организмов становится таким же будничным делом, как приготовление обеда или мытье машины. Я бы делала это каждый день, если бы могла достаточно быстро получать последовательности ДНК. Но дело в том, что подавляющее многообразие жизни на Земле обеспечивают микроорганизмы, причем большинство из них остаются для нас невидимыми, и поэтому люди

живут рядом с ними, не подозревая об их существовании. Словно рядом с нами постоянно пасутся волшебные единороги, совсем крохотные, одноклеточные — но при этом гораздо более интересные, чем рогатые лошади.

Что делать после того, как вы поймали единорога?

Сами по себе эти открытия потрясали, но в целом, если честно, складывалась непонятная картина. Как будто вы обнаружили инопланетянина, поскольку получили распечатку со словами “Это инопланетянин”. Если бы найденные нами последовательности ДНК имели сходство с последовательностями известных организмов, по имеющимся данным мы могли бы представить себе их способ существования под землей. Однако мы находились в полном неведении: никаких изображений, никаких космических кораблей, никакой телепатии. Несколько разочаровывает, правда?

Нам нужно исследовать этих новых существ, но мы не можем просто взять бинокль и наблюдать, как они гоняются за добычей или жуют листья. У нас нет возможности ставить на них эксперименты в лаборатории, поскольку, как я упоминала, до последнего времени нам не удава-

лось выращивать их в лабораторных условиях. Требовался какой-то грандиозный прорыв. Нам нужно было изобрести новый подход к изучению их физиологии.

В соответствии с современным методом научных исследований, разработанным Фрэнсисом Бэконом (1561–1626), мы должны строго контролировать все параметры экспериментальной системы и иметь возможность изменять их по отдельности для проверки своих гипотез. К сожалению, в случае организмов из земных глубин этот подход малопригоден. Поскольку лишь очень немногих из них удается вырастить в лабораторных условиях, нам приходится изучать их там, где они живут: в их природном окружении, где все беспорядочно и хаотично. Меня никто не учил проводить научные исследования в таких условиях, когда ты ничего не можешь контролировать. Чтобы изучить этих подземных жителей, нам нужно выйти из научной зоны комфорта. Ведь мы не контролируем даже то, с какими именно организмами экспериментируем! К счастью, в нашем распоряжении появились новые фантастические методы, позволяющие извлекать максимальное количество информации в таких неопределенных условиях, от чего

Фрэнсис Бэкон пришел бы в замешательство. И как известно, при прокладывании нового пути неизбежны ошибки.

В ноябре 2006 года мы с моим другом и коллегой Говардом Мендловицем отправились на лодке к устью реки Уайт-Оук, неподалеку от тех мест, где я выросла. Я залезла в воду по самую шею и отобрала образцы ила для диссертации. Если бы мне нужна была только ДНК подземных обитателей, я взяла бы лишь немного ила, что легко, и отвезла бы его в лабораторию. Но мне хотелось узнать больше, чем просто последовательности ДНК. Я жаждала понять, что эти организмы делают в природе. А потому мне нужно было заполнить много кернов метровой длины, чтобы по химическому составу компонентов на разных уровнях обнаружить слабые следы жизнедеятельности этих существ и проверить гипотезы об их активности. Извлекать образцы предстояло вручную — для этого проекта у меня в распоряжении не было ни погружных устройств, ни океанских судов.

Поскольку место мне было так хорошо знакомо, я не предполагала, что меня может подстерегать хоть какая-то опасность. Здесь неподалеку жил мой отец, когда я была маленькой. Стоял солнеч-

ный осенний день. Я надела гидрокостюм, но даже в нем почувствовала холод, когда погрузилась в воду. Говард предложил мне сделать паузу и пойти согреться, но я не согласилась. Люблю проявлять стойкость. Я вытаскивала один керн за другим, пока Говард наконец не свесился за борт и не посмотрел мне в глаза. Он сказал, что я начала работать неэффективно. Я пыталась вытянуть керн, который погрузила в осадочные породы, но у меня никак не получалось его извлечь. Тогда я залезла в лодку и с удивлением наблюдала за своими бедрами, которые дрожали независимо от всего остального тела.

Говард поглядел на меня и сказал: “Думаю, лучше выгрузить тебя на берег. Закрой последнюю пробу, и отправимся”. Я попыталась натянуть изоленту на мокрый пробоотборник, но не смогла вспомнить, как это делается. Говард посмотрел на меня, как на сумасшедшую: “Карен, ты не сможешь заклеить мокрый пластик, сначала высуши керн, как мы делали со всеми остальными”.

К тому моменту меня уже всю трясло, так что Говард решил ускорить процесс и скомандовал: “Набери в ведро воды и плесни в лодку, чтобы смыть грязь, и мы отплывем”. Я отчетливо помню, как опустила в воду пустое ведро дном вниз,

не попытавшись его наклонить. Я глядела на него и удивлялась, почему вода не заливается внутрь. Тогда Говард сказал: “Забудь про лодку, просто немедленно надень теплые вещи!” Я разделась до купальника и увидела свои бледные ноги цвета яичной скорлупы. Их состояние было близко к трупному окоченению, поэтому я попыталась обуться. Прежде чем отправиться к берегу, Говард взглянул на меня еще раз и проорал: “Карен, *сначала штаны, потом ботинки!*”

Из-за упрямства и недооценки серьезности ситуации я довела себя до первой стадии переохлаждения. Поначалу я говорила себе: “Ну ладно, потерпи, ты просто немножко замерзла”, но потом почувствовала настоящую опасность. Спасибо Говарду: я благополучно вернулась на берег и отогрелась в теплом грузовике. Но мое необдуманное решение в тот день сказалось на результатах работы: мои керны были слишком короткими, чтобы из них можно было извлечь пользу. Я описала их в диссертации, но никакой новой информации они не дали и о них нельзя было написать в статье для рецензируемого журнала. Теперь, когда я провожу исследования в экспедициях (неважно, спускаюсь ли в глубины океана или лениво плещусь в залитом солнцем

пруду), я прокручиваю в голове все возможные ситуации и стараюсь принимать такие решения, которые снижают риск. Никакие образцы не стоят моей жизни.

В ходе работы над диссертацией я много раз возвращалась в устье реки Уайт-Оук — в гораздо менее драматичных условиях. Но при анализе результатов я делала другие ошибки. Всю свою работу я посвятила поиску одного подземного микроба, который может метаболизировать метан и не слишком сильно отличается от ранее известных организмов. Но постепенно мне стало ясно, что это неправильный выбор. В моих образцах ила преобладало еще более странное существо, чем то, которое я пыталась обнаружить: представитель нового типа организмов, до этого его находили только в озерах бореальных лесов[8], в отложениях на океанском дне[9] и в золотоносных шахтах Южной Америки[10]. Фумио Инагаки из Японского агентства науки и технологий моря и суши (JAMSTEC, *Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology*) назвал этот тип “смешанной группой кренархеот” (*Miscellaneous Crenarchaeotal Group*, MCG), будто это какая-то папка с разрозненными файлами. Я работала совсем не в экзотическом месте, а просто в устье

реки с нормальными условиями температуры, давления и pH, но эти выходцы из иного мира были там самой многочисленной группой. Я гонялась не за теми призраками. Следовало искать именно MCG.

Мы нуждались в информации — хоть какой-то, чтобы понять способы существования этих MCG. После защиты диссертации я думала, где бы поработать постдоком[30], и как раз в это время Бо Баркер Йоргенсен из Орхусского университета в Дании предложил: “Меня MCG тоже очень заинтересовали. Почему бы тебе не перебраться в Данию и не поработать со мной? Попытаемся полностью отсеквенировать их геномы”. Мы сходились во мнении, что сочтем свою работу успешной, если нам удастся прочесть последовательность хотя бы *одного* гена (кроме 16S рРНК), который мы однозначно смогли бы идентифицировать как принадлежащий этим странным организмам. Но сказать легче, чем сделать, ведь процесс секвенирования не позволяет понять, какой ген какому организму принадлежит.

---

**[30] Примечания: 30**

В нашей области исследований после защиты диссертации принято проводить несколько лет в качестве постдока в какой-нибудь лаборатории. В этот период вы углубленно занимаетесь наукой и ищете постоянную научную позицию.

Наш план заключался в том, чтобы выделить из смеси индивидуальную клетку, так чтобы после секвенирования ДНК мы точно знали, что все гены принадлежат именно этому организму. Однако такой подход никогда раньше не применяли для анализа образцов ила. И отделять крохотные клетки от таких же крохотных кусочков грязи — задача не из легких. Когда я приехала в Данию, моя первая задача состояла в том, чтобы помочь Бо приобрести недавно изобретенный лазерный микродиссекционный микроскоп, который позволил бы нам вырезать одну крохотную клетку из фильтра, перенести в пробирку и прочесть ее геном.

Честно говоря, еще более срочная задача для меня заключалась в том, чтобы научиться спрашивать по-датски: “Где тут родильное отделение?”, ведь я была на пятом месяце беременности. Мне повезло, поскольку Дорте Петерсен, которая тоже была постдоком и работала вместе со мной над общим проектом, также была беременна. Из-за тикающих у нас в животах часов мы с Дорте работали как сумасшедшие, вместе с нашим небеременным коллегой Ларсом Шрайбером. Однако наши малыши одержали верх над технологией. К моменту их появления на свет мы все еще не

знали, как предотвратить вымывание вырезанных лазером клеток под действием статического электричества.

В Дании у молодых матерей длинные отпуска, и поэтому у меня и моих коллег было достаточно времени, чтобы пересмотреть наши методы. Мы слышали о новой технологии, предложенной Рамунасом Степанаускасом из Океанологической лаборатории Бигелоу в штате Мэн, с помощью которой удавалось амплифицировать геномы многих одноклеточных организмов. Единственная загвоздка заключалась в том, что Рамунас работал с морской водой, и ужасно дорогой аппарат для так называемой флуоресцентно-активируемой сортировки клеток, который он использовал, вышел бы из строя при попадании в него мельчайшей частицы грязи. А наши образцы *и были грязью*. Тем не менее нам казалось, что метод сортировки единичных клеток стоит опробовать, и поэтому мы с Дорте оставили годовалых детей в надежных руках наших мужей и полетели в Мэн, чтобы поговорить с Рамунасом. Он моментально понял, насколько важно испытать его технику для изучения странных организмов из земных глубин. После некоторого размышления он заявил: “Чем черт не шутит, давайте

попробуем”. И мы выслали ему образцы ила, извлеченные со дна залива Орхус в Дании[31].

Не более чем через месяц Рамунас прислал нам десятки маленьких пробирок, в которых содержалась размноженная ДНК из индивидуальных клеток. Сбылась моя мечта! Мы принялись как можно быстрее секвенировать все геномы, а Ларс разрабатывал метод анализа геномных данных, поскольку с организмами такого типа никто раньше не работал.

Анализ списка генов походил на чтение древних свитков, с той только разницей, что древним свиткам обычно не больше нескольких тысяч лет. А эти гены принадлежали организмам, появившимся миллиарды лет назад, и мы были первыми, кто их увидел. Мы с Бо отринули свой минималистичный план “хотя бы один ген”. Теперь у нас их были тысячи.

Мы сразу обратили внимание на необыкновенную странность большинства из этих генов, толком ничего не было понятно. Даже сегодня подавляющая часть этой “геномной темной материи” остается абсолютно неизученной. В

**[31] Примечания: 31**

Я подумала, что, если микробы этого типа в изобилии встречаются у берегов Северной Каролины, их должно быть немало и у берегов Дании, и оказалась права.

меньшем количестве такая ДНК есть и в клетках человека, и в клетках *E. coli*. Несмотря на чрезвычайную привлекательность исследования, мы вынуждены были отложить эти открытия на будущее.

Однако мы обнаружили нечто совсем уж неожиданное для полумертвых подземных организмов, питающихся старым органическим веществом из морских отложений. У них есть ген, кодирующий белок гингипаин — секретируемый патогенными организмами фермент, который растворяет ткани десен и вызывает гингивит. Однако таких микробов, как в наших образцах, никогда не находили во рту у человека, так зачем им этот фермент?

Пожалуй, еще загадочнее было то, что эти клетки вообще секретируют ферменты во внешнюю среду. Синтез ферментов обходится дорого, а эти клетки голодают. Даже если они используют ферменты для расщепления пищи (а по-видимому, так и есть), их секреция ферментов вовне — это как если бы вы разбросали по городу стодолларовые купюры в надежде, что кто-то подберет их и купит вам бутерброд. Неэффективный способ существования. Я бы не обратила внимания на эти гены, если бы их было лишь несколько,

но они содержались в виде многочисленных копий в каждой клетке. Гингипаин был лишь каплей в море: в одном геноме содержалось семь генов гингипаина и еще пять копий похожих ферментов!

Мы послали статью со своими результатами в журнал *Nature*, но редакторы хотели дополнительных доказательств, что эти гены работают именно так, как нам казалось. Например, предлагалось провести эксперименты, показывающие, что эти ферменты активны в данной среде. Но к сожалению, я не представляла себе, как это сделать. В тот вечер за ужином я пожаловалась на это своему мужу Дрю Стину, профессору в Университете Теннесси. Он недоверчиво взглянул на меня и спросил: “Ты ведь знаешь, чем я зарабатываю на жизнь? Я изобретаю методики для анализа ферментов в грязных образцах из окружающей среды”.

Муж простил мне мою тупость и предложил метод для определения активности ферментов, гены которых мы обнаружили. И я дала ему немного нашей замороженной грязи, чтобы он попробовал с ней поработать. Через несколько недель, когда я была на конференции за границей, он мне позвонил. Я испугалась, вдруг что-то случилось с

нашей дочкой, но он сказал: “Гингипаин в ваших образцах не просто активен — он в шесть раз активнее, чем ферменты, которые мы обычно ищем в подобных отложениях”. Мы обнаружили новую функцию наших подземных жителей и заодно новый путь разложения соединений углерода в морских отложениях. Опубликованная нами статья стала стимулом для многих моих последующих исследований[11].

Как раз в то время, когда мы делали эту работу, произошли изменения гораздо более значительного масштаба. Джиллиан Бэнфилд и Катрина Эдвардс, которые раньше работали вместе в Калифорнийском университете в Беркли и обнаружили архей, живущих при нулевом pH (дальше я расскажу, как археям это удается)[12], способствовали тому, чтобы превратить подземную биологию из набора разрозненных проектов в ощутимое и зрелое научное направление. Катрина перебралась в Университет Южной Калифорнии, при финансовой поддержке Национального научного фонда основала Центр исследований темной энергии биосферы и запустила ряд проектов по глубоководному бурению океанского дна. Тем самым она и ее коллеги обеспечили финансирование и доступ к образцам из подземной биосферы

для таких исследователей, как я и многие другие по всему миру. Одновременно с этим Джилл активно развивала биоинформатические методы для понимания физиологии микроорганизмов на основании анализа их ДНК. Несколькими годами ранее они с Джин Тайсон впервые прочли геномы непосредственно из природного образца[13], но я никогда не думала о том, чтобы воспользоваться их методами, поскольку считала, что наше микробное сообщество слишком многообразно. Когда мы опубликовали информацию о нескольких геномах MCG, Джилл и Келли Райтон выпустили поразительную статью, где описали сорок девять геномов организмов из глубоко залегающих подземных вод[14], а с тех пор было изучено уже несколько тысяч геномов подобных организмов. За последние десять лет Джилл, Джин, Келли и их коллеги разработали богатый арсенал аналитических инструментов и использовали их для изучения обширных пространств подземного мира. Благодаря их работе мы получили возможность узнавать, что представляет собой конкретный организм, и глубоко понимать его физиологические особенности — и все это без необходимости выращивать его в культуре. Джилл Бэнфилд и Катрина Эдвардс превратили

подземную биологию в зрелое и самостоятельное научное направление. Теперь благодаря усилиям этих двух женщин мы полноценные специалисты в области подповерхностной геомикробиологии, а не “обычные” биологи, которые время от времени пытаются изучать организмы из странного подземного мира.

Используя некоторые методы, разработанные в лаборатории Бэнфилд, Фенпин Ван из Шанхайского университета Цзяотун получила намного более качественные последовательности геномов из организмов MCG, за которыми я охотилась, и дала этим организмам название посимпатичнее: Bathyarchaeota (батиархеи). “Бати” по-гречески означает “глубокий”, и такое имя было выбрано потому, что эти организмы происходят из глубоких ветвей древа жизни, да и живут глубоко под поверхностью[15]. Затем вместе с Кай-Уве Хинрихсом из Бременского университета в Германии они сделали еще один шаг вперед: стали кормить клетки батиархей одним из самых твердых продуктов на Земле — древесной корой, чтобы посмотреть, смогут ли они ею питаться. Однако трудно было понять, едят ли клетки кору, поскольку батиархеи существуют только в природных средах, наряду с миллиардами других

видов, и совершенно непонятно, кто там чем питается. И поэтому, чтобы установить, какие же организмы едят древесную кору, исследователи применили интересный прием. С помощью химических реакций они изменили некоторые атомы углерода в лигнине, одном из компонентов коры, смешали это вещество с придонными отложениями из устья реки и ждали около года, не клюнут ли батиархеи на приманку.

В конце эксперимента выяснилось, что в биомассе клеток батиархей действительно содержатся измененные атомы углерода, которые могли происходить только из лигнина. Это означает, что клетки батиархей, принадлежащие к этой странной и ранней ветви на древе жизни и поселившиеся в иле, где теперь живут устрицы и моллюски, еще до появления на Земле этих самых устриц и моллюсков, питаются химическими компонентами древесной коры — по крайней мере, те батиархеи, которых мы обнаружили в устье реки. Мы пока не знаем, как живут глубоководные разновидности, которым древесная кора достается намного реже. Поскольку деревья появились на планете всего около полумиллиарда лет назад, мы не знаем, является ли эта способность новой адаптацией, возникшей только с

появлением деревьев, или клетки батиархей всегда питались чем-то похожим по химическому строению на лигнин, а позже одним из их любимейших блюд стали деревья.

Но оказалось, что Bathyarchaeota — не просто странная загадка для ученых. Эти организмы в изобилии присутствуют в сточных водах и в очистных реакторах, обрабатывающих отходы человеческой жизнедеятельности и сельского хозяйства. А это значит, что батиархеи способны оказывать непосредственное влияние на нашу жизнь. И мы только начинаем понимать, что они умеют делать.

Теперь у нас появилось много новых технологий для изучения батиархей и других обитателей земных глубин. Мы можем прицепить к клеткам маленькие химические метки, которые помогают понять, кто они такие, что едят, как быстро растут и к чему стремятся. А иногда, если позволяют образцы, под мощным микроскопом можно увидеть, что потребляют отдельные клетки, причем даже в сложных природных смесях. Так по крупинкам мы собираем информацию о наших странных соседях по планете Земля.

Однако не со всеми подземными организмами так трудно работать. Некоторые достаточно хо-

рошо растут в лабораторных условиях. Но это не означает, что они “обыкновенные”. Такие организмы называют экстремофилами — они живут в таких условиях, в которых погибли бы любые “обыкновенные” микробы. Их образ жизни настолько близок к пределам возможностей для жизни в нашем понимании, что нам пришлось изменить свои представления об этих пределах.

# Глава 5
# Как выжить в вулкане?

Мы живем в окружении удивительно разнообразных существ, от змей и жуков до китов и людей, однако, изучая обитателей земных недр, начинаем понимать, что это лишь тонкий срез всех проявлений жизни на планете. А вдруг и диапазон условий, при которых может существовать жизнь, в реальности шире, чем мы предполагали? На Земле есть такие места, где немедленно погибло бы большинство знакомых нам и любимых нами растений и животных. Однако для обитателей земных недр, которых мы называем экстремофилами, такие места служат домом. Многих экстремофилов удается выращивать в лабораторных условиях, не в последнюю очередь потому, что погружение колб с культурой микробов в кипящую воду убивает большинство других, ненужных клеток. И это позволяет нам понять, как жизнь приспосабливается к экстремальным условиям температуры, кислотности, давления и солености среды.

В этой главе я расскажу о некоторых открытиях,

касающихся таких удивительных способностей живых существ. Но, чтобы изучать экстремофилов, иногда самому приходится стать экстремалом, что непросто. Как мы увидим, у микробов было около 3,8 миллиарда лет, чтобы научиться комфортабельно устраиваться в активных вулканических кратерах. А вот у меня на подготовку было меньше двадцати четырех часов.

## Спускаемся в активный вулкан

Вулкан Поас, расположенный примерно в пятидесяти километрах от столицы Коста-Рики Сан-Хосе, представляет собой крупный стратовулкан[32], образовавшийся в результате многочисленных извержений на протяжении долгого времени. Вершина у него не заостренная, а массивная и округлая, как чаша, шириной километра полтора и глубиной около трехсот метров. Будто какой-то великан проходил мимо и зачерпнул ложкой вершину, как мороженое. К сожалению, вкус и запах у этого вулкана на самом деле гораздо менее притягательны. Вул-

**[32] Примечания: 32**

Вулканы такого типа образуются в результате периодических извержений за длительные периоды времени, из-за чего формируются высокие насыпи из чередующихся слоев лавы и золы.

каническое тепло разогревает элементарную серу, которая в нормальных условиях находится в твердом состоянии, и превращает ее в мягкий пудинг, и такая чистая, желтая и вязкая сера постоянно сочится из кратера. В центре кратера есть озеро невероятного бирюзового цвета, который объясняется наличием частиц серы и глинистых минералов, перемешивающихся в воде.

Озеро в кратере вулкана Поас настолько красивое, что это место было превращено в национальный парк Коста-Рики, где есть образовательные экспозиции и смотровая площадка с потрясающим видом на вулкан с безопасного расстояния[33]. Однако, несмотря на изумительные виды, позволяющие делать великолепные фотографии, никому не разрешается спускаться в кратер даже тогда, когда вулкан спокоен. Причина в том, что он может взорваться, причем без предупреждения. Кроме того, в отличие от других вулканов, извержение Поаса не сопровождается выбросом потоков лавы. Нет, он гораздо ковар-

**[33] Примечания: 33**

Если хотите, отвлекитесь от чтения и загрузите *Google Maps*. В нижнем левом углу выберите функцию спутникового изображения. Вы сможете увидеть озеро и следы многочисленных извержений. Чуть к юго-востоку от действующего кратера находится старый кратер под названием Лагуна-Ботос, который в современную эпоху уже не проявлял активности.

нее. Это так называемый фреатический взрыв: у вулкана глубокая магматическая камера, скрытая от глаз, и когда в нее попадает вода, глубоко под кратером давление начинает быстро расти, как в скороварке размером с гору, а чуть только оно достигает опасного предела, верхушка горы взрывается. Если человек окажется в эпицентре взрыва, его подбросит в воздух на сотню метров, как при разрыве мощной бомбы. А при падении на землю накроет градом булыжников, которые тоже были выброшены в воздух при извержении. И такие жестокие взлеты будут повторяться снова и снова, заставляя человеческое тело зависать в воздухе, как шарик в лотерейном барабане. При достаточно мощном извержении вулкана любой человек, оказавшийся в кратере, наверняка погибнет. Если вы следите за началом извержения со смотровой площадки, вам как минимум удастся избежать смертоносного града булыжников.

Однако спускаться в кратер не разрешается не только из-за опасности извержений. Даже в спокойное время, когда подземные воды мирно бурлят в глубине, вас может убить камнями. Дело в том, что вулкан образован не из обычных камней, по которым мы привыкли ходить, как гранит или эродированные камни на дне реки.

Скалы Поаса состоят из базальтового стекла, разбитого и хаотично разбросанного при последних извержениях. Если вы споткнетесь и упадете, они разрежут вам руки. Кроме того, эти камни неустойчивые, острые и наклонены под странными углами — настоящая пытка для людей со слабыми лодыжками или недостаточно подготовленной сердечно-сосудистой системой. И все это на фоне постоянной угрозы извержения. Одно дело, когда вы находитесь в здании, построенном в соответствии с сейсмическими нормами, но совсем другое — когда вы на дне гигантской воронки из битого стекла, и даже слабое землетрясение может вызвать смертельно опасный оползень. Единственная хорошая новость: во время такой прогулки вы не заблудитесь. Хотя богатые железом вулканические породы *могут* служить источником пищи для деревьев, частые извержения заставляют деревья прижиматься к краям кратера, как нервных тетушек, остерегающихся непослушного ребенка. Поэтому любой турист, находящийся в кратере, будет видеть туристическое бюро. И наконец, если вы доберетесь до жемчужины в короне вулкана — до озера цвета самых сладких эльфийских грез, оно тоже способно вас погубить. В нем не вода, а такая же

кислота, как в батарейках, и, если вы поскользнетесь и упадете в него, скорее всего, живым вам не выбраться.

Каким существам может нравиться жить в дымящемся и постоянно взрывающемся озере из серной кислоты? Учитывая сложности с получением образцов, у нас не очень много информации, чтобы ответить на этот вопрос. Но то, что нам все же *известно*, позволяет дать невероятный ответ: в этом вулкане гораздо больше жизни, чем может показаться на первый взгляд. Поас знаменит богатыми залежами серы, которые только и ждут, чтобы соединиться с кислородом и высвободить энергию. Однако реакция эта не очень быстрая, и поэтому сера какое-то время остается на поверхности. Микробов такая химическая среда манит, как деньги в банке, поскольку предоставляет возможности для процессов хемолитоавтотрофии — если только эти микробы способны выжить в неустойчивой и сильно кислой среде. Микробы, поселяющиеся в кратерных озерах, подобны застройщикам, возводящим пляжные домики прямо на песчаных дюнах на побережье Северной Каролины, где часто бушуют ураганы. С большой вероятностью в какой-то момент их инвестиции пропадут,

но они рассчитывают, что долгие годы до того будут получать доход. Высокий риск — хороший выигрыш. Такому же искушению подвергается ученый, не боящийся трудностей. Если вы хотите узнать, как микробы выживают в этих нестабильных и неблагоприятных условиях, вам придется рискнуть собственной шкурой. Несмотря на все разумные доводы, вы все же спускаетесь в кратер и вручную отбираете образцы.

Именно это я и сделала в феврале 2017 года. Наш большой коллектив, состоявший из двадцати пяти ученых и двух съемочных групп, снимавших нашу работу, две недели собирал образцы из горячих источников по всей северной части Коста-Рики. Во время того путешествия нам пришлось пережить несколько опасных ситуаций и предпринять несколько трудных переходов через густые джунгли, чтобы добраться до источников на склонах вулканов. Но ничто не могло сравниться с потенциальной опасностью, которая поджидала нас на вулкане Поас. Разрешение на посещение кратера выдают наши коллеги из Вулканологической и сейсмологической обсерватории Коста-Рики (OVSICORI, *Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica*), которые регулярно спускаются в кратер вулкана Поас для

сбора образцов и мониторинга уровня угрозы для столицы, находящейся поблизости. Чтобы ограничить возможное количество жертв при неблагоприятной ситуации, они максимально сократили численность нашей команды, отправлявшейся в кратер за образцами, и выдали разрешение сопровождать нас только одной съемочной группе. Участники второй съемочной группы, кажется, с облегчением остались снимать обзорные кадры со смотровой площадки.

Вечером накануне экспедиции на Поас мы с координатором по работе с общественностью Кейти Пратт готовились к походу и беседовали с опытным вулканологом Стивом Тёрнером о том, что могло нас ожидать. В какой-то момент в ходе разговора выяснилось, что Стив не пойдет с нами на вулкан на следующий день. Нас с Кейти это удивило, ведь он вулканолог нашей экспедиции. А он ответил: “Я по долгу службы так часто спускался в вулканы, что теперь стараюсь делать это как можно реже, чтобы не подвергать себя опасности”. Мы с Кейти переглянулись, вытаращив глаза. Действительно ли риск так высок?! Но поздно было что-либо менять, и никто из нас не собирался отказываться от возможности, какая выпадает раз в жизни. Кроме того, вулкан долгие

месяцы был вполне спокоен, так что с большой вероятностью день должен был пройти нормально. Тем не менее осознание того, что Стив с нами не пойдет, что-то в наших головах изменило, и мы стали относиться к походу серьезнее. По какой-то непонятной причине мы с Кейти потихоньку потянулись к бутылкам с изотоническим напитком *Gatorade*, словно надеялись, что правильная гидратация организма поможет предотвратить извержение вулкана. Что тут скажешь?

Утро нашего похода на вулкан выдалось волшебным. Голубое небо, спокойный вулкан и нервные ученые. Несмотря на геологические сложности, спуск мне понравился. Первые десятки метров мы пробирались через кустарники с широкими ярко-зелеными листьями. Потом остались только голые скалы, щебень и плотные слои золы со следами потоков дождевой воды. Я была в Аппалачах, в Альпах и в Сьерра-Неваде, но ни один из тех походов не сравнится со спуском в кратер Поаса. Мы будто карабкались по стене парковочной стоянки, усеянной битыми пивными бутылками. Вокруг раскинулось море изрезанных или стекловидных камней. Пейзаж был какой-то индустриальный, словно щебенку разгребали бульдозером. Если бы меня

попросили представить себя где-то на природе, такого я бы никогда не вообразила. Однако суровая местность, по которой мы шли, была столь же естественной, как журчащий ручеек в густом лесу.

Наконец мы спустились на дно кратера, но все еще не дошли до озера — от него нас отделяла последняя насыпь базальтового щебня. Пройдя последний поворот, я поразилась ослепительной яркости озера и его гигантскому размеру. Когда мы утром начали спуск, мы видели лишь симпатичное голубое пятно, а теперь перед нами простиралось бескрайнее море. Чтобы вы могли оценить масштаб, скажу, что наши фигурки на берегу озера были так малы, что коллеги не разглядели нас со смотровой площадки. В тот момент ветер сменился, и я вдруг в полной мере осознала, что собой представляет озеро в вулкане Поас (вообще-то у него есть название — Лагуна-Кальенте). Я вспомнила салатный соус, на четверть состоящий из уксуса, который продается в супермаркетах в Германии. Если его перед использованием не разбавить, рот у вас будет гореть, на глаза навернутся слезы, а если вы еще втянете его пары носом, то можете задохнуться от едкой кислоты. Вот такое же ощущение воз-

никает, когда стоишь рядом с озером в вулкане Поас. Желание прыгнуть в воду, чтобы поплавать, немедленно сменяется желанием натянуть респиратор.

Я была полностью поглощена созерцанием озера, когда мимо прошел коллега из OVSICORI Мартен де Мур, намеревавшийся отбирать образцы газа. “Двигай ногами, чтобы сапоги не расплавились”, — посоветовал он. Я стояла на поверхности, разогретой до 100 °C. “Но не очень сильно, чтобы не оступиться. На склоне ничто тебя не удержит, и ты соскользнешь в озеро”. И тут на меня напал страх. Смесь ужаса и благоговения сделала этот момент одним из самых важных, преображающих в моей жизни. Однако нужно было провести измерения и собрать образцы. И мы торопились.

Вместе с моим коллегой, микробиологом Донато Джованнелли из Неаполитанского университета имени Фридриха II, я подобралась поближе к кромке воды, чтобы взять образцы. Страшно опасное озеро выглядело совершенно безмятежным и мирно плескалось о скалы. Но иллюзия спокойствия улетучилась, когда я окунула в воду pH-метр. Он показывал 0,85. До сегодняшнего дня это самый высокий показатель

кислотности, какой я когда-либо встречала в природе. А ведь мне нужно было окунуть в озеро руку в перчатке и набрать воду в гигантский шприц, чтобы затем пропустить через фильтр, который задерживает микробов. Весьма опасное предприятие, поскольку землю на краю озера с такой кислой водой, как жидкость в батарейке, еще и покрывала скользкая глина. К счастью, Донато много лет играл в регби, а я была членом группы чирлидеров, так что мы были хорошо подготовлены: Донато низко наклонился, обхватив меня руками, а я склонилась над озером и заполняла водой один шприц за другим. Скользкая глина у берега грозила затянуть мои ноги в воду в любой момент, однако я устояла. Удивительно, но вода была не очень горячей — около 40 °C. Если бы это была не разъедающая кожу кислота, окунуться было бы приятно. Мы завершили напряженный процесс сбора образцов без всяких инцидентов, перенесли шприцы с жидкостью на сравнительно плоскую поверхность, где температура почвы была не такой высокой, чтобы расплавить сапоги, и начали долгий процесс фильтрации микробов.

Совсем не просто продавить через фильтр воду с большим количеством глины и кусочков серы. В обычных условиях это заняло бы у нас целую веч-

ность. В обычной ситуации нашему проводнику Карлосу Рамиресу незачем было бы обращать на нас внимание, пока мы выполняем свою работу, и он мог бы сосредоточиться на организации следующего похода. В обычной ситуации совершенно неважно, сколько времени мы пробудем на месте, пытаясь продавить последние капли жидкости через забитый фильтр. Но то был необычный день: мы находились в кратере действующего вулкана, и каждая дополнительная проведенная здесь минута повышала вероятность катастрофы. Карлос схватил в обе руки по фильтру, взобрался на плоский камень и, используя его в качестве подставки, стал продавливать воду через фильтр с мелкими порами диаметром 0,2 микрометра, нажимая на поршни. Пока мы работали, я подумала, что стоит спросить его о плане спасения, если вдруг начнется извержение. Он радостно взглянул на меня и ответил: “О, я так рад, что вы спрашиваете! Стратегия проста. Если начнется извержение вулкана, надо повернуться к нему и наслаждаться зрелищем… поскольку оно станет для вас последним”.

Может показаться, что Карлос драматизировал ситуацию, однако через пятьдесят четыре дня после того, как мы забирались в кратер, произошло

самое сильное извержение Поаса после 1960-х годов. Струи пара, камней и кислоты взметались в небо на километровую высоту целых две недели. Шлейф был виден даже в Сан-Хосе. Наши коллеги из OVSICORI, которые, к счастью, во время извержения находились на безопасном расстоянии в своих офисах, послали нам последние кадры, заснятые их веб-камерами, пока их не разнесло взрывами. Недоверчиво разглядывая снимки, я искала глазами то место, где всего несколько недель назад переминалась с ноги на ногу на зыбкой раскаленной земле — на той самой земле, что взорвалась гигантским фонтаном. Оглядываясь назад, я понимаю решение Стива не идти на вулкан, дабы не испытывать судьбу.

Когда вулкан поутих, несколько моих коллег отправились на смотровую площадку, долгое время остававшуюся закрытой, и послали оттуда невероятное видео, на котором было видно, что вся она покрыта золой и окутана густым, плотным дымом. Это напоминало какой-то инопланетный пейзаж, несравнимый с тем, что мы видели в ясный день двумя месяцами ранее, когда я перелезла через перила смотровой площадки, чтобы идти в поход. Когда ситуация успокоилась настолько, что можно было послать дроны для

наблюдений за озером, коллеги обнаружили, что озеро исчезло — испарилось при извержении. В последующие месяцы оно опять наполнилось водой из вулканических глубин и от постоянных дождей, которыми Коста-Рика знаменита.

## Как выжить в кислоте под взрывами

Мое пребывание на вулкане длилось всего несколько часов, и то я была рада вернуться домой целой и невредимой. Но микробы всю жизнь плещутся в кислотном озере, хотя кислота убивает микроорганизмы так же легко, как убила бы меня[1]. Кислая среда возникает из-за присутствия в растворе избытка протонов. И эти протоны готовы реагировать с чем угодно, а не только с водой. Для микробов это создает серьезную проблему, поскольку почти все важнейшие компоненты клетки (белки, ДНК, РНК, липиды и другие метаболиты) содержат химические структуры, которые перестают работать при контакте со слишком большим количеством протонов. ДНК образует двойную спираль потому, что две ее нити удерживаются вместе благодаря водородным связям, образованным такими вот протонами. Но в кислоте каждая нить спирали

будет взаимодействовать с протонами из воды, а не из противоположной нити, и двойная спираль не образуется, поскольку “Марко” не сумеет найти своего “Поло”. По той же причине нарушается структура белков, РНК и липидов.

Мало того, что кислота разрушает биомолекулы, она уничтожает жизнь и на более фундаментальном уровне. На мембране любой живой клетки существует градиент электрического заряда и pH[34]. Клетка поддерживает этот градиент, тщательно контролируя количество протонов внутри и снаружи. А кислота рассылает протоны, как тяжелая артиллерия — снаряды, угрожая разрушить жизненно важное протонное равновесие.

Вот как это работает. Все живые клетки постоянно выталкивают протоны во внеклеточное пространство. В результате протоны накапливаются снаружи, нарушая химическое равновесие, что заставляет их стремиться обратно в клетку, которая вновь их изгоняет. Это электрохимическое давление называют протон-движущей

**[34] Примечания: 34**

Градиент вещества на мембране означает, что этого вещества на одной стороне мембраны больше, чем на другой, и поэтому система естественным образом стремится сгладить эту разницу, способствуя перемещению вещества через мембрану.

силой. “Движущей” — по той причине, что при проникновении обратно в клетку протоны активируют белок АТФ-синтазу, который синтезирует для нас АТФ. АТФ обеспечивает энергию, необходимую для осуществления буквально всех внутриклеточных функций, это своего рода валюта клетки. Что бы клетка ни делала, она использует АТФ. Без АТФ гибнут и люди, и микробы. Но возвращающиеся в клетку протоны запускают не только синтез АТФ, но и работу некоторых клеточных элементов. Например, так называемые моторные белки, которые заставляют двигаться жгутики, за счет чего клетка плавает, работают непосредственно благодаря проникающим в клетку протонам. Использование градиента протонов позволяет жгутикам двигаться гораздо быстрее, чем если бы им пришлось дожидаться синтеза АТФ. Это как платить кредитной картой, вместо того чтобы идти в банкомат за наличными.

А протонный градиент — это фактически и есть градиент pH. Учитывая важную роль этого градиента для производства энергии, а следовательно, для жизни, клетка *стремится* к тому, чтобы ее внешнее окружение было более кислым, чем внутриклеточная среда. Жизнь затрачивает мно-

го энергии на поддержание градиента pH, чтобы все клеточные механизмы могли функционировать. И тогда возникает интересный вопрос. Может быть, клетки в кислых вулканических озерах прибегают к теневой экономике? Вдруг они получают энергию бесплатно, используя безграничный запас протонов, стремящихся ворваться в клетку, запустить белковые моторы и без затрат произвести АТФ? Но существует проблема. Если клетка никак не контролирует этот процесс, мощный градиент pH разрушит ее, как вода разрушает дамбу. Даже если вам хочется пить, струя воды из пожарного шланга может вас убить. Большинство клеток человеческого тела даже при нейтральном значении pH должны выбрасывать протоны наружу, но микробным клеткам в кислых вулканических озерах (при pH = 0,85!) еще сложнее защищаться от протонов, которые готовы нахлынуть, как приливная волна.

И все же вода в смертоносном озере на вулкане Поас, куда я опустила свой pH-метр, кишела микробами, и им там, судя по всему, было очень хорошо. Как микробы умудряются выживать почти в чистой кислоте? Вообще говоря, у них для этого есть две возможности. Первая — создавать такие биомолекулы, которые настроены на pH =

0,85 и нормально функционируют только в кислоте. В таком мире нити ДНК удерживались бы вместе за счет каких-нибудь новых типов связи, которые столь устойчивы к действию протонов, что разрушались бы при нейтральном значении pH. И действительно, есть удивительное направление органической химии, в рамках которого ученые пытаются создать новые биомолекулы, функционирующие в подобных жестких условиях. Однако на момент написания этих строк никто еще не обнаружил ничего подобного в реальном мире. Микробы, предпочитающие кислую среду, должны поддерживать внутри клеток более низкое значение pH, чем все остальные существа[2], однако, судя по всему, это значение не опускается ниже 4,6.

Вторая возможность — победить кислоту. Для этого микробы перекрывают все поры, через которые протоны проникают в клетку. Ацидофилы (микроорганизмы, предпочитающие кислые среды) — своего рода танки. Благодаря специфическим липидам и очень мелким белковым порам на мембране в клетки проникает крайне скудное число протонов. Кроме того, в клетках ацидофилов содержатся буферные молекулы, связывающие все проникающие внутрь протоны.

А с помощью запаса белков шаперонов клетки быстро осуществляют репарацию биомолекул, поврежденных проникшими внутрь протонами. Если этот подход срабатывает, микробы сохраняют внутри себя достаточно высокий уровень pH, чтобы биомолекулы не разрушались, и поддерживают градиент pH и электрического заряда на мембране.

Некоторые ацидофилы изобрели еще более мощные средства борьбы против кислоты. Они умеют обращать разность зарядов на своей мембране. У всех остальных форм жизни электрический заряд на внутренней стороне мембраны отрицательный, а на внешней — положительный. А вот некоторые ацидофилы поддерживают на внутренней стороне мембраны положительный заряд. Как им удается сохранять положительный заряд внутри, когда снаружи целая армия настойчивых положительно заряженных частиц готова в любой момент хлынуть через мембрану? Они создают положительный заряд без помощи протонов. В водном растворе многие химические элементы заряжены положительно: к примеру, калий, натрий, кальций или магний. Накапливая внутри клетки положительные заряды другого типа, микробы вооружаются

этими градиентами, чтобы препятствовать проникновению протонов.

А какие-то ацидофилы и вовсе отказываются от использования протон-движущей силы. Поскольку протоны слишком трудно контролировать, их неудобно использовать для поддержания жизненно важных клеточных функций. Поэтому некоторые ацидофилы в качестве движущей силы для синтеза АТФ и реализации клеточных функций используют вместо градиента протонов градиент положительно заряженных ионов натрия. Вместо того чтобы пытаться испечь пирог с напалмом, они просто переходят на тесто. Конечно, им все равно приходится иметь дело с напалмом (они им окружены), но, по крайней мере, они не должны укрощать его ради своего жизнеобеспечения.

Это весьма эффективные меры, но обычно их недостаточно. Иногда микробам приходится спасаться, как матросам с тонущего корабля[3]. Они с сумасшедшей скоростью выбрасывают протоны из клетки с помощью транспортных белков. Каждая транспортная молекула расходует уйму энергии, и поэтому жизнь в вулканическом озере обходится дорого. К счастью, такая среда делает микробам щедрый подарок: химические реак-

ции между восстановленной серой, извергнутой вулканом, и кислородом воздуха — настоящее лакомство. Они дают столько энергии, что клетки могут постоянно сбрасывать излишек протонов.

Забавно во всем этом то, что высокая кислотность среды поддерживается самими микробами. Окисляя вулканическую серу, они производят серную кислоту, которая и ставит их в трудное положение. Наверное, они поглядывают на людей, провоцирующих изменения климата, и качают головой: “Эх, дилетанты!..” Ведь эти крохи отравляют собственную среду обитания уже миллиарды лет.

Конечно, кислота — лишь одна угроза для жизни на дне вулкана. Еще ведь существует опасность, что вулкан в любой момент взорвется. И что же происходит с микробами при извержении? Об этом мы знаем гораздо меньше. Из понятных соображений люди стараются не ставить эксперименты внутри действующих вулканов. Гораздо безопаснее обрызгивать кислотой растущие в лаборатории культуры, чем спускаться в вулкан непосредственно перед извержением или сразу после него, чтобы посмотреть, как там себя чувствуют микробы. Однако два человека такие эксперименты проделали: Брайан Хай-

нек из Колорадского университета и Гильермо Альварадо из Университета Коста-Рики. Они достаточно часто на протяжении многих лет брали образцы на вулкане Поас и пытались понять, как микроорганизмы реагируют на извержения. Иногда они находили в вулканическом озере разнообразие микробов. Некоторые не были похожи на ацидофилов и, возможно, попадали в озеро во время дождя. В моих образцах содержался аналогичный набор микробов: некоторые были родственниками известных ацидофилов, а другие походили на туристов, случайно забредших в неблагополучный район города. А иногда Брайан и Гильермо обнаруживали, что в озере присутствует лишь один вид ацидофилов, вытеснивший всех остальных[4]. Наверное, стерилизующий эффект таких событий, как извержение вулкана, выражается в изменении условий обитания, так что этот микроорганизм получает преимущество и распространяется почти как чистая культура. На основании подобных результатов можно предположить, что состояние микробного сообщества в вулканических озерах меняется от богатого разнообразия до монокультуры после каждого извержения, оказывающего стерилизующее действие. Однако сама я не планирую проводить

в вулкане много времени, чтобы проследить за сезонными изменениями.

## Жизнь в отбеливателе

Если микробы способны выживать при очень низком pH, близком к нулю, что происходит на другом краю спектра: могут ли они существовать в щелочной среде, при очень высоком значении pH? Нам повезло, поскольку под поверхностью Земли есть места, которые позволяют ответить на этот вопрос. Грязевые вулканы (я упоминала о них в главе 1) называются вулканами, хотя, вообще говоря, выплевывают они не лаву или перегретый пар, а грязь и жидкость, и их извержения бывают спровоцированы не перемещениями расплавленной мантии, как в случае обычных вулканов. Обитатели многих грязевых вулканов сталкиваются с противоположной проблемой, нежели микробы из вулкана Поас. Они вынуждены справляться с очень высокими показателями pH.

Может показаться, что среды с таким уровнем pH, как в растворах чистящих средств, встречаются редко — в каких-то очень специфических геологических условиях. Однако планете без-

различно, что мы с вами считаем нормой. Под поверхностью Земли среды с высоким уровнем pH — обычное дело, особенно если речь о первозданной планете. Сегодня среды с высоким pH распространены благодаря повсеместности серпентинизации — процесса, приводящего к образованию химических соединений, из которых хемолитоавтотрофы создают клеточную биомассу. Если хемолитоавтотрофы — это "растения" подземного мира, то серпентинизация — их "солнце". Пожалуй, роль этого процесса для развития жизни даже важнее роли нашего Солнца. Дело не в том, что он поддерживает рост такого же количества биомассы, как Солнце, — растения, безусловно, в этом соревновании выигрывают. Дело в том, что без серпентинизации в нашем мире, возможно, вообще никогда не было бы растений.

Серпентинизация происходит тогда, когда породы из верхнего слоя мантии и нижних слоев океанической коры выталкиваются наверх и оказываются на глубине не более десяти километров под поверхностью Земли, где они взаимодействуют с водой. В этой реакции образуются минералы лизардит и серпентинит (отсюда и термин). В результате серпентинизации все становится те-

кучим, поэтому грязевые вулканы перемещаются и переносят химические вещества под поверхностью Земли. Однако для жизни важно скорее то, что в ходе этих реакций выделяется огромное количество водорода — а это почти универсальная пища для микробов. Кроме того, водород может взаимодействовать с диоксидом углерода с образованием метана и многих других органических молекул, которыми питаются различные микробы. Таким образом, серпентинизация обеспечивает все необходимое для жизни, а для нее самой требуются лишь вода, горные породы и умеренно повышенная температура. Этот процесс столь прост, что многие исследователи полагают: именно он стимулировал появление первых форм жизни на Земле[5]. Более того, он еще может быть источником жизни на других планетах, астероидах или спутниках планет.

Однако, хотя серпентинизация чрезвычайно полезна для жизни, у нее есть побочный эффект. В ходе этих химических реакций значение pH повышается до 10 или 12. Иными словами, серпентинизация действительно обеспечивает бесплатный шведский стол, но только залитый

отбеливателем[35]. Впрочем, жизнь нашла способы с этим справляться. Борьба со щелочью в какой-то степени аналогична борьбе с кислотой. В щелочных условиях микробам не нужно строить преграды, чтобы избавляться от протонов, им нужно строить преграды, чтобы предотвратить их утечку[6]. Микробы постоянно закачивают протоны в клетку взамен ионов натрия, которые выкачивают наружу. Аналогично ацидофилам, алкалофилы (микробы, предпочитающие щелочные условия) вынуждены были согласиться, чтобы pH внутри их клеток был повышенным, больше 8.

В результате многие такие организмы оказываются не в состоянии жить при нейтральных значениях pH, ведь им пришлось приспособиться к иному образу жизни. Однако главная проблема таких клеток — получение энергии. Вспомним, что большинство форм жизни используют протон-движущую силу, специально выкачивая протоны из клетки для создания градиента. Но если вы живете при pH = 12, то выкачивание протонов из клеток наружу — проигрышный

**[35] Примечания: 35**

На самом деле функция отбеливателя как моющего средства для одежды или дезинфекции ванны в значительной степени основана на его мощном окислительном потенциале, а не на величине pH.

вариант. Поскольку среда в целом лишена протонов, как только вы выталкиваете протон наружу, он тут же исчезает в щелочи и уже никогда не вернется, не поможет синтезировать АТФ. Алкалофилы никак не могут создавать такой протонный градиент, который направляет выработку энергии в клетках большинства остальных обитателей Земли. Одно хитроумное решение заключается в том, чтобы построить внутренние мембраны, что позволяет алкалофилам закачивать протоны в контролируемое пространство. Но вот клетки без внутренних мембран вынуждены рассчитывать лишь на небольшое количество энергии от электрического градиента, возникающего при выкачивании ионов натрия. Хотя серпентинизация создает энергетически богатую среду, обитающие здесь микробы не чувствуют этого изобилия. Из-за высокого значения pH они не могут извлечь много энергии из всего того водорода, который при серпентинизации выделяется. Как будто у них в кишечнике завелся ленточный червь.

Впрочем, мы пока еще не очень хорошо понимаем, как микробы живут при высоком значении pH. Рассмотрим в качестве примера некультивируемый тип микроорганизмов NPL-UPA2, недавно

обнаруженный в подземных источниках с чрезвычайно высоким значением pH, где происходит серпентинизация[7]. Этот организм напоминает гибрид бактерии и археи, и геном у него довольно странный. Пока мы не знаем, как он выживает при таком высоком pH. Поскольку этот микроб находится на другой ветви древа жизни, отдельно от всех известных культур, вероятно, он освоил какие-то новые, причудливые способы адаптации к подобным условиям — такие, о которых мы пока даже не догадываемся.

## Еще больше гадостей

Кислота, щелочь и нестабильные условия — далеко не все факторы стресса при жизни в вулканах, будь они настоящие или грязевые. Тепло, соль, токсичные металлы, холод, обезвоживание, ультрафиолетовое и радиоактивное излучение, давление — все это тоже мощные разрушители живых клеток. Для противостояния всем этим воздействиям микробы используют похожие методы борьбы, основанные на одном общем принципе: делай все, что можешь, чтобы

удерживать вредные элементы вне клетки[36], а полезные — внутри, и учись переносить небольшой стресс, если не в силах избавиться от него полностью. И в отношении каждого стрессового фактора микробы показывают нам, что жизнь существует в гораздо, гораздо более разнообразных условиях, нежели способны переносить животные и растения.

Большинство наших знаний о том, как микробы выживают в неблагоприятной среде, получено из экспериментов с отдельными культурами, которые мы помещаем в соответствующие условия, наблюдая, что при этом происходит. Но что мы знаем об одновременном влиянии нескольких факторов? Суровые условия обитания обычно характеризуются сочетанием разных пагубных воздействий. Чтобы понять, как микробы переносят одновременное влияние нескольких стрессовых факторов, нужны дополнительные исследования. Кроме того, в природе микробы почти никогда не встречаются поодиночке. В обширном сообществе, состоящем из многих типов микробов с различными способностями, клеткам может быть легче противостоять влиянию

**[36] Примечания: 36**

Это не относится к теплу, холоду или давлению. Клетки не могут оградить свое внутреннее пространство от их влияния.

давления, температуры, солености, металлов и кислоты одновременно. Возможно, появляются места, где им удается спрятаться, или механизмы взаимопомощи между членами сообщества, о которых мы пока ничего не знаем. Специализированные ферменты, которые помогают микроорганизмам выживать в неблагоприятных средах, уже давно находят применение в промышленности и биомедицине. Готова биться об заклад, что существуют еще ферменты, которые окажутся столь же полезны для человечества, как *Taq*-полимераза. Этот фермент из микробов, обитающих в горячих источниках, позволяет нам проводить многочисленные исследования с ДНК[37]. Если мы больше узнаем о том, как обитатели земных недр выживают в вулканах, мы сможем обнаружить сверхстойкие ферменты или поймем, как сконструировать микробов, способных выживать в неблагоприятных условиях. И в этом смысле изучение жизни внутри вулканов поможет сделать новый технологический прорыв.

Наличие адаптаций к экстремальным условиям наводит на мысль, что обитатели земных недр

**[37] Примечания: 37**

Это основная ДНК-полимераза, которую используют для проведения ПЦР. — *Прим. науч. ред.*

живут по другим законам, нежели все остальные существа. Их семейные ветви на древе жизни поднимаются из неизведанных глубин, которые оставались невидимыми для нас, пока мы не обнаружили их благодаря последним достижениям в секвенировании ДНК. Они прекрасно существуют в таких местах, где погибло бы большинство других организмов. И выживают на одних только горных породах и воде. Означает ли это, что они подрывают фундаментальные законы, на которых строятся наши представления о том, что такое живое существо?

# Глава 6
# Дышим минералами

К сожалению, биология не может похвастаться строгими законами. Нет такого уравнения, которое показало бы, кто выживет при извержении вулкана, а кто нет или почему у нас две руки, а не четыре. Когда какой-то организм оказывается в доминирующем положении в определенной среде, возникает искушение предположить, что у него идеальные характеристики, которые как раз и позволили ему преуспеть. Однако не исключено, что он, например, распространял токсичные вещества, уничтожившие более приспособленных микробов. Или ему просто очень повезло и его не смыло ливнем. Исходя только из основополагающих принципов, почти невозможно предсказать, каким путем экосистема перейдет из точки А в точку Б, поскольку в биологии существует великое множество способов для достижения одного и того же результата. Биология не очень законопослушна.

Вот пример, демонстрирующий невозможность глобальных обобщений. Когда в Тихом океане у

северо-западного побережья США сократилась популяция лосося, ученые пришли к выводу, что причиной стало исчезновение водорослей, в которых живут молодые особи. Потом выяснилось, что водоросли исчезли из-за распространения морских ежей, которые поедают зачатки водорослей. Рост популяции ежей, в свою очередь, объяснялся уменьшением количества морских выдр, поскольку выдры питаются ежами. Поэтому, если вы хотите увеличить популяцию лосося в северо-западной части Тихого океана, нужно завезти туда морских выдр (кстати, они очень милые и всем нравятся). Беспроигрышный вариант.

Это важная научная работа, но она не позволяет сформулировать никаких универсальных законов. Если понадобится увеличить популяцию лосося у берегов штата Мэн, нам не удастся это сделать с помощью выдр, поскольку на восточном побережье США другая динамика взаимоотношений между водорослями, морскими ежами, морскими выдрами и лососем, нежели на северо-западном.

Но вдруг в биологии все же есть фундаментальные законы, просто мы недостаточно всматривались в детали, чтобы их разглядеть? Мы знаем, что жизнь неразрывно связана с энергией и ак-

тивностью. Все организмы откуда-то получают энергию и используют ее для жизнедеятельности, которая изменяет их среду обитания. Связью между энергией и активностью занимается термодинамика. Может показаться, что если вы не физик, то вполне проживете и без термодинамики, однако же, если вас интересует истинная природа жизни, придется сдуть с термодинамики пыль и присмотреться к ней повнимательнее, поскольку она того заслуживает.

Если термодинамика в самом деле определяет законы живого, обитатели земных недр и экстремофилы — единственные существа на планете, способные показать нам, каковы же границы жизни. Обитатели земных глубин выхватывают крохотные частицы энергии, которые слишком малы для нас, а пища, откуда они эту энергию добывают, навевает мысли скорее о химической лаборатории, чем о ресторане. Они делают такие вещи, какие мы даже вообразить себе не можем. Они виртуозы, как знаменитая балерина Мисти Коупленд. Они обладают необходимыми дисциплиной, тонкостью и выносливостью, чтобы исполнять химические реакции, как дивные произведения искусства. Мы по сравнению с ними больше похожи на младенцев в подгуз-

никах, которые подпрыгивают под музыку. Да, теоретически это можно назвать танцем, но профессионалам мы и в подметки не годимся.

Может показаться, что возможности обитателей земных недр вообще бесконечны (они процветают в глубоких темных подземельях и прекрасно чувствуют себя в кислоте), однако в соответствии с законами термодинамики у жизни должны быть пределы, и обитатели земных глубин — не исключение из правил. Но ведь все экстремальные среды, о каких я до сих пор рассказывала, кишмя кишат микробами! Где же на Земле границы, через которые не способны перейти эти, казалось бы, вездесущие организмы?

Есть ли места с такими жесткими условиями, где микробы не могут получать необходимого количества энергии? Давайте поищем обитателей земных недр в огненных и ядовитых вулканических газах.

## Пика, Чили, 2022 год

Чилийский вулкан Иррупутунку отличается от вулкана Поас по нескольким показателям. В его кратере не озеро, а источники опасных газовых выбросов. А чтобы от безопасного туристического

центра добраться до кратера для отбора газовых проб, нужно не спуститься вниз, а подняться на высоту 5163 метра, почти исключительно пешком. Однако оба этих вулкана объединяет нечто очень важное для наших поисков границ жизни: это чрезвычайно негостеприимная среда. По этой причине в одно прекрасное утро в марте 2022 года я вела грузовик недалеко от границы между Чили и Боливией, продвигаясь в сторону Иррупутунку.

Мы с коллегами[38] проснулись рано утром в городке Пика и вышли в темноту, нагруженные инструментами для отбора проб, респираторами, едой, водой и баллончиками с кислородом на случай чрезвычайных обстоятельств. Скоро вдали показался вулкан с поднимавшимся из кратера облаком яркого белого дыма. Не было видно никакой растительности, что резко контрастировало с роскошными тропическими лесами, окружающими Поас. Единственное здание в окрестностях — пост карабинеров, куда мы зашли для предъявления пропуска. Нас попросили зайти и на обратном пути: так они узнают, что мы не погибли на вулкане.

---

**[38] Примечания: 38**

В этом международном научном проекте участвовали чилийские коллеги Герхард Йессен, Дженни Блейми и Фелипе Агилера.

Мы оставили двух людей у подножия вулкана для измерений концентрации газов на расстоянии. Но чтобы узнать, есть ли в вулкане живые микробы, шестерым из нас предстояло подняться наверх и добраться до кратера. Мы решили подняться как можно выше по каменистому склону вулкана на грузовиках, чтобы поберечь легкие для последних этапов восхождения. Я попеременно то давила на педаль газа, чтобы переехать через небольшие валуны, то медленно сползала в размытые канавы, пока вдруг резко не затормозила (дорожные знаки там отсутствуют), чтобы не сорваться с вертикального склона — в стиле Хитрого Койота из известного мультфильма. Потрясенные, мы выбрались из грузовика, чтобы посмотреть, куда чуть было не свалились. Дорогу пересекала траншея с высокими краями, уходившая вдаль с обеих сторон, — явно дело человеческих рук. И словно этого было недостаточно, чтобы нас остановить, на другой стороне высился непреодолимый вал.

Подобно многим вулканам в Андах, Иррупутунку располагается на государственной границе, и эту траншею вырыли, чтобы люди не могли свободно перемещаться между Чили и Боливией. Я поняла, что мы чуть было не воткнулись в “погра-

ничную стену", такую же периодически строят и разрушают на границе между США и Мексикой. Нам пришлось оставить грузовик и дальше продвигаться пешком, что медленнее и опаснее. Это сильно затруднило нашу работу, но я все время думала о людях, для которых преодоление пограничной стены намного важнее, поскольку они идут на это в поисках лучшей жизни.

Мы начали восхождение на вулкан. Через каждые три-четыре шага я сгибалась пополам, ловя ртом воздух, как выброшенная на берег рыба, а потом снова двигалась дальше. Мы карабкались по гигантским насыпям гальки, но избегали крутых склонов и обходились без веревок и каких-либо специальных технических навыков. Требовалась только сила легких, но немалая. Казалось, мы поднимаемся уже целую вечность, когда наконец мы увидели белый дым, вздымавшийся над расщелиной на вершине горы. Мы добрались до кратера вулкана.

Кратер имел форму полумесяца и был покрыт толстым слоем ярко-желтой минеральной серы, которую здесь добывали несколько десятилетий назад. Рядом все еще виднелись остатки старых каменных платформ, а в одной из стенок кратера зияла широкая брешь, по-видимому, прорублен-

ная шахтерами. Через нее можно было пройти прямо в пасть вулкана.

Внутри кратера из черных зловещих дыр били мощные струи газа. Они достигали высоты десятиэтажного здания, хотя из-за масштаба окружающего пространства оценивать что-либо было трудно. Гигантские валуны размером с дом раскачивались на краях кратера, грозя рухнуть на дно, но мне они казались не крупнее коров, поскольку сравнивать было не с чем. Все вокруг представало в искаженных пропорциях, и все казалось враждебным. Земля вокруг газовых воронок (их называют фумаролами) была ярко-оранжевого цвета, как тухлая яичница. Перекрикивая оглушительный грохот струй, мой коллега Мартен де Мур сообщил, что разные цвета указывают на различную температуру газов. Он воткнул в одно такое пятно толстый железный прут, чтобы измерить температуру. Там было 408 °C — достаточно горячо, чтобы выжечь все остатки еды, налипшие на вашу духовку.

Кроме жары и грохота, кратер встретил нас плотным облаком дыма. Настолько плотным, что мы поняли одну неприятную вещь: некоторые из наших лучших респираторов — с черными резиновыми ремнями и внушительными метал-

лическими баллонами — абсолютно бесполезны. В тот миг, когда я оказалась в кратере, газ как ножом пронзил мои легкие и обжег нос. Я завопила от боли и бросилась вон, скинув респиратор и жадно глотая воздух. Мне повезло, что я смогла так быстро выбраться, поскольку вулканические газы не просто причиняют боль — они ядовиты. Кроме диоксида углерода, вызывающего удушье, они содержат летучие соединения тяжелых металлов и сильнейшие кислоты вроде плавиковой, которая в достаточно высокой концентрации растворяет кости.

Один из коллег привез более эффективный респиратор, поскольку должен был провести в этом ядовитом пространстве несколько часов, отбирая газовые пробы в большие стеклянные колбы. Когда он сделал перерыв и вышел из кратера, свою маску он дал мне, и я приняла ее с благодарностью. Глядя, как он протирает маску от слюны и соплей, прежде чем протянуть мне, я вспомнила, как два последних года разворачивала новую маску KN95 каждый раз, когда шла в магазин. Было странно и радостно, что мои страхи заболеть COVID-19 отступили перед более серьезной угрозой испытать на себе действие кислоты, способной разъедать кости. Я надела

громоздкий респиратор и подтянула толстые резиновые ремни.

И шагнула в дымящийся кратер, как на поверхность Луны. Я ступала осторожно, чтобы не продавить тонкую коросту и не провалиться в бурлящую под ней раскаленную массу. Все вокруг меня было ярко-желтым, в туманных парах от фумарол и с рассеянными тут и там оранжевыми и черными пятнами. Стены кратера возвышались, как стены собора, опирающиеся на столбы пара. Я пробиралась сквозь густые пары, будто плыла под водой.

Я оглядела кратер, обдумывая, откуда взять образцы. Как я рассказывала в предыдущей главе, экстремофилы способны жить в таких условиях, в которых любое животное погибнет за секунды. Но даже экстремофилы не могут существовать при 408 °C. Насколько нам известно, жизнь пока еще не научилась преодолевать сожжение. Поэтому я миновала зловещие черные дыры и направилась к ярко-желтым кристаллам серы. Вблизи они были прекрасны: тоненькие желтые иголки сверкали в солнечном свете, как драгоценные камни. Они оказались мягкими и хрупкими, и я соскребла их ложкой. Труднее всего было оградить кристаллы в ложке от газовых

струй, которые вырывались из-под земли, как пар из прорвавшихся труб. Заполнив бесценным веществом необходимое количество стерильных пластиковых контейнеров, я вылезла из кратера и отдала коллеге его классную маску, чтобы он мог закончить отбор газовых проб. А я тем временем приятно вздремнула в тени скалы, подальше от дыма.

Когда сбор образцов был завершен, мы начали спускаться обратно, периодически проверяя, не вошли ли в зону досягаемости для радиосвязи, чтобы подать сигнал о нашем возвращении тем, кто остался внизу. Вскоре мы добрались до насыпи, которую старательно обходили утром во время подъема. Она напоминала покрытую щебнем парковку, наклоненную под углом $70^0$. Мы поглядели вниз, и мой коллега Якопо Пазотти повернулся ко мне, улыбнулся и спросил: “Хочешь увидеть, как быстрее всего спуститься с вулкана?”

И прежде чем я успела ответить, он нырнул за край. Я охнула, когда он приземлился на почти вертикальную насыпь на пятки, как на лыжи. И потом проделал то же самое еще и еще раз, подскакивая, как Тигра, пока почти совсем не скрылся из виду. Тогда и я подумала: “Наверное, я

тоже так могу”. И спрыгнула с вулкана, как будто это был надувной замок. Временами я неслась так быстро, что теряла контроль над ситуацией, скользя на пятой точке в надежде, что мне удастся не врезаться в приближавшиеся булыжники.

К счастью, мои образцы были хорошо упакованы в рюкзаке, так что по возвращении в лабораторию мы благополучно приступили к длительному и трудному анализу. Нашли ли мы наконец место с настолько неблагоприятными условиями, что там не выживают даже обитатели земных недр? Вроде бы да, поскольку наши попытки выделить из образцов ДНК не увенчались успехом. Это может означать, что организмам, которые попытались бы поселиться в вулкане Иррупутунку, не хватало бы энергии, чтобы компенсировать расходы на выживание. Но не исключено, что это не конец истории. И если бы я собрала более объемные образцы или если бы мы выделяли ДНК другим способом, возможно, мы сумели бы обнаружить живую биомассу. Впрочем, термодинамика постулирует, что предельные условия для жизни должны существовать. И быть может, мы нашли их на Иррупутунку.

Изучение вулканов — не единственный способ

искать такие границы. Сила термодинамики в том, что она предсказывает, где и когда живые организмы ограничены в энергии и активности — даже обитатели земных недр, которые функционируют за пределами человеческих возможностей.

### Как термодинамика определяет границы жизни?

“Термо” означает “тепло”, а тепло — это форма энергии, тогда как “динамика” означает “движение” или “изменение”. Таким образом, термодинамика занимается вопросами превращения энергии, а это важнейшая функция жизни в нашем понимании. Для деления клеток необходимо копировать ДНК, предварительно развернув двойную спираль, а это химическая реакция. Бактериальная клетка перемещается в чашке Петри за счет целого каскада химических реакций. Почти все, что делает клетка — микробная или человеческая, — это результат химических реакций. Для осуществления химических реакций любой живой клетке нужна энергия. И каждая клетка получает эту энергию из *других* химических реакций.

Функции жизни можно свести к следующему: жизнь перемешивает химические вещества,

выделяющие тепло или энергию (как маленькие грелки для рук, которые греют, когда их встряхивают), и потом использует энергию от этих химических реакций для чудесных, ужасных или будничных дел. А термодинамика определяет законы переноса энергии между этими химическими реакциями.

Одна из важнейших химических реакций, обеспечивающих энергию для жизни, — это дыхание. У тех из нас, кто на древе жизни располагается на ветви животных, слово “дыхание” вызывает сильные эмоции, поскольку без дыхания мы не проживем и нескольких минут. Но что такое дыхание на самом деле? Вообще говоря, дыхание не сводится к затягиванию воздуха в легкие. Легкие тут ни при чем. Приравнивать дыхание к заполнению легких воздухом — все равно что приравнивать ужин в ресторане к заказу блюд у официанта. Чтобы поужинать, сделать заказ действительно придется, но суть ужина заключается в еде. Аналогично суть дыхания — не заполнение легких кислородом, а химические реакции с участием этого кислорода.

Законы термодинамики определяют, достаточно ли клеткам энергии, полученной от дыхания, для реализации всех необходимых функций.

Можно рассуждать следующим образом: дыхание — как первый спуск на американских горках. Все американские горки начинаются с того, что вагончики поднимаются на высокий холм, а потом падают с его вершины. Импульс, возникающий при этом первом падении, питает всю последующую серию подъемов и спусков, так что на траектории аттракциона вы уже никогда не поднимаетесь выше, чем в первый раз, поскольку для этого нужно больше энергии, чем у вас было изначально. Вот и энергии, которую организм получает от дыхания, должно хватать на реализацию всех клеточных функций. Клетки должны двигаться, защищаться, общаться между собой и воспроизводиться. Чем выше первый подъем, тем больше они смогут сделать.

В конце 1800-х годов физик-теоретик Джозайя Уиллард Гиббс разработал количественную теорию для описания превращений энергии, и с ее помощью можно оценить, сколько энергии мы получаем при первом падении с “американских горок” жизни. Этот параметр называется свободной энергией Гиббса $\Delta G$ (произносится “дельта Же”). Символ $\Delta$ обозначает разницу между двумя химическими состояниями (между верхней и нижней точкой американских горок), и поэтому

ΔG — это количество энергии, выделяющейся в ходе химической реакции (или при первом падении на американских горках). Если величина ΔG отрицательная, есть энергия для жизни. Если она положительная, жизнь должна затратить энергию, чтобы произвести химическую реакцию. А когда ΔG равно нулю, никаких химических реакций не происходит, иными словами, это смерть. Таким образом, ΔG — чрезвычайно важный показатель для изучения жизни, поскольку он сообщает, при каких условиях, если использовать метафору, реакции кладут деньги в банк, какие реакции стоят денег и какие реакции не могут протекать, пока что-то не изменит их ΔG.

Я считаю, что свободная энергия Гиббса — ключевой параметр в разгадывании тайны жизни на Земле или даже во всей Вселенной, и поэтому мне кажется целесообразным чуть-чуть позаниматься математикой, чтобы понять суть этой величины. И даже если вы, как и я, не большой любитель математики, последуйте за мной, поскольку понимание смысла ΔG придаст вам сил.

Параметр ΔG можно выразить в виде суммы двух слагаемых. Первое слагаемое $\Delta G^{0}$ (так называемая стандартная энергия Гиббса, произносится “дельта Же ноль”) говорит о том,

насколько хороши химические соединения, чтобы реагировать между собой. Вспомните о химических грелках для рук. *Реагенты* — это химические вещества, которые вступают в реакцию, когда вы встряхиваете грелку (в данном случае это порошок железа и кислород), а *продукты* — это вещества, образующиеся в результате реакции (оксид железа, или ржавчина). $\Delta G^0$ сообщает, какова вероятность, что взятые вами вещества будут реагировать между собой. Химические вещества в грелках для рук (порошок железа и кислород) специально подобраны для взаимодействия и поэтому характеризуются отрицательным значением $\Delta G^0$. Нельзя сделать грелку для рук из речного песка, поскольку в нормальных условиях он не реагирует с кислородом.

Второе слагаемое, которое нужно прибавить к $\Delta G^0$, чтобы получить полную энергию $\Delta G$, показывает, сколько реагентов у вас осталось. Новый пакет с неиспользованными реагентами обладает большей потенциальной энергией, чем тот, что уже почти исчерпан. Переменная $Q$ (коэффициент реакции) показывает, сколько исходного вещества уже превращено в продукт. В результате мы получаем уравнение для свобод-

ной энергии Гиббса в полной форме[39]:

$$\Delta G = \Delta G^{0} + RT\ln Q$$

Правда же красиво? Даже если вы так и не думаете, вы наверняка согласитесь, что уравнение полезное. Компактного, изящного уравнения достаточно, чтобы понять, сколько есть энергии для жизни. Это действующее правило может показать, где искать новые возможности для жизни. Оно предсказывает наличие доступной энергии в фумаролах вулкана Иррупутунку, а также на спутниках Юпитера и на многих других космических телах. Если этой энергии достаточно для поддержания жизненной активности, нам остается лишь найти существ, которые ее используют, — и вуаля, мы обнаружим новые формы жизни на Земле или за ее пределами.

## Как жизнь добывает энергию, пользуясь термодинамикой?

Чтобы понять, как жизнь извлекает энергию из

---

**[39] Примечания: 39**

Другие множители в этом уравнении: универсальная газовая постоянная $R$ и температура $T$ (в кельвинах), а $ln$ — символ натурального логарифма. Обсуждать их мы не будем, поскольку в нашем контексте это не нужно.

отрицательного значения ΔG, удобно сравнить начало любой реакции с шариком, помещенным на вершину холма. Когда вещества начинают реагировать, шарик скатывается вниз, выделяя энергию. Часть энергии теряется на трение, но можно установить цепочку лопастей, которые будут “подхватывать” энергию катящегося шарика. Если вы соедините лопасти с турбиной, заряжающей батарейку, то сможете использовать батарейку для любых нужд.

В биологической организации большинства живых существ роль лопастей и турбин играют ферменты, малые молекулы и химические градиенты, такие как протон-движущая сила, которую мы обсуждали в предыдущей главе. А заряжаются они от химических реакций, а не от скатывающихся с холмов шариков. Но в любом случае это энергия, так что изменение энергии катящегося шарика, рассчитанное по его массе, высоте склона и ускорению свободного падения, математически эквивалентно ΔG химической реакции, рассчитанному по приведенному выше уравнению. С помощью ΔG вы даже можете превратить энергию дыхания во что-нибудь странное — например, в энергию падающего с крыши ананаса. Чтобы хватало энергии “иногда

вскидывать руки к небу", как делает певец Тайо Круз, мне нужна энергия ананаса, падающего с крыши двухэтажного дома. Но чтобы поддерживать долгую и полноценную человеческую жизнь, насыщенную любовью и важными эмоциями, мне пришлось бы сбросить с крыши четыре миллиарда ананасов. Возможно, вам скучно сводить все замечательные проявления жизни к падающим с крыш ананасам, но этот пример помогает приоткрыть завесу над тайнами термодинамики, которая незаметно управляет миром откуда-то из-за сцены.

В процессе дыхания человека градиент энергии $\Delta G$ обеспечивается химической реакцией между кислородом и сахаром, в которой кислород "восстанавливается", а сахар "окисляется". Это так называемая окислительно-восстановительная реакция, или редокс-реакция (от англ. *redox*, поскольку первое вещество оказывается восстановленным — *REDuced*, принимая избыточные электроны от второго вещества, а второе становится окисленным — *OXidazed*). Для людей, щенков, грибов и большинства других существ, которые окружают нас в повседневной жизни, окислительно-восстановительная реакция между кислородом и органическими веществами

— единственная возможность для получения $\Delta G$. Эта реакция энергетически очень выгодная, то есть значение $\Delta G^0$ сильно отрицательное, и мы можем пользоваться этим для самых разных сложных дел — от завязывания шнурков до победы в чемпионате мира.

На основании всего сказанного может сложиться впечатление, будто жизнь зависит от кислорода. Но это не так. Еще может показаться, что окислительно-восстановительные процессы всегда связаны с кислородом, однако и это не так. Свободная энергия Гиббса диктует правила, и в соответствии с этими правилами дыхание кислородом — не единственная химическая реакция с отрицательным значением $\Delta G^0$.

В жестких условиях земных недр кислорода мало. Впрочем, живущим там микробам он и не нужен. Кислород токсичен. Он обладает чрезвычайно высокой реакционной способностью и создает массу проблем для других химических реакций, необходимых живым клеткам. Существа, дышащие кислородом, вынуждены производить целые полчища ферментов, которые разбредаются по телу и уничтожают продукты реакций с участием кислорода, вышедшего из-под контроля. Нам приходится прилагать много усилий,

чтобы не погибнуть от собственного дыхания.

Однако свободная энергия Гиббса показывает, что кислород — лишь один элемент из широкого спектра химических веществ, чей энергетический запас может служить для поддержания жизни. Иными словами, живые существа способны “дышать” самыми необычными способами. На самом деле дыхание не обязательно связано с вдыханием кислорода. Иногда на лекциях мне приходится переучивать студентов, многократно задавая вопрос “Обязателен ли кислород для дыхания?”, пока ответ “да” не сменится на “нет”. Дело в том, что почти любая окислительно-восстановительная реакция, даже без участия кислорода, используется теми или иными формами жизни для извлечения энергии. И все эти окислительно-восстановительные реакции обеспечивают дыхание всех видов жизни на Земле, хотя люди никогда не смогут дышать чем-то кроме кислорода. Обитатели земных глубин используют для дыхания другие, менее мощные соединения, о которых мы обычно не думаем, и селятся в местах обитания с такими термодинамическими ограничениями, которые для нас непреодолимы. В таких средах энергетические запасы обычно невелики — и жизнь теплится на

грани термодинамических возможностей.

## Расширяем границы дыхания

Итак, если эти существа дышат не кислородом, тогда чем же? Чаще всего для дыхания используются соединения азота и серы в разной степени окисления, то есть их энергетический запас несколько различается. Главным образом, это нитраты (удобрения), нитриты (ядовиты для рыб), оксид азота (веселящий газ) и сульфаты (их много в морской воде), а также сульфиты и тиосульфаты (они настолько востребованы из-за своей высокой энергетической ценности, что редко встречаются в природных системах). Углерод способен образовывать такое количество веществ, поддерживающих дыхание, что мы пока еще знаем далеко не все[1]. Этот неисчерпаемый список включает фумараты (вещества с фруктовым запахом, которые часто добавляют в качестве консервантов в продукты питания, поскольку они убивают большинство микробов), диметилсульфоксид (солнцезащитное средство, производимое водорослями), триметиламин (запах рыбы) и хлорсодержащие соединения углерода (применяются в авиации для очистки

истребителей)[2].

Возможно, самым удивительным соединением углерода, которым можно дышать, является углекислый газ. Это вещество — побочный продукт нашей жизнедеятельности. Наш организм никак его не использует и должен как можно быстрее вывести через легкие. Однако для таких микробов, как метаногены и ацетогены[40], углекислый газ столь же хорош, как для нас — живительный кислород.

Хотя идея дышать углекислым газом может показаться столь же нелепой, как расчесывание волос не от головы, а к голове, термодинамика утверждает, что этот газ пригоден для поддержания жизни. Вообще, обитатели земных глубин, как это ни странно, могут использовать для дыхания большинство соединений из периодической таблицы элементов. Казалось бы, радиоактивный уран не относится к элементам системы жизнеобеспечения, однако он служит именно таковым для некоторых подземных микроорганизмов. Мышьяк — это крысиный яд и излюбленное средство отравителей в детективных романах и в

**[40] Примечания: 40**

Конечно же, растения тоже используют диоксид углерода, но они не извлекают из него энергию напрямую. С помощью энергии фотонов света они превращают его в сахара и кислород.

реальной жизни, однако обитатели земных недр дышат и им, заодно очищая загрязненную нами среду. Золото не очень активно вступает в химические реакции (именно поэтому люди испокон веков использовали его для изготовления монет и ювелирных украшений), однако некоторые микробы существуют за счет свободной энергии Гиббса, которая образуется при восстановлении растворенного золота и его превращении в твердые частицы. Выясняется, что многие металлы в твердом состоянии прекрасно подходят для дыхания, и в их числе железо, марганец, селен, ванадий и хром. Иными словами, обитатели земных глубин фактически способны “дышать минералами”.

В периодической таблице есть свыше двадцати элементов, которыми научились дышать хотя бы некоторые микробы[3][41]. И такие альтернативные способы дыхания широко распространены, просто мы редко их замечаем. Возможно, “дыхание минералами” в истории Земли использовалось чаще, чем дыхание таким ядовитым веществом, как кислород. Если бы эту книгу писала не я, а

**[41] Примечания: 41**

Среди них: водород, ванадий, сурьма, хром, марганец, железо, кобальт, никель, медь, палладий, кислород, азот, углерод, фтор, хлор, сера, бром, селен, мышьяк, йод, золото, платина и другие элементы.

подземные микробы, дышащие твердыми камнями, их могло бы поразить, что мы дышим *газом*. Может, это *мы* странные существа? Кислород появился на Земле лишь в середине ее истории. А микробы дышали металлами всегда. Для нас это прекрасная новость, поскольку такие способы дыхания позволят нам избавиться от промышленных отходов и токсичных выбросов, если мы уговорим микробов помочь нам это сделать.

Хотите узнать, как широко раздвигаются границы термодинамических возможностей? Что, если некоторые обитатели земных глубин дышат такой материей, которую вообще нельзя отнести к химическим соединениям? Химические соединения состоят из атомов, а атомы — из протонов, нейтронов и электронов. Когда живые организмы дышат химическими соединениями, всю работу делают электроны, которые перепрыгивают с одного химического вещества на другое и тем самым осуществляют окислительно-восстановительные реакции. Выясняется, что некоторые формы жизни не хотят возиться с громоздкими химическими структурами. И такие существа, главным образом обитатели земных глубин, добывают энергию из самых фундаментальных единиц — из чистых электронов.

Микробы используют чистые электроны несколькими способами. Некоторые формируют специфические структуры, названные нанопроводами: они действуют как крохотные электрические провода, где движущимися электронами создается ток[4]. Другие проложили своеобразные скоростные пути из металлсодержащих белков для передачи электронов. Некоторые такие микробы могут накапливать так много металлсодержащих белков, что их клеточные стенки больше похожи на стальные кольчуги, чем на обычные оболочки. В таких структурах электроны перемещаются во всех направлениях, так что клетка получает доступ к энергии почти незамедлительно. Для каких-то микробов точный механизм неизвестен, мы просто называем его прямым межвидовым переносом электронов (*direct interspecies electron transfer*, DIET). Когда я слушаю ученых, занимающихся изучением таких микробов, их выступления больше напоминают мне доклады специалистов по электронике, нежели биологов, поскольку они оперируют такими терминами, как циклическая вольтамперометрия, катоды и аноды. Хотя на электроны приходится лишь десятимиллиардная доля массы атома, живые существа давно

поняли, что именно в них заключается вся сила. Когда речь идет о термодинамических условиях для жизни, разумно исключить все промежуточные химические структуры и сосредоточиться непосредственно на электронах. Преимущество такого подхода в том, что не нужно ждать, пока химические вещества проникнут в клетки. Можно просто отрезать вилку от удлинителя и применить его в качестве дыхательной трубки.

## Скорость тоже важна

Однако не все химические реакции, сопровождающиеся выделением энергии, могут служить для поддержания жизни. Некоторые происходят слишком быстро. Скоростями реакций занимается кинетика, и она важна не меньше, чем термодинамика. Можно сказать, что отдельные химические вещества так сильно желают соединиться друг с другом и взаимодействуют столь быстро, что у живых существ просто нет времени выхватить высвобождающуюся энергию. А какие-то реакции протекают, наоборот, медленно. И жизнь этим охотно пользуется. Химические реакции словно благодарят микробов за помощь в своем осуществлении, расплачиваясь с ними

энергией.

Если вы, например, летите в Нью-Йорк, чтобы посмотреть шоу на Бродвее, теоретически вы можете пройти расстояние километров в шестнадцать от аэропорта до театра пешком. Но с большой вероятностью вы предпочтете взять такси или поехать на метро, чтобы ускорить процесс. Живые организмы ускоряют химические реакции, которые хотят осуществиться, но по той или иной причине не могут сделать это быстро. Все живые существа на Земле — своего рода таксисты, которые доставляют химические вещества к месту назначения. Но, как все таксисты, они делают это за плату. Плата поступает в виде градиента протонов, который я описывала в предыдущей главе. Этот градиент используется для производства АТФ и для запасания энергии, которую клетка затем может потратить на разные нужды, например на то, чтобы противостоять воздействию кислоты или щелочи. Но если химическая реакция и так протекает достаточно быстро, живые организмы остаются без работы. И этот физический принцип фактически переворачивает наши представления о жизни: быть может, жизнь эволюционировала не благодаря тому, что научилась выхватывать энергию

из химических реакций, а по той причине, что медленным химическим реакциям нужны были катализаторы? Может быть, миром управляют химические соединения?

Вот еще один пример, позволяющий углубить нашу аналогию: рассмотрим реакцию между сульфидом и кислородом. Атом серы в сульфиде нагружен максимальным количеством электронов, с которым только может управиться, и поэтому ищет, куда бы их пристроить. А кислород, напротив, — одна из самых жадных до электронов молекул во всей Вселенной, которая с удовольствием примет электроны от сульфида. В большинстве условий эти два вещества реагируют слишком быстро, чтобы живые существа успели поучаствовать в процессе. Но в природе есть немало мест, где кислород и сульфиды разделены физической преградой и не могут взаимодействовать напрямую. В частности, в зловонных отмелях у океанских берегов сульфиды находятся глубоко под слоем ила, куда не проникает кислород из воздуха. В таких местах иногда можно увидеть торчащие из ила тонкие белые нити. Это нитчатые бактерии. Они частично окисляют сульфид, превращая его в твердую элементарную серу, которую затем переносят

к кислороду, вертикально скользя в своих чехлах, как пчелы, переносящие пыльцу с одного растения на другое. И когда сера и кислород наконец встречаются, они готовы реагировать, а бактерии, окисляющие сульфид, запасают выделяющуюся в ходе реакции энергию. Как хорошо оплачиваемые таксисты.

## Правила жизни

Жизнь обитателей земных недр чрезвычайно сложна, так зачем нам интересоваться какими-то общими термодинамическими законами? Нельзя ли просто продолжать потихоньку открывать новые способности живых существ, не обращая внимания на объединяющие принципы, которые ими управляют? Нет, так не получится, если мы надеемся продвинуться дальше по сравнению с нашими сегодняшними знаниями. Понимание термодинамических законов жизни дает возможность предсказывать, где еще мы можем ее обнаружить, будь то какие-то странные места на Земле или вообще другие планеты.

Итак, вот какие термодинамические ситуации применимы к жизни.

1. Процессы с выделением энергии (отрицательное значение ΔG), но замедленные или заблокированные. Это важный источник энергии для поддержания жизни. Там, где наблюдается такая ситуация, есть шанс обнаружить живых существ.

2. Процессы с выделением энергии (отрицательное значение ΔG), которые происходят так быстро, что живые существа не успевают принять в них участие, или в которых выделяется так мало энергии, что бессмысленно ее использовать. Эти условия бесполезны для жизни, и такие реакции можно назвать абиотическими. Пример реакции такого типа — огонь[42].

3. Процессы, требующие дополнительного энергетического вклада (положительное значение ΔG). Такие процессы не могут обеспечивать функционирование живых организмов. Если клетке нужно осуществить подобную реакцию, ей придется затратить энергию, полученную из другого источника, или манипулировать величиной *Q*, чтобы изменить знак ΔG.

4. Процессы, протекающие без выделения или

---

**[42] Примечания: 42**

Эверетт Шок и Эрик Бойд выразились красочнее: “То, что способно воспламеняться, не подходит для еды” (Shock E. L., Boyd E. S. *Principles of geobiochemistry*. Elements. 11, 395–401 (2015)).

поглощения энергии ($\Delta G = 0$). Это смерть.

Вот и все. Термодинамические правила, определяющие границы жизни, несложные, но важные. Они показывают: даже если нам кажется, что мы уже имеем исчерпывающий список процессов, обеспечивающих существование живых организмов, есть еще гораздо больше неоткрытых возможностей. Каждый раз, когда ученый говорит: “Ага, эта химическая реакция могла бы поддерживать жизнь. Интересно, так ли это…” — в конечном итоге совершается важное открытие. Открытия такого рода происходят раз в несколько лет — маленькие подарки для геобиологов. И некоторые процессы получили симпатичные названия. Например, название процесса “анаммокс” похоже на имя злодея из вселенной *Marvel*. Существование этого процесса было предсказано в 1970-е годы, а открыт он был в 1990-е. Анаммокс — это реакция окисления аммония (отхода жизнедеятельности других микробов), сопряженная с восстановлением нитрита (соединения азота в промежуточной степени окисления), в изобилии присутствующего в нидерландских каналах[5]. Микробы, живущие за счет анаммокса, выделяют гидразин. А гидразин — это ракетное топливо, которое во время Второй мировой войны ис-

пользовали для заправки истребителей, а теперь применяют в более мирных целях, например для отправки космических кораблей на Марс.

У нас есть достаточно оснований полагать, что в последующие годы мы обнаружим новые типы дыхания[6][43]. Как создатель периодической таблицы Дмитрий Менделеев на основании атомных масс предсказал существование химических элементов, которые были открыты только через несколько лет, так и мы можем использовать наши знания об окислительно-восстановительных реакциях, чтобы предсказывать новые метаболические пары окислителей и восстановителей, способные поддерживать жизнь. А еще одно достоинство этих термодинамических правил заключается в том, что они действуют не только на Земле. Они открывают перед нами двери к неизведанным источникам жизни на нашей планете, но также позволяют нам в этом поиске выйти за ее пределы.

Умение обитателей земных глубин дышать такими необычными способами поразительно, но это не единственное, на что они способны благодаря своему свободному подходу к термо-

---

**[43] Примечания: 43**

В качестве хорошего обзора советую работу Lu G.-S. et al., 2021.

динамике. Держитесь крепче, скоро вы увидите, что жизнь бывает еще причудливее.

# Глава 7
# Жизнь на грани возможного

Чтобы рассказать о других странностях, я должна изложить концепцию, не имеющую аналогии в нашей повседневной жизни. Мне придется говорить о “термодинамическом пространстве”. В предыдущей главе я объясняла, что живые существа могут дышать не только кислородом, но даже минералами — попросту потому, что дышать минералами выгодно в термодинамическом и кинетическом плане. Возможно, решение неожиданное, но понять такую идею несложно. К сожалению, аналогии для концепции термодинамического пространства и его связи с живыми организмами в человеческой жизни нет. Поэтому нам с вами придется выйти за привычные границы.

Термодинамическое пространство определяется спектром химических реакций, способных поддерживать существование живых организмов в конкретной среде. Поскольку обитатели земных недр часто существуют на границе термодинамически допустимых условий, изменения

их термодинамического пространства отличаются от того, с чем сталкиваемся мы. Большинство организмов, с которыми мы напрямую контактируем, как и мы сами, либо дышат кислородом, либо осуществляют фотосинтез. Хотя эти процессы и высокоэнергетические, термодинамические условия такого существования фактически не меняются. Без пищи мы погибнем, как и без кислорода, но наше термодинамическое пространство при этом не изменится. Зернышко риса даст нам одно и то же количество энергии вне зависимости от того, голодаем мы или нет.

Если я напрягусь и попытаюсь-таки подобрать аналогию, которая могла бы передать опыт изменения термодинамического пространства, это будет путешествие. С вами не случалось, что, приехав в новое место, вы начинали чувствовать, будто все, что вам казалось реальным, вдруг исчезло? Наверное, нечто подобное происходит с обитателями земных глубин при изменении их термодинамического пространства: их способ дыхания вдруг перестает приносить энергию, хотя реагирующие вещества все еще есть.

Со мной однажды произошел такой фокус, когда я была в Сеуле, в Южной Корее. Мы с коллегами сидели за ужином, а официанты вереницей

подходили с небольшими порциями еды и уносили пустые тарелки. Блюда были интересными и незнакомыми: ярко-розовый суп, искусно разложенные овощи, одна-единственная креветка-бабочка на решетке из чего-то плотного. Я с удовольствием принялась жевать решетку, но ко мне тут же бросился раскрасневшийся от смущения официант и сообщил, что она сделана из пластика. На следующий вечер у нас опять был банкет, мы болтали с коллегами, а официанты приносили блюдо за блюдом. Я подняла глаза и увидела нежную говяжью котлету на подложке из каких-то палочек. “Ага, — подумала я, — вчера все мне было в новинку, но теперь-то я знаю, что едят, а что нет. Это подложка из палочек, палочки не едят”. Как бывалый путешественник, я расправилась с мясом и оставила палочки на тарелке. Заметив их, официант удивленно взглянул на меня, и я тут же их съела. Они были обалденно вкусными.

Для обитателей земных глубин погружение в другие подземные слои, выброс на поверхность из грязевого вулкана и многие другие изменения термодинамического пространства, наверное, таят в себе столько же неожиданностей, как для нас — ужин в незнакомой стране. В этой главе я

опишу нашу работу на архипелаге Шпицберген в Норвегии, где обитатели земных недр имеют уникальную возможность изменять свое термодинамическое пространство. А потом расскажу, как они ведут себя в таких странных термодинамических ситуациях: ведут термодинамическую войну, добывают энергию, чередуя прямое и обратное дыхание[44], и умудряются жить при абсолютном минимуме энергии.

## Шпицберген, Норвегия, 79° северной широты, 2016 год

Была середина ночи, но светило яркое солнце. Я повернулась к своей аспирантке Джой Бонджорно и спросила: “Ты в порядке? Пойдем спать или займемся следующим керном?” В июле на 79-й параллели северной широты, проходящей выше основной части Гренландии, Канады и России, солнце не заходит. На протяжении суток оно движется по небу по эллиптической траектории. Если бы мы с Джой участвовали в съемках для телепередачи, мы бы просто поместили наши об-

**[44] Примечания: 44**

Возможно, это слишком сильно напоминает вечный двигатель, но не беспокойтесь, при написании этой книги ни один закон физики не пострадал.

разцы в гигантский аппарат и получили готовые данные. Но в реальной жизни ученые работают иначе. Много часов мы делали тонкие срезы кернов и готовили их для последующих измерений в лаборатории по возвращении домой. С учетом шестичасовой разницы между часовыми поясами, яркого полуночного солнца и понимания, что максимально быстрая обработка кернов позволит получить наиболее качественные данные, мы с Джой не намеревались идти спать. Она ответила: “Если ты готова продолжить, я тоже. Давай возьмем следующий керн”.

Мы работали за самодельным столом в крохотном научном городке Ню-Олесунн на побережье Кингс-фьорда — части архипелага Шпицберген в Северном Ледовитом океане. Со всех сторон нас окружали голубые ледники и островерхие горы. Вершины гор имели причудливую пирамидальную форму, образовавшуюся в результате неравномерного выветривания горных пород. За эти вершины в форме короны фьорд и получил свое название “королевского”. Изредка мимо нас пробирались арктические тюлени и лисы, а низкорослые пушистые олени, казалось, не видели ничего, кроме мха или травы. Медленно проплывали гигантские айсберги ярко-синего цвета,

как напиток *Blue Razzberry*, который обожают мои дети. А глупыши — похожие на чаек птицы с плотными телами в форме пассажирских самолетов — скользили по поверхности воды, как художники, рисующие воздухом. На архипелаге нет деревьев или высоких кустов, так что бриз не порождал никаких звуков за исключением легкого плеска волн. Другими различимыми звуками были ритмичные хлопки разрываемых пластиковых пакетов *Whirl-Pak*, чпоканье кримпера, с помощью которого мы запечатывали стеклянные флаконы с растворенными газами, и хлюпанье носов, вытираемых рукавами курток.

Мы с Джой работали на франко-германской станции AWIPEV, а еду для всего населения города готовили служащие Кингс-фьорда, которые выполняли всю организационную работу для поддержки исследований. Архипелаг Шпицберген — самая северная точка мира, где живут люди, он находится в двух тысячах километров к северу от Норвегии и в восьмистах километрах от Северного полюса. Теоретически он не принадлежит ни одной стране, что затруднило мне заполнение университетских формуляров при оформлении поездки. На практике, находясь на Шпицбергене, вы ощущаете себя либо в Норвегии, либо в Рос-

сии. Дело в том, что в соответствии с Версальским договором, подписанным по окончании Первой мировой войны, контроль над этой территорией был передан Норвегии, но и Россия получила определенные права. На архипелаге два главных города: Лонгйир и Баренцбург. В каждом проживает менее тысячи человек, есть несколько магазинов и ресторанов, нет светофоров, но зато много белых медведей. Всего на Шпицбергене живет около трех тысяч человек — примерно столько же, сколько медведей.

Городок Ню-Олесунн гораздо меньше по размеру, и в нем постоянно проживает лишь несколько десятков человек. Помимо научной работы основная задача здешних жителей — не стать обедом для белых медведей, что требует некоторых усилий. В Ню-Олесунне есть несколько зданий, электростанция, пара-тройка автомобилей и уйма лающих ездовых собак. Если вы увидите белого медведя, порядок действий прост: вы вбегаете в ближайшее здание (для этого двери здесь никогда не запираются) и звоните сторожу, чтобы он предупредил остальных. Если до ближайшего здания быстро добежать невозможно, ситуация усложняется. Хотя бы один член коллектива должен уметь пользоваться мощной винтовкой

и ракетницей. Если вы оказываетесь у границы городка, обозначенной крутым земляным валом, вы обязаны остановиться и зарядить винтовку четырьмя патронами калибра 0,308. На месте выполнения полевых работ кто-то один не имеет права заниматься научными изысканиями, а должен оглядывать окрестности на случай появления медведей. Когда эта задача выпадает мне, я всегда чувствую себя дилетантом и бездельницей: я стою, а все трудятся. Но все же это небольшая плата за то, чтобы избежать растерзания белым медведем.

Кстати, об агрессивных животных. Полярная крачка — тоже не очень мирное существо. Эта небольшая птица каждый год перелетает через весь земной шар, получая билет в вечное лето за счет высокоэффективной аэродинамики полета. Шпицберген почти необитаем, но полярные крачки не желают жить в пустынных местах. Они хотят жить в самом центре исследовательского городка, где постоянно пикируют над нами и клюют в голову. Когда я сама еще не была близко знакома с этими птицами, мой коллега и муж Дрю Стин вернулся из экспедиции с удивительными фотографиями крачек, снятых крупным планом. Я недовольно спросила, зачем он так близко к

ним подобрался, а он ответил, что использовал камеру для самообороны.

К счастью, пока мы с Джой всю ночь работали под палящим солнцем, нас не атаковали ни крачки, ни белые медведи. Зато мы стали свидетелями странного зрелища, которое изменило ход наших исследований. Пока мы методично регистрировали и упаковывали каждый грамм осадочных пород из кернов, мы увидели, как по фьорду распространяется необычный прилив: все заливала вода, выглядевшая красно-коричневой в свете солнца и темно-красной в тени облаков. Поскольку вероятность библейской чумы была невелика, мы продолжили работу. Позже мы узнали, что эта красная вода вытекала из реки Байелва, которая при летнем таянии ледников переносит богатые железом отложения. Мы видели именно то вещество, из которого состояли изучаемые нами отложения, — материал, неожиданным образом изменяющий термодинамическое пространство обитателей земных глубин и подрывающий наши самые основополагающие представления о жизни. Кажется, например, что в Арктике жизнь должна протекать неспешно, поскольку там господствуют холод, тьма и лед. Однако обитателям земных глубин нет дела до солнечного света или

холода. Для них важен показатель ΔG. При очень невысоком уровне энергии в окружающей среде это ярко-красное железо служит энергетическим топливом, которое обитатели земных глубин используют, когда приходит время сражаться.

## Термодинамическое оружие

В земной коре нет микробов, способных дышать всеми пригодными для дыхания химическими веществами. Микробы поделили их между собой. Не из благородства. Дело в том, что за наличие любого гена в геноме приходится платить, и поэтому микробы вынуждены специализироваться. Такое разделение труда предоставляет интересные возможности для соревнования. Я рассказывала об уравнении для свободной энергии Гиббса, которое можно использовать, чтобы оценивать имеющееся количество энергии. Но микробы из земных недр не пассивны. Они заставляют ΔG работать на себя и манипулируют им себе на пользу. Нам многое известно о том, как воюют друг с другом микроорганизмы на поверхности Земли: они производят убийственные антибиотики, накапливают питательные вещества и растут невероятно быстро, чтобы быть впереди

всех. Подземные жители тоже это делают, но еще они воюют друг с другом с помощью термодинамики. Если у одного микроба $\Delta G$ лучше, чем у другого, первый может второго *задушить*.

Звучит жутковато. Но такие термодинамические войны постоянно происходят в иле на дне океанов, озер и устьев рек. Самые агрессивные воины в термодинамических битвах — микробы, дышащие сульфатами, эдакие подземные полярные крачки, если хотите. Сульфат — химическое соединение без цвета и запаха, которое спокойненько плавает повсеместно в Мировом океане. В нашем внешнем мире, насыщенном кислородом, сульфат довольно стабилен. Мы глотаем его с питьевой водой и даже этого не замечаем. Но обитатели земных глубин делают из него живую материю. Если они дышат сульфатом, то превращают его в сероводород. А сероводород, в отличие от сульфата, не заметить невозможно. Он взаимодействует с железом, образуя черный шлам или блестящий пирит (“золото дураков”), и убивает мелких животных. Он пахнет тухлыми яйцами, наполняя зловонием прибрежный ил. Он закисляет нефтяные скважины и разъедает корпуса кораблей, мешая человеческой деятельности. Но образование сероводорода — лишь одна причина,

почему сульфатредукторы являются королями подземного мира. Вторая причина заключается в том, что большая величина $\Delta G^0$ обеспечивает им гигантское количество энергии.

Чтобы понять смысл параметра $\Delta G^0$, нужно на минутку вернуться к нашему уравнению $\Delta G = \Delta G^0 + RT\ln Q$. Как я объясняла в предыдущей главе, $\Delta G^0$ — только часть уравнения, но весьма важная. Большое значение $\Delta G^0$ означает, что сульфатредукторы получают при дыхании больше энергии, чем другие микробы при таком же количестве исходных субстратов. А что делает организм с лучшим показателем $\Delta G^0$, чем у остальных? Дорастает до очень большого размера? Скорее всего, нет, поскольку сульфат не может достаточно быстро диффундировать внутрь очень крупных клеток в процессе дыхания. Синтезирует массу антибиотиков и уничтожает соперников? Тоже не очень хорошая идея, ведь микробы зависят от своего окружения для получения пищи и витаминов, так что убивать всех подряд невыгодно. Выгодно устранить только прямых конкурентов.

А кто эти прямые конкуренты? Любые микробы, которые питаются той же пищей. Вспомним, что в процессе дыхания электроны, восстанавливающие окислитель (для нас — кислород, для

сульфатредукторов — сульфат), берутся из пищи. Мы, люди, получаем их из сахаров и других органических молекул. Сульфатредукторы обычно питаются очень простыми соединениями, например ацетатом, формиатом или простейшей пищей на Земле — растворенным газообразным водородом ($H_2$). Этот газ образуется в реакциях серпентинизации, но еще и в гораздо более широком спектре процессов. Водород — побочный продукт жизнедеятельности многих подземных организмов, так что он производится постоянно. И у него есть одно свойство, которого нет у всех остальных питательных веществ: он свободно входит в клетки и выходит из них, поскольку это очень маленькая незаряженная молекула. И поэтому микробы расхватывают его, как продукты на дегустации в супермаркете.

Сульфатредукторы — крупные микробы, и они могли бы просто забирать весь водород, заставляя конкурентов голодать. Но поскольку молекулы водорода маленькие и незаряженные, никто не умеет физически ограничивать их перемещение. Они плавают туда-сюда через клетки, как привидения проникают сквозь стены. Микробы не могут запасать водород. Но сульфатредукторы, как термодинамические лайфхакеры, прибегают

к более хитрому трюку. Поскольку все организмы в их среде существуют вблизи абсолютного минимума энергии, им всем требуется примерно одинаковое количество общей энергии $\Delta G$.

Однако сульфатредукторы исходно имеют большее значение $\Delta G^{\mathbf{0}}$, чем все остальные, и поэтому могут играть со второй частью уравнения — $RT\ln Q$. Никто — ни люди, ни сульфатредукторы — не в силах изменить $R$, $T$ или $ln$, ведь $R$ — это константа, $T$ — температура, а $ln$ — натуральный логарифм, математическая операция, просто кнопка на калькуляторе. Однако сульфатредукторы *могут* манипулировать показателем $Q$.

Для расчета $Q$ мы перемножаем активности[45] всех продуктов и делим их на активности всех реагентов, возводя каждую активность в степень, равную числу раз, которое эти вещества встречаются в уравнении химической реакции. Сульфатредукторы не могут повлиять на $R$, $T$ или функцию логарифма, но *способны* изменить активность химических веществ в среде. Они

**[45] Примечания: 45**

“Активность” химического вещества аналогична его концентрации, но учитывает влияние других химических соединений в реакционной среде на доступность этого вещества для конкретной реакции. Например, иногда соль “удерживает” химические молекулы, и поэтому, даже если в соленой и пресной воде концентрация вещества одинаковая, в соленом растворе оно будет менее активно участвовать в реакции.

делают это за счет потребления этих веществ с определенной скоростью, чтобы поддерживать их в удобной для себя концентрации. Поскольку сульфатредукторы имеют высокое значение $\Delta G^0$, *они достигают конкретной величины ΔG при более низком соотношении реагирующих веществ и продуктов реакции (Q), чем остальные микробы*. Это значит, что при максимальной эффективности сульфатредукторов концентрация водорода может стать такой низкой, что для конкурентов значение ΔG окажется положительным. А как вы помните, энергию можно получить только в ходе реакции с отрицательным значением ΔG.

Иными словами, сульфатредукторы лишают своих конкурентов способности дышать, понижая концентрацию доступного водорода. Они не выедают его полностью: он нужен еще им самим, и его продолжают вырабатывать другие микробы[46]. Сульфатредукторы просто так сильно понижают концентрацию водорода, что для микробов с более низким значением $\Delta G^0$ математика становится невыгодной. Хотя конкуренты сульфатредукторов окружены необходимой для жизни пищей, они не могут ее есть, поскольку

**[46] Примечания: 46**

Это главным образом микробы-бродильщики. Позже мы поговорим о них подробнее.

соотношение продуктов реакции и реагирующих веществ ($Q$) настолько низкое, что процесс дыхания не позволяет им получать достаточное количество энергии. Как потерпевший кораблекрушение моряк погибает от обезвоживания, хотя вокруг океан воды, так и эти микробы гибнут от голода, окруженные пищей. Сульфатредукторы выигрывают соревнование, поскольку доводят всю систему до своего предела термодинамических возможностей и сталкивают всех остальных с обрыва.

Но победа сульфатредукторов не окончательная. Ил и отложения, где происходят эти термодинамические баталии, образуются за счет медленного оседания частиц из рек и океанов на дно, под которым живут сульфатредукторы. В результате эти микробы постепенно отдаляются от источников сульфата, которым питаются. Поэтому у сульфатредукторов есть лишь несколько сотен или тысяч лет, чтобы праздновать победу. Когда не будет сульфата, сульфатредукторы не смогут дышать, концентрация водорода повысится, и этой возможностью воспользуются конкуренты.

Главные соперники сульфатредукторов — метаногены, то есть микробы, производящие метан.

Когда сульфат заканчивается, эти ребята могут испускать метан сколько их душе угодно, пока есть достаточно водорода и другой простой еды вроде ацетата, формиата и метилированных соединений. И хотя хочется поболеть за аутсайдера, не следует забывать, что метан — опасный парниковый газ, так что метаногенез — не очень полезный процесс. К счастью, один положительный побочный эффект этого термодинамического соревнования заключается в том, что сульфатредукторы не допускают производства метана в неглубоких отложениях, откуда ему легче было бы попадать в поверхностные слои воды и в атмосферу.

Если учесть полезный эффект сульфатредукторов, ограничивающих выделение метана в атмосферу, возникает вопрос, где на Земле этим крохотным воякам достается больше всего энергии. И именно об этом может рассказать загадочная красная вода, разлив которой мы с Джой наблюдали во фьорде на Шпицбергене. Когда ярко-красное железо, очищенное льдом, осаждается на илистое дно фьорда, оно производит регенерацию сульфатов, химически окисляя сульфиды примерно с той же быстротой, с какой они образуются. Как за несколько лет продемонстрировал

мой замечательный научный руководитель Бо Баркер Йоргенсен из Орхусского университета в Дании, в таких условиях во фьордах Шпицбергена сульфатредукторы не затрачивают на дыхание весь сульфат до его полного исчерпания, а бесплатно получают его назад. Как будто у них есть доступ к самозаполняющемуся холодильнику. Бо и его многочисленные студенты и постдоки на протяжении нескольких лет показывали, что, хотя в Арктике холодно и темно, тамошние подземные жители прекрасно существуют и заряжаются энергией, высвобождающейся в ходе реакции между железом и серой[1,2]. В результате метан в таких местах уходит в еще более глубокие слои отложений, чем обычно, подальше от атмосферы, и не имеет возможности усиливать климатические изменения, вызванные антропогенным влиянием.

## Дыхание наоборот

Однако отложения на дне арктических фьордов одаривают энергией не всех. У микробов, свалившихся в термодинамическую пропасть под натиском победителей, дела идут не так хорошо. Но вспомним: обитатели земных недр

отличаются от нас с вами. Они относятся к физике творчески. И некоторые из них получают энергию, производя дыхание в обратном направлении.

Позвольте мне подчеркнуть этот тезис. *В земной коре есть места, где некоторые химические реакции, обычно дающие энергию для дыхания, когда протекают в прямом направлении, начинают идти в обратном направлении и тоже сопровождаются выделением энергии*. Если живые организмы способны извлекать выгоду из таких перевертышей, они сумеют получать энергию, если будут “дышать наоборот”. Во внешнем мире аналогичных процессов не существует.

Как я рассказывала выше, сульфатредукторы могут так сильно понижать концентрацию водорода, что метаногенам не удается получать энергию за счет $\Delta G$. Но иногда в определенных условиях сульфатредукторы снижают концентрацию водорода настолько сильно, что $\Delta G$ для метаногенеза может сменить знак с минуса на плюс, и это позволяет метаногенам получать энергию от дыхания в обратном направлении. В такой ситуации метаногены потребляют обычный продукт своей жизнедеятельности — метан — и используют его для производства своих

обычных субстратов: водорода и диоксида углерода. Химические вещества, которые когда-то служили им пищей, становятся их отходами, и наоборот. Такое не может происходить во внешнем мире. Это как если бы вы свалились за борт корабля, но вместо того, чтобы всплыть на поверхность и спастись, стали бы погружаться все ниже, приближая неминуемую смерть, пока на определенной глубине не поняли бы, что способны дышать водой. Похоже на путешествие по числовой прямой: сначала числа становятся все меньше и меньше, но потом, после пересечения нулевой отметки, вновь начинают увеличиваться по абсолютной величине.

Если обитатели земных недр способны получать энергию, обращая дыхание вспять, когда накапливаются продукты их жизнедеятельности, не могут ли и люди делать то же самое? Если бы мы умели выполнять этот ловкий трюк, сдвигая величину $Q$ так сильно, чтобы сменился знак $\Delta G$, мы бы действительно *получали* достаточно энергии на пение арии, вдыхая диоксид углерода и сплевывая кусок сахара. Вот было бы круто! К сожалению, мы на это не способны. Если бы я взяла воздушный шар размером с Землю и наполнила его до предела углекислым газом, а затем

добавила бы туда шесть жалких молекул кислорода и одну крохотную молекулу глюкозы, чтобы сдвинуть $Q$ и повернуть эту реакцию, идущую с выделением большого количества энергии, в противоположном направлении, я бы все равно не смогла получить энергию от обратной реакции. Ведь даже в этом невыполнимом воображаемом эксперименте реакция все равно протекала бы в прямом направлении и сопровождалась выделением какого-то количества энергии и увеличением уже и так непомерно большого объема углекислого газа. Отрицательная величина $\Delta G^{0}$ для аэробного дыхания настолько велика, что при физиологически допустимых температурах и давлении никакие изменения количества реагентов и продуктов не позволят получить энергию от обратной реакции. И поэтому нам придется оставить мечту о том, чтобы поддерживать в себе силы во время марафона, откашливаясь энергетическими батончиками, синтезированными внутри нашего организма. Однако обитатели земных глубин могут это делать — по крайней мере, в своей версии марафона и энергетических батончиков.

Мы знаем, что метаногены способны на такие термодинамические перевороты, но остается

вопрос: могут ли они извлекать из этого пользу и одинаково ли хорошо растут в обоих случаях? Трудно доказать, что микробы получают энергию от реакций, идущих в обоих направлениях, поскольку они ленивые и плохо растут в искусственных условиях лабораторий. В 1990-е годы удалось вывести одну культуру, которая могла дышать за счет обратной реакции, но впоследствии она была утеряна[3]. Относительно недавно было замечено, что метаногены удаляют метан, который только что произвели[4]. А когда я добываю ил на дне океана для собственных экспериментов, я нахожу одних и тех же метаногенов и там, где метан выделяется, и там, где он удаляется[5]. Судя по всему, живые организмы действительно научились извлекать пользу из обратимых энергетических процессов. А почему бы и нет? Ведь мы знаем наверняка: если за счет ускорения медленной реакции возможно добыть энергию, значит, где-то какие-то микробы изобрели способ это делать.

Кажется, что подобные инверсии сродни вечному двигателю, а законы термодинамики такого не допускают. Однако, поскольку эта обратимость обусловлена переменами во внешней среде, изменяющими величину $\Delta G$, микробы не

могут производить энергию бесконечно. Когда в их окружении сильно меняется концентрация химических веществ, это срабатывает как внешний толчок для маховика, который заставляет весь циклический процесс идти то вперед, то назад тысячелетиями.

Я верю, что микробы способны получать энергию за счет обратных реакций, но не все исследователи с этим соглашаются. Если вы заведете разговор на тему обратимости дыхания, многие ученые станут утверждать, что эта гипотеза ошибочна. Живые организмы просто не могут поворачивать процессы в обратную сторону и использовать для дыхания отходы своей жизнедеятельности… потому что… это кажется неразумным. К тому же это трудно проверить экспериментальным путем, поскольку изменения дыхания могут быть едва заметными, так что для проверки требуются дополнительные исследования. Однако согласно законам термодинамики такой экстремальный вариант не является невозможным. Когда речь заходит об обитателях земных недр, следует распрощаться с нашим “здравым смыслом” и заменить его законами термодинамики. Более того, поворот реакции в ту или иную сторону — не единственное реше-

ние в условиях скудного энергетического запаса. В рукаве у обитателей земных недр имеются и другие козыри.

## Активизация жизни в условиях скудного энергетического запаса

При низких значениях ΔG жизнь не обязательно тягостна. В таких условиях тоже есть способы избавиться от стресса. До сих пор я говорила лишь об одном источнике энергии для жизни — о дыхании. Однако брожение тоже позволяет затащить вагончики американских горок на холм, как и дыхание. Только холм этот гораздо ниже. Подобно дыханию, брожение представляет собой окислительно-восстановительную реакцию, но вместо окисления одной молекулы для восстановления другой в данном случае происходит распад одной молекулы на несколько — одни более восстановленные, другие более окисленные. При дыхании пища полностью окисляется до диоксида углерода, отдавая всю запасенную энергию, а после брожения все еще остаются богатые энергией химические соединения, такие как ацетат или этанол. Брожение отъедает один кусок пирога, а остальное убирает обратно в

холодильник, чтобы другие могли потом доесть. Очень даже вежливо. Поскольку при брожении остается еда, это один из самых низкоэнергетических процессов для поддержания жизни.

Многие обитатели земных недр умеют осуществлять реакции брожения, но нам лучше всего известны процессы, происходящие в бескислородных условиях в нашем, верхнем мире, например в желудке у коров или в пивных ферментерах. При брожении сложные органические вещества распадаются на более мелкие, так что даже такие нежные существа, как мы, способны их переваривать, и именно так производят пиво, вино, йогурт, инжеру, кимчи, хлеб, натто, сыр, квашеную капусту и шоколад. Уже тысячи лет люди используют способность микробов к брожению для приготовления вкусных, питательных и алкогольных продуктов, которые хорошо хранятся.

Как и в нашем примере из предыдущей главы про химические реакции и водителей такси, эти взаимоотношения тоже можно рассматривать с точки зрения микробов. Возможно, они эволюционировали для того, чтобы мы, люди, имели больше продуктов питания и поддерживали процесс брожения, помещая микробов в

специальные емкости с их любимой пищей, где им хорошо. Многие, кто начинал печь хлеб ради удовольствия, замечали, что стали выпекать все больше и больше, просто чтобы использовать закваску, даже если нет необходимости в еще одной буханке. Чья это инициатива? Микробов или пекарей?

Величина ΔG в реакциях ферментации чрезвычайно низкая[6], так почему же иногда не слишком выгодные в энергетическом плане процессы оказываются такими успешными? Секрет в том, что даже с низким значением ΔG все равно можно забираться на высокие горки. Нужно только учесть фактор *времени*. Трюк в том, что реакции с низким энергетическим выходом нужно осуществлять очень быстро, что в нашем, верхнем мире и достигается в ферментерах. Давайте рассмотрим понятный пример. В сельдерее намного меньше калорий, чем в гамбургере или конфете. Если заменить вашу обычную высококалорийную пищу эквивалентным по массе количеством сельдерея (скажем, двадцатью стеблями), вы скоро умрете от голода. Но если вы будете съедать гору сельдерея, например двести пятьдесят стеблей, тогда в термодинамическом плане вы будете в порядке, хотя и в плохом настроении.

Подобно человеку, питающемуся исключительно сельдереем, бродильщики сжигают огромное количество субстрата. Микробы, которых мы используем для производства пищевых продуктов, характеризуются низкой энергией, но высокой мощностью, поскольку мощность определяется скоростью передачи энергии.

Но обитатели земных недр не живут в пивных чанах и не получают ячменный солод лопатами. Каким количеством энергии они располагают в своем подземном мире? Правильно ли будет сказать, что эти микробы служат “закваской” земных недр и быстро растут, хотя и получают энергию малыми порциями? Мы уже знаем, как вычислять $\Delta G$, так что для расчета мощности нужно лишь понять, насколько быстро протекают реакции. Чтобы проделать эти вычисления для обитателей земных глубин, можно воспользоваться приятной особенностью морских отложений: они часто осаждаются на дно с постоянной скоростью. Если положить керн ила горизонтально, можно измерить его длину и пересчитать в показатель времени. Определив изменение концентрации химических веществ, таких как сульфаты, вдоль керна, мы поймем,

как быстро они расходуются[47]. Умножив эту скорость на ΔG, мы получим *мощность*, которой могут обладать обитатели земных глубин.

И результат выйдет невероятно скромным. Даже самые нетребовательные лабораторные культуры потребляют в тысячи раз большую мощность, чем имеется в распоряжении обитателей земных глубин[7]. И поэтому изучение жизни под поверхностью Земли сильно изменило наши представления о том, сколько энергии нужно для существования. Вывод такой: хотя глубокие слои океанских отложений представляют собой одну из самых обширных экосистем Земли, *живущие здесь микробы вряд ли по-настоящему растут*. В их распоряжении имеется 0,00001 % мощности, поддерживающей рост всех других клеток на Земле, так что даже одно-единственное клеточное деление становится невозможным[48].

Никогда не думала, что посвящу свою жизнь изучению гигантской экосистемы, в которой

---

**[47] Примечания: 47**

Нужно сделать еще несколько вещей, в частности, учесть изменение концентрации сульфатов за счет диффузии, уплотнения и адвекции, но сейчас эти детали можно опустить.

**[48] Примечания: 48**

Если вы с недоверием отнеслись к этому заявлению, продолжайте, пожалуйста, читать. В следующей главе я буду рассуждать об эволюционных преимуществах жизни длиной в миллионы лет.

никто не растет. Но как раз этим я и занимаюсь! Страшно интересно изучать что-то совершенно непохожее на наш обычный мир. В частности, из экспериментов с *E. coli* мы знаем, что микроорганизмы дышат кислородом, пока он не заканчивается, потом приступают к нитратам, а когда исчерпаны и они, переключаются на брожение. Кроме того, клетки *E. coli* сначала поглощают лучшую еду, используя так называемую катаболическую репрессию, поскольку не желают потреблять низкоэнергетическую пищу, пока не закончилась более интересная. Именно так энергетика микроорганизмов представлена в большинстве учебников. Но благодаря обитателям земных глубин мы понимаем, что способы дыхания и питания *E. coli* — не универсальные правила в мире микробов, а лишь один из возможных вариантов. Обитатели земных недр игнорируют эти правила и начинают прямо с низкоэнергетической пищи, что позволяет им конкурировать с другими за счет сверхъестественной способности подчинять себе термодинамику и время.

И все же в биологии есть универсальные законы. Просто они гораздо менее строгие, чем подсказывает наша интуиция. Не отступая от

этих универсальных законов, живые организмы придумали неожиданные способы изменять свое термодинамическое пространство, незнакомые нам по нашему повседневному опыту.

Одно из самых странных следствий термодинамических особенностей обитателей подземного мира заключается в том, что, согласно приведенным выше расчетам, большинство клеток в гигантском пространстве под поверхностью океанского дна вообще не растут. И это смелое утверждение. Почему организм предпочитает жить там, где не способен расти?

Как дарвиновская эволюция может происходить в таких условиях, где организмы не производят потомства, а следовательно, где невозможен естественный отбор? Чтобы ответить на эти вопросы, надо перестать отрицать, что некоторые живые существа способны жить очень-очень долго. Как микробы, которые падают настолько глубоко в термодинамическую пропасть, что выныривают с противоположной стороны и обращают вспять свой метаболизм, так и мы вынуждены будем примириться с противоречиями дарвиновской эволюции, чтобы понять смысл длительного отсутствия роста. Чтобы узнать, как работает эволюция в подземном мире, нужно

пересмотреть часть наших предположений о продолжительности жизни, о которых, возможно, вы и не подозревали. Можете ли вы вообразить себе мир, где жизнь длится миллионы лет?

# Часть III
# Как обитатели земных недр влияют на наше понимание самих себя?

## Глава 8
## Бессмертные микробы
## Бог-Саунд, округ Картерет, Северная Каролина, лето 1987 года

У меня в ушах стоял звон цикад, а бельевая корзина била по бедру, когда я шла по воде — такой теплой, что ее трудно было отличить от воздуха. Моя кожа покрылась солью, а колени были измазаны грязью. Бельевую корзину отец привязал к моей талии пропитанной водорослями веревкой со своей лодки. Мы с отцом и братом собирали гребешков в лагуне Бог-Саунд в Северной Каролине.

Гребешки — это двустворчатые моллюски с рифленой раковиной размером с человеческую ладонь. Они общительнее остальных: не зарываются в ил и не втягивают мантию и ногу, когда их потревожат, а сидят себе на дне, широко раскрыв раковину, смотрят вокруг двумя рядами сапфирово-голубых глаз и шевелят бахромой тоненьких выростов-щупалец. Они прекрасны, и когда мне было девять лет, я любила держать их перед глазами брата — наполовину в воде,

наполовину над водой. Когда они захлопывали свои глазастые рты, брызги летели ему прямо в лицо. Проще, конечно, было бы плеснуть в него воду рукой, но гребешками гораздо интереснее. Бельевая корзина служила для сбора добычи: мы вытаскивали гребешков руками и держали в корзине под водой, пока продолжали охотиться. А вечером того же дня ели их в однокомнатной квартире отца, обжаривая на сливочном масле. Корзину потом опять использовали для белья. Финансовая ситуация не позволяла нам иметь две бельевые корзины.

Каждый раз, бродя по мелководью в поисках гребешков, я открывала для себя новый мир. Бурые, красные и зеленые водоросли чередовались с морской травой и саргассумом, образуя под водой темный рисунок. Скаты хлопали крыльями, уверенные в своей способности ускользнуть или атаковать хищника вроде меня. Раки-отшельники, обнаружив, что путь свободен, высовывались из недавно украденных раковин и тащили свой контрабандный товар по морскому дну. Иногда кусок ила размером с две мои растопыренные ладони взмахивал краями и уплывал, оказавшись камбалой. Плоская рыба камбала прижимается к морскому дну лишь одним боком. Когда особь

взрослеет, ее нижний глаз перемещается на верхнюю поверхность, поближе ко второму. Камбала похожа на персонажа из научно-фантастического рассказа, но в Северной Каролине она так же обычна, как дождь. А в жареном виде вообще изумительна.

Во многих отношениях округ Картерет в восточной части Северной Каролины стал для меня местом первых экспедиций. Здешние жители постоянно окружены водой: ее так много, что во время сезона ураганов вода пропитывает их насквозь. Связь с океаном и всеми живущими в нем существами вошла в местную культуру. Большинство из наших родителей жили за счет торговли морепродуктами или туризма, и у меня было много знакомых среди рыбаков, переработчиков рыбы, океанографов, морских археологов и судостроителей. Был даже один самопровозглашенный пират по имени Синбад, который никогда не выходил из образа. После воскресной мессы многие усаживались в лодки и отправлялись на Шеклфорд-Бэнкс — чудесный барьерный остров, где обитали лишь дикие лошади, пеликаны и полупьяные купальщики. А еще это золотая жила для поисков всякого рода мертвечины, выброшенной морем. Мы с братом

любили втыкать палки в разлагающиеся тела медуз, рыб, акул и дельфинов. Однажды на берег выбросило мертвого логгерхеда, головастую морскую черепаху. Предприимчивый смотритель парка[49] закопал ее, а через год выкопал чистые кости и передал моей школе. Мой учитель естествознания организовал кружок “Четвероногие”, где мы старательно собирали скелет заново, склеивая эпоксидной смолой.

Значительная часть территории, называемой Кристальным берегом, находится под охраной: это и национальный парк Кейп-Лукаут, и природный заповедник имени Рэйчел Карсон, и государственный парк Форт-Мейкон. В детстве я помогала работникам парков, разъезжавшим на вездеходах по белоснежным песчаным пляжам в поисках черепах, чтобы найти кладки, пометить и сберечь все яйца. А еще я делала презентации в парке Форт-Мейкон на пляже. Если вы отдыхали там в 1993 году, то наверняка видели девочку с густыми бровями в куртке служителя парка, без умолку болтавшую о том, как черепахи откла-

**[49] Примечания: 49**

Его зовут Кит Риттмастер, и теперь у него целая коллекция костей выброшенных на берег китов, дельфинов и черепах, которую можно увидеть в Боунхендже, рядом с Морским музеем Северной Каролины в Бофорте.

дывают яйца, и предлагавшую потрогать живую змею из террариума. Если вы там были, то надеюсь, узнали что-то интересное, а змея не очень сильно вас напугала.

Теперь кажется, что со времени тех детских приключений прошла целая вечность. Однако для некоторых обитателей земных глубин эти несколько десятилетий пронеслись как мгновение ока (точнее, как один взмах жгутика). Как мы обсудим позже в этой главе, многие обитатели земных недр живут в таких условиях, где не имеют достаточного количества энергии, чтобы делиться. И клетки живут поодиночке тысячи или даже миллионы лет. Самые старые многоклеточные организмы — это секвойи, которые доживают до тысячелетнего возраста. Однако клетки, составляющие эти деревья, намного моложе, поскольку они, как большинство обитателей поверхности Земли, постоянно обновляются, чтобы подстраиваться под быстрые изменения окружающего мира. Но обязательно ли все формы жизни должны быть такими?

В этой главе я объясню, почему, как мне кажется, мы до сих пор не замечали организмов с очень медленным способом существования. Потом мы обсудим важнейший вопрос, ответа на который

у меня не было до самого последнего времени: есть ли доказательства, что живые существа могут жить тысячу лет или еще дольше? И наконец, я обращусь к сложной теме: как организмы умудряются остановить свое воспроизводство на тысячу лет? Чтобы разобраться в этих вопросах, нам придется выбросить в мусорную корзину некоторые представления о естественном отборе, которые кажутся нам очевидными.

## Почему мы решили, что бактерии растут быстро?

На первый взгляд кажется, что микробы — не лучшие кандидаты на звание самых медленных обитателей Земли. Всем известно, что бактерии растут быстро. Если я просыпаюсь с першением в горле, то начинаю переживать, поскольку знаю, что к вечеру у меня разовьется настоящая стрептококковая ангина: бактерии успеют многократно поделиться всего за несколько часов. Некоторые микробы растут так быстро, что не удваивают свой геном, а учетверяют: это позволяет им одновременно производить четыре новые клетки. Ричард Ленски из Университета штата Мичиган решил провести долгосрочное исследование быстрорастущего организма, чтобы проследить за ходом эволюции в реальном време-

ни. С этой целью он выбрал клетки *E. coli*, число которых в лабораторных условиях удваивается каждые двадцать минут. Эти клетки растут так быстро, что Ленски мог спокойно проследить за их эволюцией на протяжении своей жизни. Если мы что-то и знаем о бактериях, так это что растут они со скоростью лесного пожара.

Однако, насколько мне известно, *E. coli* и другие распространенные быстрорастущие микробы не живут под землей. И как я объясняла в предыдущей главе, во многих местах, например в глубоких морских отложениях, химические вещества дают так мало энергии, что ее хватает лишь на восстановление поврежденных частей организма, но не на превращение в две дочерние клетки, поэтому остается единственная возможность — длительный метаболически активный покой. Но как долго клетки могут находиться в таком состоянии? Исходя из теоретических соображений, никакого предела для жизни одиночного организма не существует, если он способен постепенно заменять поврежденные элементы. Итак, вопреки распространенному мнению, похоже, не все микробы растут очень быстро. И тут возникает противоречие. С одной стороны, если некая форма бессмертия возможна и распространена,

нас должны окружать существа, зародившиеся примерно во времена Большого взрыва, что не соответствует действительности. С другой стороны, обитатели земных глубин вроде бы способны жить вечно.

К счастью, между двадцатиминутным периодом удвоения и бессмертием лежит гигантский временной интервал. Может быть, обитатели земных недр живут пятьсот тысяч или миллион лет? Самые старые, еще не полностью окаменевшие отложения имеют возраст порядка сотни миллионов лет, так что это максимальный возраст для индивидуальных клеток в морских отложениях. В более древних камнях могут находиться и более древние клетки, если эти камни никогда не подвергались температуре, убивающей все живое, при перемещении внутри нашей тектонически активной планеты. Представляете, что произошло за срок жизни таких организмов? Строительство пирамид, появление сельского хозяйства и много другого! Теоретически, когда я отбираю образцы из глубоких слоев отложений, я могу дотронуться до микробов, которые непрерывно жили и дышали с тех времен, когда человек еще не сформировался как вид. Если бы они могли говорить, вообразите, что они могли

бы рассказать о нашей эволюции!

Возможно, представление о том, что микробы растут быстро, — это артефакт наших методов исследований. Мы, микробиологи, предпочитаем ставить эксперименты на быстрорастущих организмах. Двадцать лет назад, когда я проводила опыты, чтобы посмотреть, как глубоководные микроорганизмы справляются с множеством стрессовых факторов, я, конечно же, не имела возможности проводить каждый опыт по четыре недели[1]. Наши быстрорастущие культуры давали ответ на следующий день, и это позволяло быстро подбирать условия и ставить новые эксперименты. Если бы нам приходилось ждать недели или месяцы, чтобы обнаружить результаты каждой модификации экспериментальных условий, мы бы никогда не закончили работу. И поэтому единственные микробы, с которыми проведены добротные исследования, — это те, что растут быстро. Но теперь мы знаем о существовании гигантских ветвей, отходящих от самого основания древа жизни, представителей которых нам пока не удавалось вырастить в виде чистой культуры, поэтому, наверное, нам следует отказаться от идеи об универсальности быстрого роста микробов. Требования лабораторных экспериментов

могли создать у нас ложное представление, будто большинство микробов на Земле растут быстро.

В частности, из опыта лабораторной работы мы знаем, что при отсутствии необходимых условий для роста многие микробы впадают в своеобразную спячку (например, перестают делиться, снижают скорость метаболизма или образуют эндоспоры), пока не смогут расти опять[2]. Зимой почвенные микроорганизмы ожидают потепления. Болезнетворные микробы, такие как возбудители туберкулеза, годами могут пребывать в наших телах в спящем состоянии, ожидая момента, когда наша иммунная система перестанет их атаковать[3]. Однако, как и о многом другом в микробиологии, о спящих микробах мы узнали благодаря изучению быстрорастущих клеток, у которых бывают временные периоды простоя. Если на Земле есть организмы, все время растущие очень медленно, наши современные методы получения информации не годятся для того, чтобы что-то о них узнать или чтобы понять, как заставить их осуществлять переход между состоянием медленного роста и полной его остановкой. Возможно, именно поэтому мы до сих пор их не замечали.

## Доказательства сверхмедленного роста

Постепенно у нас накапливаются доказательства, что микробный мир может быть гораздо более медленным, чем мы думали. Уже давно известно, что увеличение времени инкубации природных образцов позволяет вырастить больше разных культур[4]. Культивируемые микроорганизмы, в изобилии присутствующие в морской воде, такие как *Nitrosopumilus sp.*, *Pelagibacter ubique* или *Prochlorococcus sp.*, удваиваются через сутки или больше, то есть один-единственный эксперимент с ними может продлиться больше месяца[5]. Некоторые организмы, живущие в морских отложениях, развиваются еще медленнее: период удвоения атрибактерий (Atribacteria) составляет пять дней, локиархей (Lokiarchaeota) — от четырнадцати до двадцати пяти дней, а некультивируемые представители архей Methanosarcinales, названные ANME-2, удваиваются каждые семь месяцев[6]. Эти культуры растут так медленно, что у нас нет возможности ставить на них эксперименты. И это

лишь несколько примеров микробов, которых удалось вырастить в лаборатории. Быть может, существуют микроорганизмы, растущие еще медленнее. И о них мы совсем ничего не знаем.

Вообще, я рискну предположить, что медленный рост может быть важен и для обычных, быстрорастущих лабораторных культур, когда они находятся во внешней среде. Даже если какой-то вид в лабораторных условиях образует мощную популяцию всего за одну ночь, почти наверняка он не растет столь же быстро в своей естественной среде. Если бы микробы в природе росли хотя бы со скоростью самых медленных лабораторных культур, за несколько лет они бы удвоили массу планеты. Очевидно, что в состоянии медленного роста или при остановке роста они ведут себя иначе, чем когда плодятся со страшной скоростью в лаборатории. Даже *E. coli* растет помедленнее, когда находится в естественных условиях и заражает резервуары с питьевой водой. Быстрый рост — отклонение, даже для тех организмов, которые умеют быстро расти.

Подобные наблюдения заставляют нас творчески подойти к исследованиям микробов, долгие годы находящихся в спящем состоянии. Нам кажется, что они в это время ничего не делают.

Аналогично и калифорнийское побережье можно считать постоянно движущимся массивом пород в геологических временных рамках, но в масштабе человеческой жизни оно сравнительно стабильно: на нем можно строить дома и оставить их внукам. Эти дома достаточно прочные и выдерживают периодические землетрясения, но им не устоять при перестройке участков земной коры, которые поворачиваются, уходят на глубину и вновь поднимаются на поверхность на протяжении нескольких миллионов лет. Чтобы рассуждать с точки зрения обитателей земных глубин, нам придется перейти к неудобному для нас временному масштабу.

Значение временного масштаба для биологических исследований по-настоящему открылось для меня в 2003 году, когда я бродила вокруг горячих источников Йеллоустонского национального парка. Я была студенткой и проходила обучение на летнем геобиологическом курсе от Университета Южной Калифорнии. Мы изучали микробов, живущих в кипящей воде, которая бьет из гигантской кальдеры, котловины вулканического происхождения. Присев на корточки у одного источника, я наблюдала, как паук скользит по этой смертельно опасной поверхности, танцуя на

воде, которая меня точно бы убила. Я задумалась, нет ли на ногах у паука каких-то нечувствительных к теплу ворсинок, создающих охлаждающую прослойку между кипящей водой и его телом[50]. Или он движется так быстро, что каждая нога получает лишь небольшое количество тепла, прежде чем опять поднимется в прохладный воздух? Паук скакал как сумасшедший, поэтому я склонялась ко второй гипотезе.

Как раз в тот момент, когда я решила отринуть микробиологию и посвятить свою жизнь изучению этого удивительного паука, его странные подергивания замедлились. А потом он съежился и умер. Я чуть не рассмеялась в голос над собственным непониманием. Я увидела не паука с выдающимися способностями, а несчастное существо, гибнущее в горячем источнике. Дело в том, что моя шкала времени тут не подходила. Я решила, что те несколько минут, на протяжении которых я наблюдала за пауком, соответствовали его обычному способу существования. Возможно, если бы у меня не было времени, чтобы посидеть

---

**[50] Примечания: 50**

В море на большой глубине живет помпейский червь, *Alvinella pompejana*, способный на нечто подобное. Он погружается в глубоководные термальные источники с температурой воды 1000 °C, будучи защищен волосками, которые создают охлаждающий слой, изолирующий его от опасной жидкости.

и спокойно понаблюдать, я бы просто на мгновение увидела скачущего паука (а на самом деле он боролся со смертью), и все. И только проследив за ним последние минуты его жизни, я поняла, как сильно ошибалась.

Давайте проведем более качественные наблюдения, чем я проделала в Йеллоустоне, и поговорим о морских отложениях в соответствующих временных рамках. В предыдущей главе я рассказала, что количество энергии, доступное для жизни микроорганизмов в глубоких слоях морских отложений, на много порядков ниже, чем то количество энергии, которое расходуется на поддержание лабораторных культур даже при отсутствии роста[7]. Соответствующая гипотеза предполагает, что вся популяция подземных микробов в большинстве илистых отложений во всем Мировом океане обновляется раз в несколько лет или десятилетий за счет замены поврежденных элементов, а не за счет создания новых клеток[8]. Одно это уже показывает, что такие микробы могут находиться в состоянии покоя сотни, тысячи или даже миллионы лет без роста и производства новых клеток. Однако вывод этот слишком радикальный, так что для его подтверждения нам нужны прямые доказательства.

Элизабет Трембат-Райхерт из Университета штата Аризона и Джули Хьюбер[51] из Океанографического института Вудс-Хоула отбирали жидкости с микробами, захороненными под трехсотметровым слоем твердых океанских отложений, с глубины четырех километров под поверхностью океана. Сбор таких образцов уже сам по себе достижение. Далее исследовательницы добавили к ним воду с различными химическими метками, чтобы проследить, как быстро микробы включат эти метки в свои клетки в процессе производства новой биомассы[9]. И они действительно увидели, что клетки захватывают химические вещества, хотя и чрезвычайно медленно: большинство клеток поглощало лишь от 0,001 до 0,1 фемтограмма[52] углерода в сутки. Если учесть, что в клетках из морских отложений содержится в среднем от 19 до 31 фемтограмма углерода[10], это означает, что обновление биомассы клетки (опять-таки без производства дочерних) занимает от полугода до восьмидесяти четырех

**[51] Примечания: 51**

В главе 3 я рассказывала, как Джули с помощью высокопроизводительного пиросеквенирования ДНК смогла показать, что жизнь намного разнообразнее, чем мы полагали.

**[52] Примечания: 52**

Фемтограмм = $1 \times 10^{-15}$ грамм. — *Прим. перев.*

лет. И это прямое доказательство полностью подтверждает предсказания, основанные на термодинамике.

У нас есть и другие прямые подтверждения того, что клетки в морских отложениях долгое время находятся в состоянии покоя. Мы знаем, с какой скоростью нарастают слои отложений по вертикали, и понимаем, что клетки в более глубоких слоях (или их потомки, если клетки делились) были захоронены раньше. Если бы эти клетки давали начало дочерним, а не только заменяли себе отдельные элементы по мере необходимости, за много сотен поколений появились бы генетические модификации, и мы обнаружили бы их в поверхностных отложениях на глубине нескольких метров. Однако они не делятся. Мы не нашли никаких генетических отличий у микробов из разных слоев[11].

Но мы знаем, что клетки живы, поскольку видим, как их дыхание влияет на их химическое окружение, а также видим, что они сохраняют целостность и не повреждены. Таким образом, клеточная биомасса обновляется, но это происходит лишь за счет периодической замены отдельных элементов: липид за липидом, нуклеотид за нуклеотидом, так что примерно за полстолетия

обновляются все молекулы. Клетки не делятся и не производят потомства, но сами выживают на протяжении тысяч или даже сотен тысяч лет. Итак, у нас есть прямые доказательства гипотезы, основанной на термодинамических законах: микроорганизмы в глубоких слоях отложений живут тысячи лет или дольше, не производя новых клеток. Это невероятно, но, судя по всему, чистая правда. И перед нами встает следующий сложный вопрос: учитывая важную роль потомства в процессе эволюции, как эволюционирует организм, который тысячелетиями, а то и дольше не производит потомства?

Как эволюционирует организм, не размножающийся тысячелетиями?

Для ответа на этот сложный эволюционный вопрос сначала нужно порассуждать о том, что происходит с такими организмами на протяжении их жизни. Таким медленным организмам нет дела до длительности светового дня. Они закопаны так глубоко, что не воспринимают солнечный свет. Вероятно, они не замечают даже смену времен года. Но их могут касаться иные, более медленные геологические изменения: открытие и закрытие океанических бассейнов в результате

движения тектонических плит, подъем и опускание новых островов или возникновение новых течений при медленном образовании трещин в земной коре. Как нас учили в школе на уроках биологии, эти процессы являются движущей силой в эволюции видов, а не отдельных особей. Так, новые формы клюва у дарвиновых вьюрков появились по той причине, что птицы оказались изолированными на отдельных островах, где питались семенами специфической формы. Эти изменения произошли за геологический отрезок времени, сопоставимый со временем образования островов, однако на уровне *видов*, а не *отдельных* птиц. Впрочем, мы знаем, что индивидуальные особи тоже могут меняться в соответствии с изменениями окружающей среды. Каждую весну, когда тает снег, окраска меха песцов меняется с белой на бурую. Многие люди (к сожалению, ко мне это не относится) просыпаются утром в одно и то же время без будильника. Вероятно, людям и животным разумнее следовать суточным и годовым ритмам, чем подстраиваться под чередование ледниковых эпох. Кажется бессмысленным адаптироваться к изменениям, происходящим в более длительных временных рамках. Смешно полагать, будто

какой-то вьюрок научится плавать, поскольку интуитивно почувствует, что его остров через сотню тысяч лет погрузится в океан. Или будто жук из пустыни Гоби будет размножаться только при наличии в его рационе семян из амазонских дождевых лесов, поскольку он появился на свете миллионы лет назад, когда Южная Америка и Африка были слиты воедино, и его ДНК предписывает ему размножаться, когда этот тектонический провал закроется. Для животных такие сценарии нелепы, однако они могут иметь смысл для обитателей земных недр. Организм, живущий миллионы лет, вполне может быть настроен на восприятие медленных процессов вроде оседания островов, как мы настроены на ожидание завтрашнего восхода солнца. Чтобы понять принципы существования обитателей земных глубин, вероятно, нам следует переосмыслить суть эволюционных сигналов.

Тот факт, что некоторые клетки существуют в состоянии покоя очень длительное время, заставляет прояснить два важных вопроса. *Отсутствие деления клеток* на протяжении тысячелетий — это результат адаптации микробов или результат случайных событий? И если это результат адаптации, то как вообще эволюционируют организмы,

которые как будто бы никогда не производят потомства?

Давайте переформулируем первый вопрос так, чтобы рассмотреть его в контексте дарвиновской эволюции. *Приспособились* ли эти микробы в ходе эволюции к тому, чтобы пребывать в состоянии покоя тысячи или миллионы лет, или же просто оказались в таком положении, поскольку клеткам не нужны никакие специфические адаптации для такой долгой жизни? По моему мнению, вряд ли можно прожить сотни тысяч лет, не имея никаких адаптаций. Для столь долгой жизни требуется слишком много физиологических изменений, чтобы это было просто побочным эффектом жизни в “нормальном”, быстром ритме. Кроме того, если такой способ существования возник случайно, где-то должны жить обычные аналоги этих микроорганизмов. Однако мы редко находим где-нибудь еще таких микробов, как в морских отложениях. Это не обычные морские организмы, которые счастливо плавают в толще воды, делятся и растут, а потом падают на дно и забывают умереть. Судя по всему, большинство из этих весьма разнообразных групп микробов существуют только в морских отложениях[12]. Следовательно, там они

подвергались такому же отбору, как попугаи в дождевых лесах. Действительно, мы видим, что с увеличением глубины в слоях морских отложений появляются микробы со специфическими ферментами для переработки доступных субстратов, что указывает на вероятность их адаптации к данной среде[13]. Кроме того, микробы из подповерхностных слоев отложений имеют адаптации, способствующие очень медленному метаболизму и делению[14]. А это означает, что они каким-то образом подготовлены эволюцией к такому длительному существованию при отсутствии роста.

Но есть одна загвоздка. В соответствии с дарвиновской теорией естественного отбора, чтобы эволюционировать, клетки должны расти и воспроизводиться. Естественный отбор происходит по той причине, что в процессе репродукции в клетках возникают мутации. Если мутация полезная, она дает организму преимущество, его потомство выигрывает у организмов без мутаций, и в результате эта мутация появляется у еще большего числа потомков. Следующие поколения тоже приспособлены лучше, чем особи без мутаций, и в конечном итоге изменение закрепляется в популяции. Вот как происходит адаптация по механизму естественного отбора.

Но как рассуждать о дарвиновской эволюции в случае популяций, которые не воспроизводятся? Как можно адаптироваться к чему-то, не имея потомства? Полагаю, что при создании теории о выживании наиболее приспособленных Дарвин не учитывал организмы, не способные расти.

К счастью, у нас есть хорошая модель — краткосрочная сезонная спячка. Животные, впадающие в зимнюю спячку, получают эволюционное преимущество, поскольку по весне, когда условия опять способствуют росту, они сохраняют более многочисленную популяцию. Такие организмы имеют преимущество перед другими и передают гены спячки более многочисленному потомству весной и летом. Это азбука дарвиновской теории естественного отбора. Давайте расширим эту модель и включим в нее “спячку” организмов из морских отложений, длящуюся тысячелетиями. Нужно понять, какое событие могло бы вывести из состояния спячки обитателей земных недр, захороненных на глубине нескольких сотен метров. Если зимой мы находим в почве спящего микроба, то предполагаем, что он ожидает лета, чтобы опять начать расти. Чего может ожидать организм, спящий тысячи или миллионы лет в глубоких слоях морских отложений?

Предлагаю провести мысленный эксперимент, который позволит нам отказаться от некоторых интуитивных представлений о продолжительности жизни. Представим себе, что жизнь человека длится всего двадцать четыре часа. Вы родились в полночь, восстали против родителей за завтраком, женились и родили детей примерно перед обедом, а во время ужина на пенсии отдались рыбалке. В полночь ваши близкие, родившиеся всего несколько часов назад, прижались к вам и держали за руки, пока вы мирно умирали, достигнув преклонного двадцатичетырехчасового возраста. Если бы мы жили так, за одну зиму сменились бы сотни поколений людей. И весь этот отрезок времени, который составлял бы значительную часть истории человечества, лиственные деревья оставались бы почерневшими и безжизненными. Постоянная мертвенность деревьев казалась бы совершенно естественной, и ученые вроде меня, наверное, подавали бы заявки на гранты, желая понять, живы эти деревья или нет, поскольку не видно, чтобы они росли и размножались. Конечно, если мы отмотаем время назад, мы поймем, что люди жили уже и осенью, и, возможно, даже летом, но это было так давно, что у нас еще толком не было письменности. На

самом-то деле мы живем сто лет и знаем, что деревьям для пробуждения нужно лишь летнее солнце. Но люди, живущие один день, были бы озадачены.

Когда мы наблюдаем за жизнью под поверхностью Земли, не напоминаем ли мы людей-однодневок, наблюдающих за деревьями? Может быть, долгоживущие обитатели земных недр проснутся по какому-то сигналу, который неизвестен нам потому, что мы живем слишком мало, чтобы его заметить? Какой вообще смысл жить сотни тысяч лет? Обязательно должна быть какая-то причина, почему их жизнь так длинна.

Есть доказательства, что длительное состояние спячки дает селективное преимущество. Если оставить лабораторную рабочую лошадку *E. coli* без еды на месяцы или даже годы, многие клетки перейдут в состояние длительной спячки, в котором они остаются живыми и осуществляют реакции метаболизма, но растут гораздо медленнее, чем когда их кормят. Если потом смешать эти полумертвые клетки со свежей порцией быстрорастущих клеток *E. coli* и опять оставить голодать, старички выбьют дух из молодняка. Может быть, в этом преимуществе роста в стационарной фазе (GASP, *growth advantage in stationary*

*phase*) как раз и таится секрет долгой жизни обитателей земных глубин?[15] Вдруг они ждут события, которое произойдет через тысячу лет, и тогда в новой ситуации получат преимущество? Как привыкшие к бесхлебице монахи, вокруг которых все обжоры умирают от голода.

Чего могут ждать эти монашествующие микробы, чтобы проснуться? Смена времен года происходит слишком быстро. Единственные достаточно медленные изменения — геологические процессы. Например, погружение островов, наводнения, засухи или штормы часто происходят с интервалами в сотни или тысячи лет. Подводные оползни, землетрясения, цунами и извержения вулканов могут приводить к перемещению отложений в еще более медленном ритме, и тогда обитатели земных глубин начинают контактировать с новыми источниками пищи, что пробуждает их ото сна длительностью в сотни тысяч лет. Кажется странным, что микробы адаптируются к ожиданию столь редких событий, как извержения вулканов, однако история Земли показывает, что на извержение вулкана можно уверенно рассчитывать, если только у вас есть время подождать.

Если дать волю воображению, можно пред-

положить, что отдельные микробы способны адаптироваться к еще более редким событиям, таким как глобальные климатические циклы. Или к медленному перемещению тектонических плит. Когда в срединно-океанических хребтах появляется новое дно, существующее дно постепенно отодвигается от центра, как человек, стоящий на движущейся дорожке в аэропорту. И в итоге морское дно врезается в континент, как при суперзамедленной съемке крушения поезда.

Некоторые отложения и живущие в них организмы захватываются погружающейся плитой и оказываются раздавлены температурой и давлением, убивающими жизнь во всех известных нам формах. Даже экстремофилы, попавшие в мантию, становятся тупиковой ветвью эволюционного древа. Однако некоторые слои отложений, начинающие продавливаться под тяжестью континентальных плит, могут вынырнуть наружу через трещины и расселины, открывшиеся в надвигающейся плите. В ходе таких столкновений часть донных отложений выталкивается наверх через аккреционные призмы и соседние разломы, возникшие при извержениях вулканов или при других деформациях плит. Не может ли быть, что обитатели земных недр ожидают

именно таких перемещений, разломов и выхода на поверхность?

Давайте обдумаем следствия. Если это так, значит, отдельные микробные клетки, извлекаемые нами на поверхность с помощью буровых установок и кажущиеся спящими, на самом деле просто спокойно ожидают, пока сверхмедленное перемещение плит доставит их к континенту, где у них будет возможность выйти к поверхности и начать расти. Эволюционная плата за миллионы лет ожидания в глубинах морских отложений — возврат в верхние придонные слои с более питательной едой, где микробы передадут свои гены будущим поколениям. Все по стандартной схеме дарвиновского естественного отбора: особи, лучше других приспособленные к спячке на протяжении миллионов лет, вновь оказавшись на поверхности, получат преимущество в росте, и в результате их адаптации закрепятся в популяции. Может быть, подъем в поверхностные слои отложений для обитателей земных глубин — это аналог нашего лета?

## И у обитателей земных недр бывает лето

Чтобы эти теории обрели смысл, надо доказать, что те виды микробов, которых мы обычно обнаруживаем в неделящемся состоянии, способны расти и производить новые клетки в морских отложениях на небольшой глубине. В принципе, отложения на мелководье — хорошее место для роста, поскольку там самые свежие питательные вещества[53]. Однако не так уж просто доказать, что микробы растут в этих неглубоких отложениях, поскольку сложно измерять рост микробов в естественной среде. Один подход к измерению скорости роста медленно растущих микроорганизмов в природных образцах заключается в том, чтобы применить метод, который Трембат-Райхерт и Хьюбер использовали при работе в глубоких слоях базальта, о чем я рассказывала раньше. Однако в этом методе в систему

---

**[53] Примечания: 53**

Тут я должна поблагодарить Андреаса Шрамма из Орхусского университета, который поделился со мной этой мыслью, пока мы беседовали на конференции Американского микробиологического общества в 2014 году. Когда он сказал, что микробы *должны* расти в неглубоких отложениях, в моем мозгу зажглась лампочка!

вводят дополнительную метку, а мне хотелось проследить за ростом обитателей земных глубин, совсем их не беспокоя.

Недавно я подумала о другом, менее инвазивном методе для отслеживания роста обитателей земных недр на небольшой глубине. Я решила: раз мы умеем определять скорость метаболизма микробов по изменению количества субстрата в слоях морских отложений на разной глубине, почему бы нам не использовать тот же метод для определения их скорости роста? Если микробы делятся достаточно редко, так что их популяция растет примерно с той же скоростью, с какой они погружаются под землю, я, возможно, смогу рассчитать скорость роста микробов по увеличению их численности на разной глубине. Объясню иначе: представьте, что вы микроорганизм, живущий в осадочных отложениях. Вы не знаете, что медленно погружаетесь под землю, но знаете, что вокруг вас достаточно еды, чтобы расти прямо сейчас. Однако делитесь вы очень редко и производите новые клетки лишь раз в три месяца. Если скорость образования осадочных пород постоянна и один сантиметр породы накапливается за четыре года, то к моменту, когда вы погрузитесь на глубину один сантиметр, вы

произведете около ста тысяч новых копий себя за вычетом тех, которые погибли. И над вами другие клетки вашего вида тоже постоянно погружаются под землю примерно с той же скоростью, что и вы[54]. Сравнивая количество клеток в вашем слое после четырехлетнего роста с числом клеток вашего вида в слое на один сантиметр выше, можно рассчитать скорость размножения клеток вашего вида.

Вроде бы все просто, не так ли? Но к сожалению, существует и другое объяснение, почему на глубине одного сантиметра может быть примерно в сто тысяч раз больше клеток конкретного вида, чем на поверхности. Возможно, клетки этого вида делятся и быстрее, чем раз в три месяца, но какие-то условия в более глубоких слоях позволяют им накапливаться в большем количестве. При таком сценарии клетки этого вида находятся все время в стационарном состоянии, так что их размножение и гибель уравновешивают друг друга и среда содержит максимальное количество клеток, которое способна поддерживать

**[54] Примечания: 54**

Это условие, конечно же, иногда не соблюдается, например после оползней, но мы можем внести необходимые поправки, отслеживая изменения геохимических маркеров, которые не зависят от биологических процессов.

(этот параметр называют емкостью среды). В таком случае увеличение численности клеток с глубиной отражает не скорость их деления, а повышение общей емкости отложений. Однако на каком-то уровне становится неважно, отражает ли увеличение численности клеток с глубиной скорость роста микроорганизмов или изменение емкости среды. В любом случае увеличение числа клеток какого-то конкретного вида с глубиной доказывает, что клетки этого вида делятся, тогда как других видов — погибают. И поэтому, чтобы подтвердить, что микробы из земных глубин делятся, мне лишь нужно понять, какие именно неглубокие морские отложения следует отбирать в качестве образцов.

Я уже перечислила несколько экзотических мест, где мы проводили полевые работы: мы поднимались на вершины вулканических гор в Андах, пытались избежать встречи с белыми медведями в Арктике и погружались в океан на такую глубину, где давление воды раздавливает череп. Однако работа с микробами научила меня, что при внимательном наблюдении даже самые будничные вещи могут оказаться удивительными. Например, в восточной части Северной Каролины воздух насыщен кислородом, полно

магазинов, туалетов и автозаправок, вероятность землетрясений невелика и никто на вас не охотится. Но именно там я больше времени, чем где-либо еще, рассекала на моторке бурное море, спасаясь от шторма, или подзывала с борта маленькой лодки “Санфиш” дельфинов, которые выпрыгивали из воды, обдавая все вокруг светящимися брызгами. И я со всей ответственностью заявляю: мой родной город Бофорт и его окрестности — волшебные места.

А еще волшебство восточной части Северной Каролины в том, что здесь прекрасно сохранились слои морских отложений с многочисленными видами подземных микробов, которых мы находим и в глубинах океана. Это прекрасное место, чтобы попытаться проанализировать рост этих микробов в береговых отложениях на мелководье, где им доступна самая лучшая пища, какая только бывает. В мае 2016 года мы с сотрудниками нашей лаборатории отправились в мой родной город, взяли образцы ила и приготовили из него тонкие срезы. И увидели, что общее количество микроорганизмов с увеличением глубины уменьшается, однако численность некоторых популяций *растет*, и период удвоения для них составляет от пяти до двадцати пяти лет[16]. Эти микроорганиз-

мы относились к тем же группам, которые мы обнаружили в неделящемся состоянии на больших глубинах под поверхностью Земли. В то же время мы установили, что обычные микробы из морской воды при увеличении глубины отложений достаточно быстро погибают.

Конечно, это лишь одно исследование. Однако наши данные как минимум подкрепляют идею, что для микробов из глубоких морских отложений “лето” (период производства потомства для естественного отбора) наступает тогда, когда они оказываются около поверхности. Если это так, смысл их сверхдолгого сна действительно может заключаться в ожидании таких редких геологических событий, как субдукция, извержение вулкана, оползень или землетрясение, которые выталкивают их в “зону роста” на мелководье.

## Хронофилы

Исследования обитателей земных глубин показывают, что земляне могут жить много тысячелетий или даже больше, хотя это и не согласуется с нашим жизненным опытом. Причем

некоторые из них[55] способны синхронизировать свой жизненный цикл со сверхмедленными геологическими процессами, чтобы потом опять вернуться к жизни. Поразительно! По-моему, это важнейшие открытия, касающиеся природы жизни на Земле[56]. Вообще, я считаю, что обнаружение таких долгоживущих существ по важности не уступает открытию термофилов — микробов, прекрасно чувствующих себя при температуре выше точки кипения воды. Обнаружение термофилов перевернуло наши представления о том, где во Вселенной может существовать жизнь. Одновременно начала развиваться целая область исследований, направленных на применение термостойких ферментов и организмов в промышленных целях. Я предвижу такой же

---

**[55] Примечания: 55**

Обратите внимание: я говорила об отсутствии роста исключительно у обитателей земных недр из морских отложений, хотя существует много типов подземных микробов. Возможно, подземные организмы так же медленно развиваются и в глубоких отложениях в континентальных водоемах, но там еще сложнее измерять скорость их роста, поскольку там нет таких превосходно сформированных слоев, чтобы наблюдать за ходом времени. В других подземных средах, возможно, тоже обитают сверхдолгоживущие микробы, или же там микроорганизмы развиваются быстрее благодаря наличию других источников пищи.

**[56] Примечания: 56**

Звучит хвастливо, так что хочу со всей определенностью заявить: мои исследования — лишь капля в широчайшем море исследований в данной области.

всплеск исследований в связи с открытием долгоживущих микроорганизмов из земных глубин. Существование таких микробов значительно расширяет временной интервал для отслеживания биологических маркеров во всей Вселенной. А для промышленности важно, что стабильные организмы производят устойчивые ферменты[17]. А устойчивые ферменты приносят деньги. Биотехнологические компании наверняка заинтересуются более надежными, долгоиграющими ферментами. Впрочем, если мы хотим превратить этих странных долгоживущих существ в полноценный объект исследований, нам нужно дать им имя.

Термофилы любят высокую температуру, психрофилы — низкую температуру, ацидофилы — кислоту, барофилы (они же пьезофилы) — высокое давление, галофилы — соль, а алкалофилы — щелочь. Сонные долгоживущие микробы любят *время*, поскольку оно открывает им доступ в новые среды обитания. Они способны ждать пополнения ресурсов в таком отдаленном будущем, до которого другие организмы просто не доживают. Чтобы подчеркнуть их любовь к длительным временным интервалам, я предлагаю назвать их *хронофилами*. Геологические события имеют

для хронофилов такое же значение, как рассвет — для певчих птиц.

Чтобы рассуждать о хронофилах в правильном контексте, давайте рассмотрим их характеристики в классических экологических рамках. Принято различать две жизненные стратегии: сторонники стратегии *r* "быстро живут и умирают молодыми", а сторонники стратегии *K* воспроизводятся позднее и живут дольше[18]. Комары относятся к числу приверженцев стратегии *r*: они живут примерно сутки, но производят столько детенышей, что гарантированно будут надоедать миру еще долго после того, как вымрет человечество. Секвойя придерживается стратегии *K*: эти деревья проживают несколько столетий, прежде чем начинают размножаться. Получается, хронофилов можно назвать экстремальными сторонниками стратегии *K*. Единственная трудность в использовании этой схемы двух стратегий в отношении микробов заключается в том, что она разработана для крупных существ вроде мух и деревьев и поэтому оперирует такими понятиями, как потомство, пол и размер тела, а их сложно применить к миру микроорганизмов. Но если все же попытаться как-то впихнуть микробов в эту экологическую теорию, то введение времени

в качестве ресурса будет означать появление не новой экологической парадигмы, а скорее новой экологической ниши. Ниша хронофилов включает в себя группу организмов, существующих в таком экологическом мире, где все остальные умирают за сотню лет или меньше, — точно так же как ниша термофилов включает в себя организмы, отличающиеся от всех остальных, живущих при температуре 37 °C или ниже. Только в случае хронофилов экологическая “ниша” описывает не пространственное, а временное измерение.

Мы продолжаем узнавать новые факты о хронофилах, и я уверена, что эти данные будут и дальше расшатывать наши устоявшиеся представления о том, как устроена жизнь. Вероятно, у нас даже появится возможность заглянуть в прошлое и ответить на основополагающие вопросы про наше существование. *Как, где и когда возникла жизнь?* Или даже на еще более сложный четвертый вопрос: *почему возникла жизнь?*

# Глава 9
# Переосмысливаем свое происхождение

Обитатели земных глубин позволяют пересмотреть вопрос о происхождении живых организмов, поскольку заставляют иначе отнестись к самой природе жизни. Они показывают, что можно пожертвовать ста годами жизни, если это соответствует вашей эволюционной траектории, что достижение термодинамических пределов нестрашно при наличии правильных ферментов и что почти каждый минерал на Земле способен обеспечить химические ресурсы для поддержания жизни. Это сближает наши представления о биологии с нашими представлениями о геологии, как и должно быть, если мы хотим понять, как жизнь возникла в мире, где были только горные породы, минералы, газы и жидкости. Впрочем, идея слияния биологии и геологии не нова. В 1926 году Владимир Вернадский (1863–1945) предложил использовать термин “биосфера”, чтобы рассуждать о них как о единой системе[1].

В этой и следующей главе я постараюсь исполь-

зовать понятие о единой биосфере для ответа на три фундаментальных вопроса. *Где, как* и *когда* зародилась жизнь? А потом потихоньку перейду к мучительному четвертому вопросу: *почему* она возникла? Для этого я расскажу о своем путешествии к таким местам, где это могло произойти, — к глубоководным гидротермальным источникам. И объясню, почему то, что мы там обнаружили, навсегда изменило наши представления о собственном происхождении.

*Где* и *как* на Земле впервые возникла жизнь?

Вопросы о том, *где* и *как* зародилась жизнь, трудно разделить, поскольку место определяет среду и условия — если исходить из того, что жизнь началась на Земле. В соответствии с одной гипотезой, называемой теорией панспермии, жизнь на Земле имеет внеземное происхождение. Скажем, на Марсе когда-то в древности существовал океан, а эта планета находится недалеко от Земли, так что, быть может, земная жизнь зародилась там. Перенося возникновение жизни на Марс, мы приходим к интересным выводам (не последний из них заключается в том, что мы все инопланетяне), однако не отвечаем на вопрос, в какой среде впервые возникла жизнь.

Мне всегда казалось, что жизнь должна была возникнуть в каком-то глубоком и темном месте со множеством возможностей.

Законы термодинамики позволяют приблизиться к ответу на вопрос, где и как зародилась жизнь, поскольку устанавливают параметры для жизни. На поверхности нашей планеты самый мощный градиент энергии создается солнцем. Если зарождавшейся жизни нужен был мощный заряд энергии, вероятно, она возникла на поверхности. Но если жизнь началась на поверхности, она должна была быстро эволюционировать таким образом, чтобы защититься от солнечных ожогов, поскольку неистовость солнца разрушает органические молекулы. Напротив, если зарождавшейся жизни нужно было много небольших градиентов энергии, которые друг друга подпитывали, образуя своеобразные энергетические лестницы, тогда нашим древнейшим домом могли быть земные недра. Породы в земной коре создают хорошие возможности для зарождения жизни с широким спектром метаболических ниш, защищенных от опасных солнечных лучей.

В таком контексте предпочтительнее оказывается версия зарождения жизни под землей: хотя солнечный свет и кислород совершенно точно

необходимы для жизни крупных и сложных млекопитающих и растений, мириады более мелких градиентов, которые существуют в чревоподобном подземном мире, могли предоставить хорошую возможность для зарождения жизни. Более того, защитная среда подземных недр позволила бы живым организмам за несколько миллионов лет изобрести стратегии для борьбы с солнечным стрессом, прежде чем жизнь вышла из темноты на свет. Так что давайте начнем наши поиски в необъятных земных недрах.

В одних подземных средах жизнь могла зародиться с большей вероятностью, чем в других. Например, морские отложения для этой роли, по-видимому, не подходят, какими бы интересными они ни были. Пища в морских отложениях преимущественно происходит из остатков жизнедеятельности фотосинтезирующих организмов, так что жизнь не могла там зародиться. Хотя органическое вещество (то есть еда) иногда *может* образовываться небиологическим способом (например, астероиды содержат много разных органических веществ, синтезированных в абиотических процессах), пока мы не знаем, могли ли такие реакции обеспечить достаточное количество пищи для появления жизни здесь, на

Земле. Насколько нам известно, на астероидах такого не произошло.

Это сужает круг мест, в которых могла возникнуть жизнь, до подземных недр, где есть собственные источники энергии для поддержания хемолитоавтотрофов. Вероятно, вы помните, что эти крохотные создания используют химическую энергию для превращения диоксида углерода, в изобилии имевшегося на первозданной Земле, в органические соединения углерода, которыми могут питаться и люди, и микробы. После появления хемолитоавтотрофов уже легко представить себе эволюцию остальных форм жизни. Мертвыми тельцами хемолитоавтотрофов могли питаться самые разные микробы, которые, в свою очередь, служили пищей для цианобактерий; цианобактерии способствовали эволюции растений, а те произвели достаточное количество кислорода и биомассы для эволюции животных. Многие считают, что процессы серпентинизации внутри земной коры, о которых мы говорили в главе 5, позволяют ответить на вопрос, где и как могло начаться зарождение жизни. Трудно конкурировать с лаконичным уравнением: вода + горная порода = жизнь.

К тому же есть веские доводы в пользу того,

что жизнь возникла в глубоководных гидротермальных источниках на морском дне, где горячая вода насыщена химическими соединениями. Когда эта вода из глубоких земных недр прорывается наружу и смешивается с холодной и окисленной морской водой[57], может произойти чудо зарождения жизни. Кроме того, тепло гидротермальных источников ускоряет химические реакции, что тоже могло быть полезно для зарождавшейся жизни. Возможно, самое убедительное доказательство этой гипотезы — что общие гены у всех обитателей Земли выглядят так, будто адаптированы к высокой температуре, что указывает на возможность нашего общего происхождения из горячих источников. Для окончательного подтверждения данной гипотезы необходимо как следует изучить гидротермальные источники, однако это проще сказать, чем сделать. Подобраться к ним настолько трудно, что их открыли только в 1977 году, и поэтому мы еще многого о них не знаем.

**[57] Примечания: 57**

Еще до так называемой кислородной катастрофы солнце уже окислило некоторые химические соединения на поверхности Земли. Так что эти процессы совершенно точно предшествовали фотосинтезу.

## Ныряем к истокам жизни

Вы уже понимаете, что меня тянет в таинственные места, как мотылька на пламя, и вряд ли удивитесь, узнав, что в 2008 году я оказалась на дне океана, на этот раз в море Кортеса (другое название — Калифорнийский залив) в Мексике, на глубине двух тысяч метров под водой в пилотируемом подводном аппарате “Алвин” — том самом погружном аппарате, с помощью которого был открыт первый гидротермальный источник. “Алвин” — единственный обитаемый американский научный аппарат для погружений. Его использовали для поисков “Титаника”[58], и он с легкостью выдерживает экстремальное давление. Во время нашего исследования “Алвин” мог опускаться вдвое глубже, чем нам было нужно. А теперь, благодаря последним усовершенствованиям, он способен погружаться еще километра на полтора ниже.

Погружение на “Алвине” напоминало погруже-

**[58] Примечания: 58**

Для исследования затонувшего “Титаника” использовались и российские аналоги “Алвина” — глубоководные обитаемые аппараты “Мир”. И кстати, именно с их помощью были проведены съемки знаменитого фильма. — *Прим. науч. ред.*

ние на батискафе “Джонсон-Си-Линк II”, которое я описывала в начале книги. После многочисленных проверок люк был закрыт, и нас с помощью А-образной рамы сняли с борта корабля и опустили в воду. Я сидела скрестив ноги, но в блаженном вертикальном положении внутри сферы с пятисантиметровыми титановыми стенками, буквально в нескольких сантиметрах от пилота Шона Келли и моего руководителя Андреаса Теске, и у каждого из нас был свой иллюминатор.

Меня снова очень беспокоило, какому риску мы подвергаем себя во время этого мероприятия. На собрании перед спуском Шон упомянул об одной опасности, раньше мне в голову не приходившей: об огне. Если вы пользуетесь какими-то электронными приборами в пространстве диаметром с обеденный стол, огонь от электрической искры может вызвать катастрофу. Но у батискафа есть преимущество перед обеденным столом: там можно контролировать содержание кислорода. Ведь огню нужен кислород. Поэтому бороться с огнем на “Алвине” просто: нужно надеть респиратор, отключить подачу кислорода в помещение и применить огнетушитель, чтобы ускорить тушение огня. А в качестве дополнительной меры безопасности мы и дышали воздухом с понижен-

ным содержанием кислорода. Забавно, что мое погружение на “Алвине” больше напоминало восхождение в горы, чем плавание с аквалангом[59].

Как и во время моего предыдущего погружения в Мексиканском заливе, пока мы камнем падали на дно сквозь двухкилометровый слой морской воды, вокруг сверкали невероятные биолюминесцентные огни. А когда мы отсоединили балласт и увидели морское дно, я почувствовала, будто попала в другой мир. От гидротермальных источников на дне исходило тепло, и вода вокруг нас мерцала. Я придвинулась к акриловому иллюминатору, стараясь не касаться его лицом. Пилот Дейв Уолтер, отвечавший за чистоту иллюминаторов, предупредил нас наверху, что аппарат должен вернуться на поверхность чистым. За стеклом колыхалось множество гигантских червей. Каждый был размером примерно с меня и имел белое тело диаметром с садовый шланг и ярко-красную голову, похожую на метелку для смахивания пыли. Черви пучками отходили от

**[59] Примечания: 59**

Для повышения безопасности к 2023 году все оставшиеся 120-вольтовые сети на “Алвине” были заменены 24-вольтовыми, так что теперь исключена возможность возникновения открытого огня. Тем не менее там по-прежнему поддерживается атмосфера с пониженным содержанием кислорода и предусмотрены дополнительные маски для дыхания.

всех твердых поверхностей. Я знала, что, кроме меня, лишь несколько сотен человек видели этих червей так близко, поэтому не удержалась и все-таки приблизила свой грязный нос к драгоценному акриловому иллюминатору Дейва.

Моя работа заключалась в том, чтобы удостовериться, что мы выполнили все научные задания и задокументировали все данные письменно и на видео — с помощью камер, установленных на внешней поверхности “Алвина”. В свободные минуты я снимала фантастических червей, высасывающих химические вещества из обжигающей жидкости. Однако эти животные используют химические соединения не напрямую. Они доставляют их к бактериям, живущим в их телах, а те уже превращают химические соединения в пищу для червей. Люди часто принимают пробиотики в качестве пищевых добавок, чтобы поддерживать здоровую кишечную микробиоту. Так вот эти гигантские черви, рифтии, доводят данный принцип до крайности. В ходе эволюции они отказались от рта, желудка и анального отверстия и теперь во всем полагаются на микробов. У них остался лишь специализированный орган под названием “трофосома”, заполненный микробами, способными окислять серу.

Однако я отправилась на дно океана не затем, чтобы изучать червей, какими бы необыкновенными они ни были. Нет, я надеялась обнаружить нечто гораздо более древнее — что появилось в период возникновения многоклеточных форм жизни. Когда я снова оказалась на поверхности и вернулась в лабораторию в Университете Северной Каролины в Чапел-Хилле с образцами из гидротермальных источников, я поразилась тому, что обнаружила. Я выделила ДНК, отсеквенировала — и столкнулась с проблемой. При сравнении полученных последовательностей с уже известными, содержащимися в базах данных, один набор последовательностей никак не хотел вписываться ни в какую категорию.

## Загадка происхождения эукариот

В главе 4 я рассказывала, как определение последовательностей ДНК обитателей земных глубин позволило узнать о существовании новых ранних ветвей на древе жизни, о которых мы даже не подозревали. Однако одна группа последовательностей выделялась, отличалась от остальных, и именно ее я и обнаружила в образцах из гидротермальных источников. Как

ни пыталась, я не могла построить филогенетическое дерево, на котором обладатели этих последовательностей ДНК однозначно относились бы к археям, бактериям или эукариотам. В то время считалось, что все формы жизни на Земле относятся к одной из этих трех групп. Поэтому я сразу подумала: до чего же я никудышный ученый, напутала что-то в алгоритме! Но на самом деле выяснилось, что я наткнулась на один очень странный организм.

Я начала прочесывать научную литературу, чтобы понять, находил ли кто-нибудь еще эту необычную ДНК. Действительно, ее находили в других глубоководных гидротермальных источниках и в подповерхностных участках, однако, поскольку этих микробов никто не культивировал, общепринятого наименования у них не было. Костантино Ветриани из Ратгерского университета называл их “группой морских придонных организмов B” (*Marine Benthic Group B*, MGB-B), Фумио Инагаки из JAMSTEC — “группой глубоководных архей” (*Deep-Sea Archaeal Group*, DSAG), а Кен Такаи из JAMSTEC — “группой из морских гидротермальных источников” (*Marine Hydrothermal Vent Group*, MHVG). Кэтрин Книттель из Института морской микробиологии Общества Макса План-

ка в Германии решила сфотографировать этих микробов, что не так уж просто. Конечно, если у вас есть хорошо растущая культура, вы можете размазать ее по предметному стеклу, окрасить, поместить под окуляр микроскопа и сфотографировать. Но когда вы пытаетесь обнаружить новых загадочных микробов с океанского дна, которые отказываются расти на чашке Петри, задача сильно усложняется. Если вы размажете по предметному стеклу свежий ил, краситель не позволит отличить один тип микробов от другого — и это большая проблема, поскольку в каждом грамме отложений содержатся *миллиарды* различных типов микробов.

Чтобы обойти эту проблему, Кэтрин уселась за компьютер и стала сравнивать последовательности гена 16S рРНК странных микробов без названия со всеми известными на тот момент генами бактерий и архей. Она заметила цепочку из восемнадцати нуклеотидов, которая соответствовала только этой необычной группе организмов. А затем Кэтрин присоединила к этой последовательности из восемнадцати нуклеотидов флуоресцентную метку и смешала с донным илом. Каким-то образом ДНК-зонды нашли свои цели: они прикрепились к клеткам MGB-B/DSAG/

MHVG и заставили их светиться, что позволило Кэтрин и ее коллегам впервые взглянуть на этих загадочных существ[2]. Когда ученые поглядели на них в микроскоп, то в первую очередь обнаружили, что это чрезвычайно мелкие клетки: их размер сравним с длиной волны синего света (550 нанометров). Однако важнее всего (и это может иметь колоссальное значение для нашего собственного существования), что эти клетки образуют глобулярные агрегаты с другими клетками. Для любых других микробов способность формировать агрегаты вполне типична. Но это необычные микробы. Это не бактерии, не совсем археи и не совсем эукариоты. Они стоят особняком на древе жизни. Чтобы понять, почему это так важно (почему слипание этих специфических клеток вызывает учащение пульса), нужно обсудить кое-что о самой ранней истории нашей ветви на древе жизни — ветви эукариот.

Одна из отличительных особенностей эукариот заключается в том, что внутри их клеток есть микроскопические органеллы, называемые митохондриями, которые захватывают богатые электронами молекулы пищи (поступающие через кишечник и кровь) и заставляют их взаимодействовать с кислородом (поступающим

с кровью от легких). Как я упоминала в предыдущих главах, аэробное дыхание — мощный термодинамический процесс, и митохондрии вовсю используют его для синтеза молекул АТФ, служа энергетическими станциями клетки. Однако наши митохондрии не совсем “наши”: это бывшие бактерии, которые по неизвестным причинам оказались внутри эукариотических клеток и остались так надолго, что получили постоянную прописку.

Эту теорию эндосимбиоза выдвинула биолог Линн Маргулис, наряду со схемой подразделения всех живых организмов на пять царств. И в отличие от классификации по пяти царствам, теория эндосимбиоза подтверждается современными открытиями. Если вы под микроскопом посмотрите на клетки человека, тупика, какого-нибудь растения или большинства других эукариот[60], вы увидите, что митохондрии действительно очень напоминают клетки бактерий. У них свои собственные клеточные мембраны и даже исходная бактериальная ДНК. Это означает, что прямо сейчас внутри клеток, которые мы считаем сво-

**[60] Примечания: 60**

У некоторых микроскопических эукариот митохондрий нет, но, судя по всему, они их в какой-то момент потеряли, а изначально имели.

ими, содержится бактериальная ДНК[61]. И она весьма похожа на ДНК современных бактерий, так что мы даже можем сказать, микроорганизмам какого типа она принадлежала изначально. Это довольно обычная группа бактерий, которых называют альфа-протеобактериями, они часто встречаются во многих средах, включая морскую воду. Такая бактерия каким-то образом проникла в эукариотическую клетку и стала настолько полезной, что потеряла способность жить независимо от хозяина и сократила свой геном до нескольких самых важных элементов. Оставшихся генов недостаточно, чтобы бактерия могла жить независимо, и теперь мы неразлучны. Мы ничего не можем делать без помощи этих маленьких непрошеных гостей. Слушаем ли мы музыку, размышляем, читаем книгу или согреваем тело — они помогают нам во всех делах. И то же самое справедливо для всех растений и животных на нашей планете.

Но если все действительно произошло таким образом — если древние бактерии внедрились в наши клетки и там остались, — возможно, мы

**[61] Примечания: 61**

Конечно, у нас в кишечнике обитают целые полчища микробов. Но бактериальная ДНК, о которой я говорю, находится внутри наших человеческих клеток.

могли бы обнаружить и другие примеры такого рода. Если природа изобретает что-то работающее, она использует это не один раз. Посмотрите на форму плавников у китов и китовых акул. Они напоминают крылья “Боинга-767”, однако плавники этих двух видов животных возникли совершенно разными эволюционными путями.

К счастью, прямо у нас перед глазами есть второй пример эндосимбиоза, давшего начало новым органеллам: речь идет о растениях. Как мы своей способностью бегать и прыгать обязаны не себе самим, так и способность растений к фотосинтезу обеспечивается не самими растениями. Хлоропласты (элементы растительных клеток, осуществляющие фотосинтез), как и митохондрии, представляют собой бактериальных пришельцев из древних времен. Хлоропласты сохранили свою ДНК достаточно хорошо, поэтому мы знаем, что они ведут свое начало от цианобактерий. Как и митохондрии, хлоропласты теперь неразрывно связаны с эукариотическими клетками, в которых живут. Однако, в отличие от хлоропластов, митохондрии есть у всех главных групп эукариот, а не только у растений, а это означает, что возникновение митохондрий может быть ключом к эволюции всей нашей ветви

на древе жизни.

Как началась эта связь между ранними эукариотами и бактериями, позднее превратившимися в митохондрии? Может быть, древняя эукариотическая клетка съела древнюю бактерию, которая при этом не умерла, а стала сотрудничать с тем, кто ее проглотил? Или хитрый микроб инфицировал древнюю эукариотическую клетку, но потом передумал и решил жить в гармонии со своей жертвой всю оставшуюся жизнь? Или же две клетки просто сосуществовали рядом, обмениваясь пищей и другими ресурсами, так долго, что решили навсегда закрепить свою связь? Забавно рассуждать о таких возможностях, однако биологические процессы слишком запутанны, чтобы делать какие-то выводы исключительно на основании мысленных экспериментов. Кровь биологических теорий — экспериментальные данные.

К счастью, у нас полно данных о древних альфа-протеобактериях, превратившихся в митохондрии. Но к несчастью, мы почти ничего не знаем о древних клетках, которые стали их хозяевами. Выполняя свою аспирантскую работу в комнате без окон сразу после возвращения из экспедиции в море Кортеса и безуспешно пытаясь заставить

компьютерные программы сказать мне, что же это за странные микробы, я, возможно, исследовала одного из самых первых прямых потомков того хозяина, что поглотил альфа-протеобактерию и в итоге стал человеком. Вот почему нас так интересовали эти микробы с невыразительными названиями MGB-B/DSAG/MHVG[62]. Вдруг они сохранили какие-то признаки той первой ступени перехода к эукариотической жизни на нашей планете?

И вот почему меня так взволновало, когда Кэтрин Книттель показала, что эти микробы образуют маленькие кластеры с другими клетками. Быть может, склонность этих микробов сбиваться в кучки способствовала тому, что некоторые из них вступили в связь с альфа-протеобактериями и положили начало пути, приведшему к нашему появлению на свете. Однако сложно узнать своих “прабабушек” по единственному гену и нескольким фотографиям. К сожалению, почти два десятка лет у нас не было ничего другого. Но затем, в 2015 году, Аня Спанг и Тийс Эттема из Уппсальского университета в Швеции впервые полностью прочли геном этих загадочных

**[62] Примечания: 62**

Невыразительными, но не бесполезными! Я совсем не хочу обижать Ветриани, Инагаки и Такаи.

организмов[3]. Они дали им полное, а не сокращенное название (за что все ученые вроде меня чрезвычайно им благодарны): они окрестили их Lokiarchaeota — по названию гидротермального источника “Замок Локи”, где их обнаружили (а не в честь скандинавского бога Локи).

Когда ученые сравнили геном локиархей с геномами других организмов, они выявили удивительное сходство с нашей линией — эукариотами. Такое близкое родство с нами позволяет предположить, что они действительно могут быть прямыми потомками наших древних предшественников. Кроме того, ученые из Швеции обнаружили в геноме этих клеток особенности, которых никогда раньше не замечали в геноме прокариот. Одно из важнейших различий между эукариотами (людьми, растениями, грибами и так далее) и прокариотами (бактериями и археями) заключается в том, что мы, эукариоты, способны перемещать внутриклеточные вещества по маленьким конвейерным лентам с помощью специализированных белков. У локиархей гены таких белков есть, и это еще одно доказательство, что они с нами в одной команде. Еще исследователи нашли гены, которые, вероятно, позволяли клеткам локиархей обмени-

ваться водородом со своими эндосимбионтами (возможно, с протомитохондриями), а также поверхностные структуры, вероятно, помогавшие прикрепляться к дружественным клеткам альфапротеобактерий.

Чтобы больше узнать об этих интересных существах и об их внутренней организации, ученым нужны более качественные изображения. Но единственный способ получить такие изображения — научиться культивировать локиархей. Несмотря на все усилия по культивированию микроорганизмов из гидротермальных источников, локиархей ни разу не удавалось вырастить в лаборатории… до 2020 года.

Попытки культивировать локиархей начались в 2006 году, примерно за десять лет до того, как Спанг и ее коллеги объявили о расшифровке первого генома Lokiarchaeota. Хироюки Имати и его коллеги из JAMSTEC решили опробовать новый метод выращивания. Они сконструировали специальную камеру размером со шкаф и развесили в ней на нейлоновых нитях кусочки стерильных кухонных губок. Губки обмакивали в жидкость из глубоководных гидротермальных источников у берегов Японии. А потом на верхнюю губку медленно капали средой для роста клеток. Когда

первая губка насыщалась, жидкость томительно долго стекала на вторую губку и так далее. А ученые терпеливо ждали. Через четырнадцать лет японские ученые сообщили о получении первой культуры локиархей, которую им удалось сфотографировать с высоким разрешением[4].

Результаты оказались такими, о каких ученые могли лишь мечтать: выяснилось, что от каждой маленькой клетки локиархей отходят крупные отростки. Подключите воображение и представьте, как такая клетка обхватывает своими щупальцами альфа-протеобактерию, заглатывает ее и в конечном итоге превращается в… жирафа. Я дистанционно смотрела выступление Хироюки, когда он рассказывал о своей работе во время получения награды за это открытие от китайского Международного центра исследований глубоководной жизни. Он отметил, что состав культуральной среды отчасти определялся результатами некоторых моих исследований, и я была очень горда, что хотя бы косвенно способствовала его научным достижениям. Новый микроорганизм был назван *Prometheoarchaeum syntrophicum* в честь греческого бога Прометея, который вылепил людей из глины и даровал им огонь (название вполне подходящее, если

мы правильно полагаем, что эти клетки были предшественниками всех эукариот и дали нам огневую мощь митохондрий). Тот факт, что мы вновь и вновь находим локиархей в гидротермальных источниках, похоже, подтверждает, что древнейшие ветви на древе жизни зародились в этой среде. Однако мы не можем отправиться на миллиард лет назад и проверить эту гипотезу. В поисках источника жизни нам приходится мириться с некоторой степенью неопределенности, особенно в отношении наиболее сложных вопросов. В этой главе я рассказала о нескольких возможных сценариях, описывающих, где и как зародилась жизнь. А теперь перейдем к более сложным вопросам. *Когда* и *почему* возникла жизнь?

# Глава 10
# Равновесие – это смерть

Как я расскажу далее, чтобы определить время появления ранних форм жизни на Земле, мы можем использовать окаменелости, и это позволяет нам начать отвечать на вопрос, *когда* зародилась жизнь. Ответить же на вопрос, *почему* это произошло, гораздо труднее. Для этой цели нам в большей степени придется опираться на гипотезы, чем на факты, и эти гипотезы приводят нас к неожиданному заключению, что жизнь и отсутствие жизни — единый *континуум*, а не два несвязанных состояния. Давайте разбираться.

## Когда возникла жизнь?

Когда наш мир из места, где нет *ничего* живого, превратился в место, где *кто-то* живет? Должно быть, невероятный был день. Если бы мы нашли окаменелые остатки первых форм жизни на нашей планете, мы смогли бы понять, когда это произошло. Было бы здорово отколоть кусок горной породы и найти физические дока-

зательства происхождения жизни так же легко, как мы нашли скелет *Tyrannosaurus rex*. Однако *T. rex* появился сравнительно недавно, менее ста миллионов лет назад, и поэтому его остатки все еще можно обнаружить. А мы охотимся за чем-то, что существовало на Земле *миллиарды* лет назад, причем не имело костей. Мы находим древнейшие окаменелости, напоминающие бактерий, так называемые микроокаменелости, однако их трудно различить на фоне минеральных отложений. В охоте за первыми формами жизни мы ориентируемся как на микроокаменелости, так и на *химические* окаменелости.

Один из самых важных химических следов, которые мы находим в поисках источников жизни, — изменение изотопного состава образцов. Изотопы — это атомы одного и того же элемента, различающиеся только количеством нейтронов в ядре. Если вы взглянете на периодическую таблицу, то, прищурясь, обнаружите под символом каждого элемента число, напечатанное мелким шрифтом. Это атомная масса, учитывающая совокупность всех нейтронов и протонов в ядре каждого элемента[63]. Может показаться стран-

**[63] Примечания: 63**

Еще атомная масса учитывает электроны, но их вклад ничтожен по сравнению с вкладом нейтронов и протонов.

ным, что почти во всех случаях это нецелое число. Например, атомная масса углерода составляет 12,011. Каждый атом углерода должен содержать шесть протонов — иначе это не углерод. Однако получается невозможное: чтобы суммарная масса равнялась 12,011, углерод должен содержать 6,011 нейтрона. На свете не существует такой вещи, как одиннадцать тысячных долей нейтрона. Что же это означает? На самом деле число 12,011 — это не масса каждого конкретного атома углерода, а средняя масса всех атомов углерода на Земле. Большинство атомов углерода содержат по шесть нейтронов, но некоторые — семь или даже восемь. В результате сумма протонов и нейтронов в атомах углерода варьирует в пределах от двенадцати до четырнадцати, а в среднем составляет 12,011.

Живые организмы мастерски умеют различать эти едва заметные отклонения в составе атома углерода. А когда жизнь взаимодействует с химией, она оставляет след, который мы можем обнаружить, — как в окаменелостях. Углерод с восемью нейтронами в ядре обладает радиоактивными свойствами, то есть спонтанно распадается на другие элементы с выделением энергии. Однако при изучении химических окаменелостей это

излучение нас не интересует. Когда мы пытаемся обнаружить признаки жизни с помощью изотопного анализа, нас интересует тот факт, что атом при наличии дополнительных нейтронов образует более прочные связи с другими атомами. Это минимальное различие в силе связей никак не влияет на химические свойства элемента, но принципиально важно для поисков признаков жизни.

Как именно мы используем изотопы в качестве химических окаменелостей? Как известно, живые существа потребляют диоксид углерода и превращают его во все необходимые органические молекулы (сахара, липиды, белки, нуклеиновые кислоты) в процессе автотрофии (хемолитоавтотрофии или фотоавтотрофии). Когда клетки случайным образом захватывают молекулы диоксида углерода, в них в основном попадает смесь атомов углерода с шестью и семью нейтронами. Оба изотопа делают свое дело, но версия с шестью нейтронами, образующая более слабые связи, реагирует быстрее, так что в теле организма оказывается больше углерода с шестью нейтронами, чем было в исходном соот-

ношении[64]. И поэтому, когда мы обнаруживаем в древних породах органические соединения углерода, в которых средняя сумма нейтронов и протонов дает не 12,011, а, скажем, 12,005, мы знаем, что этот сдвиг был вызван присутствием живого организма.

Однако, чтобы привязать эти химические окаменелости к какому-то периоду времени, нам нужно знать возраст пород, в которых они содержатся. А как определить возраст пород? Ответ опять-таки кроется в изотопах, на этот раз — радиоактивных. Радиоактивные изотопы неустойчивы: они со временем распадаются с какой-то определенной скоростью. Обычно, когда мы рассуждаем о радиоактивном распаде, мы в основном обращаем внимание на энергию, которая при этом выделяется, поскольку она может либо стать причиной рака (как в результате аварии в Чернобыле), либо лечить от рака (радиационная

**[64] Примечания: 64**

Проще говоря, ферменты, которые преобразуют углерод из углекислого газа, предпочитают легкий изотоп $^{12}C$ и “выплевывают” тяжелый изотоп $^{13}C$. В результате продукты реакции, органические соединения, оказываются облегченными, а непрореагировавший углекислый газ утяжеляется. Такое же фракционирование стабильных изотопов происходит, когда клетки используют сульфат. Легкий изотоп серы $^{32}S$ переходит в продукты реакции, сероводород, а остаточный сульфат утяжеляется, поскольку там остается больше тяжелого изотопа $^{34}S$. — *Прим. науч. ред.*

терапия), либо поставлять пищу для микробов (см. главу 1). Но для определения возраста пород мы ориентируемся на реакции радиоактивного распада, которые происходят намного медленнее, чем те, что уничтожают рак. Измеряя радиоактивность изотопа в породах и зная скорость его распада, ученые могут определить возраст пород. К счастью, разные радиоактивные элементы в породах распадаются с разной скоростью, и поэтому анализом нескольких изотопов мы достаточно хорошо перекрываем всю временную шкалу истории Земли.

Например, если горная порода образуется на дне моря при разрыве мантии между двумя расходящимися тектоническими плитами, радиометрические часы сбрасываются на ноль — и начинается отсчет времени. В результате повсюду в земной коре есть крохотные радиометрические часы, тикающие с разной скоростью, которые показывают возраст горных пород. Время зарождения молодых пород можно определить по быстро распадающимся изотопам, таким как углерод. Для определения возраста древнейших пород нужно ориентироваться на радиоактивные изотопы с самой низкой скоростью распада, такие как цирконий. Точность датирования по

медленно распадающимся радиоизотопам не самая высокая, однако эти оценки часто можно подтвердить с помощью дополнительной информации, поскольку горные породы почти всегда встроены между слоями других геологических материалов. Если радиоизотопный анализ показывает, что горной породе три миллиарда лет, но она зажата между угольными пластами, приходится признать, что измерения ошибочны, поскольку уголь образуется из мертвых растений, а растения появились на Земле лишь около ста пятидесяти миллионов лет назад. Однако если изотопный анализ показывает, что горная порода древняя, и соседние горные породы тоже выглядят старыми, то оценка, вероятнее всего, верна.

Возраст самых почтенных "изотопных окаменелостей" на Земле составляет 3,85 миллиарда лет. На большинство других вопросов о происхождении жизни, например где она возникла, у нас есть только приблизительные ответы, однако время появления жизни на Земле мы знаем достаточно точно. И это поразительно. Животные появились на свете лишь несколько сотен миллионов лет назад. А значит, миллиарды лет с момента начала эволюции жизнь на Земле была представлена исключительно микроорганизма-

ми. И поэтому, изучая обитателей земных глубин и других микробов, мы изучаем образ жизни существ, которые всегда находились в главенствующем положении на этой планете, хотя мы и открыли их совсем недавно.

Впрочем, планета Земля на семьсот миллионов лет старше самых древних изотопных окаменелостей. Что происходило на планете в тот период? Хотя возраст Земли составляет 4,5 миллиарда лет, земным породам лишь около 3,8 миллиарда лет — по той причине, что поверхность планеты постоянно менялась в результате тектонической активности. В океанах возникали новые горные хребты, а старые разрушались в зонах субдукции, когда тектонические плиты погружались в мантию. Однако, по счастью, некоторые небольшие фрагменты коры не были захоронены в мантии. Представьте, что вы очень-очень медленно перемешиваете ингредиенты для приготовления теста. Ваша ложка уже проделала несколько кругов, но вы все еще видите немного яичного желтка, не слившегося с основной массой. Вот так же и с древними породами на поверхности Земли: некоторые из них не были перемешаны субдукционной ложкой. Нам повезло! В нескольких редких местах на Земле (в Южной Африке,

Австралии и Гренландии) можно найти фрагменты пород, избежавшие участи всех остальных. Почти каждый раз, когда ученые анализируют эти горные породы, они находят мельчайшие структуры, похожие на окаменевших микробов, и изотопные сигналы подтверждают, что там существовала жизнь. Итак, похоже, жизнь на Земле зародилась одновременно с самыми древними горными породами. Все, что старше, существует лишь в нашем воображении.

*Почему* на Земле возникла жизнь?

Чтобы понять, *почему* на Земле зародилась жизнь, давайте опять обратимся к термодинамике, поскольку она хорошо определяет границы жизни. Однако, если мы собираемся использовать термодинамику для поиска *причин* происхождения жизни, нам нужно продвинуться гораздо дальше, чем задумал Гиббс.

Одним из людей, выдвигавших самые сумасшедшие идеи о происхождении жизни, был Владимир Вернадский, который утверждал: *у жизни нет начала*. И точка. Он считал, что на Земле есть жизнь, поскольку она была здесь *всегда*. Он верил, что Вселенная вечна и поэтому жизнь тоже должна быть вечной. Конечно, Вер-

надский писал в то время, когда даты в истории формирования Земли еще не были окончательно установлены. Теперь-то мы знаем, что у Земли было начало, так что и у жизни оно тоже должно быть. Однако не исключено, что мы можем извлечь некую пользу из рассуждений о жизни без начала. Что, если перестать думать о ней как о чем-то совершенно особенном, как о редчайшем явлении, возникшем лишь однажды в этом крохотном уголке Вселенной? Может быть, жизнь — это непрерывная цепь событий?

Другой ученый, Альфред Лотка (1880–1949), известен главным образом благодаря созданию модели Лотки — Вольтерры, которая показывает, как колеблется численность популяций хищников и их жертв. Однако еще он предположил, что жизнь — это в большей степени процесс, чем уникальное событие, поскольку она постоянно подпитывается солнечной энергией[1]. Я думаю, что он, как и Вернадский, был в чем-то прав.

Чтобы понять, о чем рассуждал Лотка, нужно проанализировать некоторые серьезные проблемы, касающиеся уравнения для свободной энергии Гиббса. Вероятно, свободная энергия Гиббса действительно устанавливает законы жизни, но она никак не подходит для ее *описания*.

Величина $\Delta G$ говорит о том, сколько энергии вы получите в ходе химической реакции до наступления равновесия. Однако равновесие — это смерть. Энергия Гиббса могла бы описать мою жизнь, если бы я жила в герметично запаянной камере. Я бы использовала весь воздух в камере, $\Delta G$ стала бы равна нулю, я бы умерла, и выполнилось бы второе начало термодинамики.

Однако жизнь происходит не в герметичной камере. Жизнь — открытая система. Энергия постоянно протекает через наши тела, поддерживает нас и отдаляет от равновесия. Пытаться вывести законы термодинамики жизни лишь на основании свободной энергии Гиббса — все равно что работать исключительно с музейными экспонатами. Изучая чучела птиц, бегемотов и засушенных насекомых, мы можем догадаться, что птицы едят клювами, бегемот слушает ушами, а экзоскелет определяет форму тела насекомых. Но как узнать о том сладком хрусте, который слышит птица, вытаскивая насекомое из уха бегемота? Равновесная термодинамика мощна и полезна, но есть и другие инструменты.

Для описания открытых систем, находящихся вдали от равновесия (то есть живых), нужна термодинамика совсем другого типа — нерав-

новесная. В книге под названием “В холод” 2005 года Дорион Саган и Эрик Шнайдер метко сформулировали: “Эволюционная теория связывает организмы в контексте времени. Экология связывает их в контексте пространства. Химия — в контексте структуры. А неравновесная термодинамика связывает их в контексте процесса”. Они утверждают, что неравновесная термодинамика важна для жизни не меньше, чем химия.

Чтобы понять, в чем сила неравновесной термодинамики, давайте вспомним о революции в исследованиях ДНК. Тот переворот имел чрезвычайно большое значение потому, что со всей очевидностью показал наше родство со всеми формами жизни, включая микробов. Сравните ДНК любых живых организмов — и вы увидите, что мы все родственники. Неравновесная термодинамика расширяет это родство, включая в него и *неживой мир*. Саган и Шнайдер полагают, что живое и неживое существуют в виде непрерывного спектра. На одном краю спектра находятся неживые системы в термодинамическом равновесии, на другом — живые системы, которые не только неравновесные, но и постоянно создают энергетический потенциал, удаляющий их от равновесия. Расположение каждого существа на

этом непрерывном спектре зависит от того, как оно функционирует в рамках неравновесной термодинамики. И в этом смысле живое и неживое на самом фундаментальном уровне связаны между собой через второе начало термодинамики. Поэтому, если мы хотим с помощью науки получить ответ на вопрос, почему возникла жизнь, нужно начать с этого закона.

Второе начало термодинамики гласит, что некая величина, называемая энтропией, может только возрастать. Новый оксфордский американский словарь определяет энтропию как “термодинамическую величину, отражающую недоступность тепловой энергии системы для превращения в механическую работу”. Если умножить энтропию на температуру, мы получим энергию, а следовательно, энтропия — это не энергия, а скорее ее *качество*: когда энтропия очень высока, энергия менее полезна, как тепло или вода, которые мы теряем во время спортивной тренировки. Энтропию можно рассматривать как возможность, а системы всегда стремятся к тому, что возможно. Вот почему второе начало термодинамики постулирует, что энтропия должна возрастать. Определение в словаре продолжается словами “…и часто интер-

претируемую как степень неупорядоченности или случайности в системе". Если вы опрокинете тарелку с супом, по вашим ботинкам разольется неупорядоченная смесь с высоким значением энтропии. Мы интуитивно воспринимаем энтропию как степень беспорядка, и в головах многих людей это, к сожалению, стало ее определением. Однако рассматривать энтропию исключительно как меру беспорядка или хаоса — большая ошибка. Вот пример, показывающий, почему интуитивное восприятие некоторых типов энтропии как меры беспорядка иногда не соответствует действительности.

Если лопнет шарик, наполненный гелием, молекулы гелия быстро распространятся по всей комнате, достигнув максимального состояния неупорядоченности. Здесь об энтропии можно рассуждать как о хаосе, поскольку оба параметра возрастают. Но это не вся история. Примерно в то же время, когда Гиббс занимался выведением термодинамических уравнений, Людвиг Больцман пришел к неудобному выводу, что для определения коллективного поведения атомов гелия в описанной выше системе нельзя просто сложить характеристики всех отдельных молекул, будто это летающие в воздухе маленькие шарики.

Чтобы получить правильный ответ, необходимо применить законы статистики и вероятности.

Во времена Больцмана сама идея, что в физический закон необходимо ввести элемент вероятности, была крайне непопулярна среди физиков, поскольку указывала на невозможность контролировать все переменные физического мира. Однако в итоге выяснилось, что Больцман прав, и это вывело нас к современной квантовой физике, которая почти полностью основана на вероятности.

Больцман сделал свое революционное открытие отчасти благодаря увлечению идеей Чарльза Дарвина о биологической эволюции. Его вдохновили рассуждения Дарвина о естественном отборе в больших популяциях животных, и Больцман применил подобный способ рассуждений для описания термодинамики больших популяций молекул. Однажды Больцман заметил: “Если бы кто-то спросил меня, как следует назвать наше столетие, я бы без колебаний ответил: это столетие Дарвина”[2]. Что может лучше проиллюстрировать отсутствие границы между миром физики и миром биологии, чем тот факт, что путь к квантовой физике проходил через эволюционную биологию?

Чтобы понять роль вероятности в термодинамике, вернемся к нашему примеру с шариком гелия. В контексте вероятности беспорядок должен увеличиваться одновременно с энтропией, поскольку существует гораздо больше способов распределения всех молекул гелия по объему комнаты, чем по ограниченному объему шара. Молекулы вырываются наружу, поскольку снаружи больше возможностей для распределения, чем при нахождении в крохотном пространстве шара.

И в таком случае второе начало термодинамики — не загадка, а очевидность. Пример с газом в шарике настолько интуитивно понятен, что возникает искушение предположить, будто все процессы повышают энтропию за счет увеличения степени беспорядка. Однако это не так. В частности, в *открытых* системах энтропия локально может снижаться за счет *снижения* степени беспорядка, если за пределами системы энтропия растет, скажем, в результате выделения тепла.

Давайте вернемся к аналогии с лопнувшим шариком. Но теперь представьте, что в комнате находится десятилетняя девочка, которая вдыхает вырвавшийся гелий. В таком случае молекулы

газа распределяются не по всей комнате, а по более тесному и упорядоченному пространству легких, и ребенок будет говорить забавным писклявым голоском. Нарушает ли девочка второе начало термодинамики, не давая молекулам газа из шарика распределяться по комнате? Нет. Когда она весело хохочет, потому что пищит, как маленький бурундучок, ее тело выделяет тепло. И хотя рассредоточение молекул гелия откладывается по времени, поскольку сначала они концентрируются в легких ребенка, в итоге, когда девочка, смеясь, выпускает их наружу, энтропия возрастает сильнее.

Пример с газом в шарике трудно обобщить, а вот пример с газом в шарике и хихикающим ребенком позволяет сделать более общие выводы. Он помогает понять, почему жизнь — естественное следствие из второго начала термодинамики: жизнь чрезвычайно хорошо создает структуры, способные повышать энтропию. А как ведут себя в этом смысле неживые объекты? Обладает ли неживая материя способностью производить упорядоченные процессы с увеличением энтропии? Ответ на этот вопрос утвердительный. Водоворот в потоке жидкости не живой, но обладает высокоупорядоченной структурой. Обычно молекулы

воды движутся независимо друг от друга, но на короткий промежуток времени они образуют упорядоченный водоворот, что максимально увеличивает энтропию за счет рассеивания энергии системы. Молекулы воды вне водоворота и внутри него не могут сообщаться друг с другом или принимать решения, однако сохраняют одинаковый угловой момент, поддерживая структуру воронки на протяжении недолгого времени.

Илья Пригожин (1917–2003) называл такие образования диссипативными структурами, поскольку они рассеивают энергию и сохраняют упорядоченность с удивительно низким уровнем энтропии. Однако диссипативные структуры вызывают удивление только в том случае, если вы не рассматриваете более общую открытую систему, где они возникают. Пригожин получил Нобелевскую премию, показав, что вдали от равновесия увеличение энтропии создает структуру и порядок, а не беспорядок, и это абиотический аналог жизни. Пригожин изучал автокаталити-

ческие системы[65], когда две конкурирующие химические реакции, протекающие с изменением цвета среды, синхронизировались между собой и создавали ритмично меняющиеся окрашенные структуры в абиотических жидкостях. Он показал, что это крайний случай водоворота в потоке, когда осциллирующие реакции вызывают изменение цвета через регулярные промежутки времени, создавая тем самым химические часы. В открытых автокаталитических системах со многими вариантами протекания процессов формирование структур не только *возможно*, но *неизбежно*, мы просто точно не знаем, какой именно будет их форма.

Многие объекты (живые и неживые) создают порядок в качестве эмерджентного — неожиданно появляющегося — свойства. Например, кристаллы — это высокоупорядоченные структуры с регулярным, повторяющимся рисунком, как на обоях. Живые клетки тоже можно считать высокоупорядоченными: липиды образуют

**[65] Примечания: 65**

Автокаталитический процесс — это процесс, в котором какой-то компонент помогает воспроизвести самого себя. Люди — автокаталитические системы в том смысле, что сами производят потомство. Химические реакции являются автокаталитическими, когда продукт реакции взаимодействует с исходными реагентами и образуется дополнительное количество этого же продукта.

клеточные мембраны, ДНК плотно упакована, а белки распределены по тем местам, где несут свою службу. Каждый орган человеческого тела функционирует только благодаря упорядоченной организации. Почти любое проявление жизни можно рассматривать как диссипативную структуру. Войны и торговые соглашения — это структуры, которые рассеивают энергию, хотя первые несут смерть и хаос, а вторые — организованность и стабильность. Растения в лесу образуют диссипативную структуру, поскольку располагают листья таким образом, чтобы захватывать побольше фотонов света, но повышают энтропию в процессе жизни и после смерти, когда становятся пищей для других организмов. Молекулы внутри растительных клеток, необходимые для захвата фотонов света, тоже упорядочены, однако сами по себе молекулы не являются живой материей. Никто ведь не скажет, что хлорофилл живой.

Если живое и неживое переходят друг в друга, то как наука отличает одно от другого? В соответствии с законами неравновесной термодинамики, различие между живой и неживой материей заключается именно в способности живых систем постоянно уходить от состояния

равновесия. И живая материя, и неживая создают упорядоченные структуры, однако только жизнь *создает новые системы*, которые могут повышать энтропию. Неживая материя создает водовороты, но живые существа строят на реке плотины, которые создают еще больше водоворотов и течений, позволяющих сплавляться на плотах.

## Хронофилы и второе начало термодинамики

Если жизнь существует, чтобы создавать новые возможности для повышения энтропии, быть может, эти вечно спящие обитатели земных глубин, хронофилы, нашли способ создавать неравновесные системы, повышающие энтропию, каких мы раньше никогда не видели?

Джозеф Валлино из Морской биологической лаборатории в Вудс-Хоуле в Массачусетсе полагает, что живые организмы распределяют повышение энтропии на более длительные периоды времени, дабы максимизировать общее увеличение энтропии за долгосрочный период[3]. Однажды он сказал мне, что это как пойти работать сразу после школы либо же сначала закончить универ-

ситет, а потом устроиться на работу. Если вы не идете в университет, то начинаете зарабатывать деньги раньше, но в долгосрочном плане вы в среднем больше зарабатываете на той работе, для получения которой нужен университетский диплом[66]. Абиотические системы берутся за работу сразу после школы, а биологические сначала идут в университет, используя деньги как замену энтропии. В своей книге “В холод” Саган и Шнайдер сделали аналогичный вывод. Они пишут, что второе начало термодинамики ничего не говорит о том, как быстро должна повышаться энтропия. Жизнь немного растягивает этот процесс, откладывая продвижение к равновесию. Она выжимает из него все что можно, “захватывая его и перенаправляя”, чтобы произвести новую жизнь и по ходу дела повысить общую энтропию.

Иными словами, смысл жизни может заключаться в том, чтобы растягивать этот процесс на очень длительные промежутки времени. А вы знаете, кто любит такие промежутки времени? Хронофилы! Люди растягивают временные

**[66] Примечания: 66**

Конечно, многие люди заработали большие деньги, не имея университетского диплома. Тут проявляется вероятностный подход Больцмана: в среднем люди с высшим образованием зарабатывают больше, но некоторые нарушают это общее правило.

интервалы, на протяжении которых могут передавать друг другу информацию, за счет написания книг, которые читаются потом многими поколениями. Вероятно, религия была мощным изобретением, заставлявшим людей чувствовать себя тесно связанными с теми, кто жил тысячелетиями ранее. Обитатели земных глубин используют принципиально другой подход, чтобы растянуть процесс повышения энтропии в широких временных рамках: просто отдельные особи живут очень долго. Это иной способ отдалить систему от состояния равновесия, нежели тот, с каким мы сталкиваемся в нашей обычной жизни. Хронофилы размазывают “сброс” энтропии, возрастающей при метаболической потере тепла, на столь большие временные масштабы, что люди не в состоянии это воспринять.

Хотя организмы, живущие тысячелетиями или дольше, кажутся нам странными, возможно, в них и нет ничего особенного. Вообще говоря, они помогают понять, *почему* существует жизнь. Обнаружение такого неизвестного нам ранее и необычного способа повышать энтропию на протяжении длительных отрезков времени подкрепляет идею, что возможность повышать энтропию как раз и служит *причиной* возникно-

вения жизни. Жизнь существует, поскольку этого требует второе начало термодинамики.

## Глава 11
## Что обитатели земных недр могут сделать для нас?

Обитатели темных земных глубин, с их странными источниками пищи и энергии, повышающие энтропию в таких временных интервалах, что нам трудно себе это представить, в значительной степени остаются для нас далекими и непонятными. И в результате может показаться, что они почти не имеют возможности напрямую влиять на нашу жизнь.

Но это не так: микробы из глубоких подповерхностных слоев биосферы влияют на нашу жизнь самыми разными способами. В частности, в планетарном масштабе они ответственны за производство кислорода, которым мы дышим. Кислород по большей части производится растениями и планктоном, однако, если бы подземные микробы не захватывали органический материал, способный реагировать с кислородом, тот просто включался бы в растительные ткани с образованием диоксида углерода и воды. Кроме того, без питательных веществ, таких как железо

и азот, перерабатываемых обитателями земных недр, фитопланктон производил бы для нас гораздо меньше кислорода. Наконец, обитатели земных глубин обладают уникальной способностью перерабатывать самые опасные отходы нашей жизнедеятельности: они дышат радиоактивным ураном, мышьяком, органическими канцерогенными веществами и другими опасными для нас соединениями, и это позволяет нам развиваться, не уничтожая самих себя.

Конечно, не все так радужно и безоблачно. Мы вовлечены в бесконечную борьбу с микробами из придонных отложений, которые растворяют корпуса кораблей, нефтяные вышки и опоры мостов. Они также преуспевают в производстве метана, который взрывается при добыче полезных ископаемых[67] и бурении нефтяных скважин, не говоря уже о том, что он относится к числу парниковых газов.

Кроме того, подземные микроорганизмы играют существенную роль в изменении климата. Возможно, в этом заключается их самая важная связь с нами, живущими на поверхности. В этой главе я расскажу о нашей научной ра-

---

**[67] Примечания: 67**
Речь идет о добыче угля. — *Прим. науч. ред.*

боте в зоне арктической вечной мерзлоты, где мы пытаемся понять, участвуют ли подземные микроорганизмы в превращении углерода из оттаивающих слоев вечной мерзлоты в парниковые газы, усугубляя климатический кризис. Далее мы посмотрим, как подземные микробы могут повлиять на технологии хранения углерода, которые разрабатываются для смягчения последствий климатических изменений. И наконец, мы обсудим одну острейшую проблему современности — глубоководную разработку морского дна: добыча ценных металлов для производства возобновляемой энергии влияет на здоровье океана. Современный способ добычи может окончательно разрушить экосистему обитателей земных недр еще до того, как нам удастся их изучить.

## Ню-Олесунн, Шпицберген, 79° северной широты

Экспедиционные работы не в последнюю очередь нравятся мне потому, что, какими бы учеными степенями ты ни обладал и каким бы умным себя ни считал, природа найдет способ уложить тебя на обе лопатки. Это учит смирению.

Я помнила об этом в марте 2021 года, когда мы с коллегами бурили вечную мерзлоту — почву, которая не оттаивает никогда, даже летом. Зоны вечной мерзлоты есть в Арктике, в Антарктике и на больших высотах и находятся под верхним активным слоем почвы, который оттаивает каждое лето. Раньше я уже работала с образцами из зон вечной мерзлоты, которые привозили для меня другие люди, но никогда не бурила сама. И насколько мне известно, никто прежде не пытался обнаружить обитателей земных недр в зоне вечной мерзлоты в Ню-Олесунне, на Шпицбергене. Так что меня ожидало еще одно приключение.

Летом 2019 года, когда оттаяли верхние активные слои почвы, я присоединилась к Татьяне Вишнивецкой из Университета Теннесси и Андрею Абрамову из Института физико-химических и биологических проблем почвоведения в России для проведения разведывательных работ. Таяние вечной мерзлоты из-за глобального потепления — процесс более сложный, чем просто превращение замерзшей почвы в жидкую грязь. Почва над вечной мерзлотой оттаивает каждое лето, это нормально. Истинная вечная мерзлота находится глубже, под активным поверхностным слоем, оставаясь в замерзшем состоянии круглый

год, и поэтому активность микробов там слабая. Нас интересовало, какое количество парниковых газов выделяется в атмосферу при таянии вечной мерзлоты в результате климатических изменений. В Ню-Олесунне активный слой достаточно толстый, около двух метров. Лежащий под ним слой вечной мерзлоты — рай для обитателей земных глубин: там нет солнечного света, нет подвижных конкурентов, но и еды почти нет, поскольку она находится в замороженном состоянии. К несчастью для нас, эта среда надежно защищена и от назойливых ученых. В отличие от субдукционных зон, здесь нет природных источников, выносящих микробов из глубин на поверхность. Выбора нет: для получения образцов приходится бурить вечную мерзлоту.

Сначала Татьяна, Андрей и я прибыли туда летом, чтобы попытаться предвосхитить возможные проблемы, которые могли ожидать нас при бурении зимой под слоем снега, например наличие камней. И действительно, мы нашли камни, много камней — достаточно, чтобы остановить даже мощный буровой инструмент. Поэтому летом мы отыскали место, где камней было меньше всего, и пометили его. А вернулись туда в марте 2021 года, после долгого карантина в Осло из-за

пандемии COVID-19, готовые к буровым работам.

К счастью, мой коллега Андрей — не только специалист по вечной мерзлоте, но и опытный бурильщик. Он использует отлично работающий буровой инструмент советских времен. Четырехтактный двигатель *Briggs & Stratton* вращает буровую головку, закрепленную на керноотборнике с металлическими зубьями. Кроме того, устройство оснащено рядом шкивов, которые оказывают на вращающийся керноотборник восходящее или нисходящее давление. Если все идет нормально, вы можете последовательно накрутить столько буровых штанг, сколько пожелаете, и это позволит вам глубже внедриться в вечную мерзлоту. Однако, что ожидаемо, в полевых реалиях все не так просто.

Сложность работы связана не только с наличием камней, но и с холодом. В процессе бурения скважина нагревается от трения, и вода в почве оттаивает. И если бур не вращать постоянно, эта вода вморозит его в землю, как палочку в мороженое. Спрашивается, почему бы не дождаться лета, когда будет теплее, и не поработать лопатами? Во-первых, хотя летом поверхность почвы теплее, более глубокие слои все равно заморожены, и проблема не исчезает. Но более

серьезное основание для проведения работ зимой заключается в том, что тащить тяжелый бур по хрупкой арктической растительности — задача не из легких. Зимой, когда появляется защитный слой снега, ученые перевозят оборудование на снегоходах и санях.

В 2021 году, когда я наконец научилась управлять снегоходом, мы на санях перевезли массивный бур, керноотборники и буровые штанги к месту бурения. Все вокруг было белым. Искрящийся белый снег шуршал под гусеницами наших машин, вдали сверкали ослепительно белые вершины, белоснежные ледники покрывали долины, а айсберги белыми пятнами рассыпались по темно-синему фьорду. Это было потрясающе. К счастью, поблизости не оказалось белых медведей — мы бы не заметили их на этом фоне.

Поначалу казалось, что все идет хорошо. Хотя камни иногда мешали, Андрей мастерски вытаскивал керн за керном, часто с бешеной силой пробиваясь прямо через крупные булыжники. Солнце светило, бур не испытывал избыточного давления, керны не примерзали к почве, и я в конце концов научилась использовать массивный ключ, чтобы откручивать головку бура и выдавливать каждую ценнейшую секцию керна.

Идеальная сцена для театрального провала.

Колонковые трубы и буровые штанги, которые присоединяют по мере углубления скважины, заканчиваются металлическими винтами, вставляющимися в головку бура. В тот день мы радостно и беззаботно продолжали бурить, как вдруг винт развалился, штанга отсоединилась и половина винта застряла глубоко в головке бура.

К счастью, нам удалось извлечь обломок, выбив его замерзшей отверткой и замерзшим молотком. Остаток дня мы пытались понять, что произошло. Создавалось впечатление, что металл разрушился сам, даже без особенной нагрузки. Вероятно, мороз был слишком сильным — и металл не выдержал. Мы целыми днями находились на улице при температуре –28 °C, что могло ослабить металл. Обычно бурильные головки выдерживают экстремальный холод, но нам, похоже, достался не самый качественный сплав. Нам ничего не оставалось, как зажевать замороженные бутерброды и попробовать еще раз.

Мы взяли другую колонковую трубу. Она извлекла один керн и сломалась. Мы взяли третью. И она сломалась. Потом еще и еще. Трубы заканчивались. Мы подобрали одну буровую штангу, которая извлекла керн и не сломалась. Но нам

все еще нужна была колонковая труба с функциональным винтом. И тогда моя аспирантка Кейти Сайпс связалась с нами по радио из лаборатории и сообщила: “Не знаю, поможет ли это, но я умею варить”. Сварка помогла решить проблему. Наша буровая установка снова работала.

Следующий день мы начали с надеждой на успех в новом месте — на красивом суровом полуострове Квадехукен, находящемся от Ню-Олесунна примерно в получасе езды на снегоходе. Здесь нам удалось пробурить коренную породу, пройдя злосчастную отметку в два метра, за которой начиналась вечная мерзлота. Успех! Когда мы прошли отметку в два метра, я заплясала от радости. В этом была цель нашей экспедиции, и мы ее достигли. Однако мы бурили в неглубоком соленом озере, и керны выходили сырые, что страшно разочаровывает, когда хочешь отобрать замороженный материал. Но мне сказали, что технически это все равно образцы вечной мерзлоты, поскольку они находятся при температуре ниже температуры замерзания воды. Ну, что поделать, не я устанавливаю правила.

Но для собственного удовлетворения нам хотелось получить образцы льда, твердые как камень, которые выглядели бы как вечная мерзлота на-

шей мечты. И поэтому мы вернулись поближе к башне Амундсена — Нобиле, где исследования климатических изменений проводятся под руководством Национального исследовательского совета Италии. Здесь колонковые трубы и буровые штанги не ломались достаточно долго, так что мы сумели получить желаемый результат — слой льда, сверкавшего как алмаз, с твердой замерзшей почвой под ним. Уровень льда находился точно на глубине двух метров, где и должен был находиться в соответствии с предыдущими данными. Невзирая на все трудности и благодаря находчивости и бодрости духа членов нашего коллектива, а также замечательной поддержке исследований в Ню-Олесунне, мы вернулись домой с морозильной камерой, полной образцов.

Существует ли жизнь в вечной мерзлоте? Когда вода превращается в лед, образуются крохотные кристаллы, которые убивают бактерий, проделывая в клетках дыры. Мы пользуемся этим антимикробным средством, когда замораживаем продукты в домашних морозилках. Но вдруг микробы из вечной мерзлоты немного отличаются от тех, что портят свиную рульку? Проблема еще серьезней, чем появление крохотных ледяных кинжалов, заключается в том, что для жизни

нужна жидкая вода — всем без исключения, даже обитателям земных недр. Поэтому может показаться, что вечная мерзлота — смертельная ловушка для микробов. Однако важно понимать, что даже в замерзшей как камень почве вечной мерзлоты все еще есть очень небольшое количество жидкой воды. Соленая вода замерзает при гораздо более низкой температуре, чем пресная. Вот почему мы посыпаем тротуары солью перед снегопадом. Когда почва замерзает, чистая вода превращается в кристаллы льда, вытесняя всю соль. Но оставшаяся соленая вода может находиться в жидкой форме всю зиму или столько, сколько продержится вечная мерзлота. А там, где есть жидкая вода, в ней почти всегда кто-нибудь живет — по крайней мере, на Земле.

В настоящее время у нас уже есть доказательства присутствия микроорганизмов в вечной мерзлоте, даже в самых древних ее зонах, как в Сибири, где почва остается замерзшей уже как минимум 1,1 миллиона лет. И ДНК этих микробов остается в целости, а не разваливается на куски, как части разлагающегося тела. ДНК находится внутри клеток, значит, они тоже должны быть целыми, иначе бы все из них вытекло[1]. По-видимому, эти клетки даже обладают

протон-движущей силой — важнейшей характеристикой жизни в нашем понимании, как я объясняла в предыдущих главах. Строение этих микробов не позволяет предположить, что они просто попали сюда и умерли, поскольку у них есть гены, обеспечивающие им выживание в тоненьких протоках рассола внутри вечной мерзлоты[2]. Меня восхищают организмы, способные жить в микроскопическом пространстве соленой воды от сотен до миллионов лет, — это еще одни кандидаты в члены клуба хронофилов.

Как и для многих обитателей нашей планеты, условия жизни этих микробов тоже быстро меняются. В 1998 году Юлия Бойке из Института Альфреда Вегенера в Германии организовала неподалеку от Ню-Олесунна станцию Байелва, благодаря которой у нас есть набор данных о высоте снежного покрова, температуре и влажности в зоне вечной мерзлоты за один из самых продолжительных сроков. Результаты Бойке и других ученых со всего мира показывают, что в условиях климатических изменений вечная мерзлота разогревается и тает. Изменения климата, вызванные накоплением парниковых газов в атмосфере, сказывались бы гораздо сильнее, если бы не океанический фитопланктон, который

безостановочно впитывает все это наше безобразие[68]. В конечном итоге весь избыточный углерод просочится в подповерхностный слой, где в дело вступят хемолитоавтотрофы. Но это может произойти еще только через миллионы или сотни миллионов лет. А вечная мерзлота изменяется прямо на наших глазах.

Значительная часть углерода на планете удерживается в вечной мерзлоте, и когда она тает, метаболическая активность подземных микробов может усиливаться, в результате чего углерод из почвы будет превращаться в метан и углекислый газ, а эти молекулы способствуют глобальному потеплению. Почти каждое лето оттаивают новые участки вечной мерзлоты, поэтому каждый год просыпаются новые слои микробов. И мы пока еще мало о них знаем, чтобы понимать, что они при этом делают. В настоящее время около 1600 миллиардов тонн углерода заключено в постоянно замерзшей почве в Сибири, Гренландии, Канаде, Антарктике, на Аляске, в высокогорной местности на более низких широтах и даже под водой[3]. Это количество примерно вдвое превы-

**[68] Примечания: 68**

Конечно, они помогают нам непреднамеренно. Но без водорослей и цианобактерий в Мировом океане концентрация диоксида углерода была бы ГОРАЗДО выше, чем сейчас.

шает содержание углерода в атмосфере, так что превращение всего этого углерода в газ привело бы к катастрофическим последствиям[4].

К счастью, система гораздо сложнее. Последствия таяния вечной мерзлоты плохо предсказуемы, как и последствия многих других аспектов климатических изменений. Возможные сценарии колеблются от очень неприятных (весь углерод из почвы превратится в метан, мощно подстегнув дальнейшее потепление) до нейтральных (метан и диоксид углерода будут выделяться в некотором количестве, но потребляющие их микробы сумеют держать под контролем их выброс в атмосферу) и даже радужных (таяние вечной мерзлоты приведет к снижению уровня диоксида углерода в атмосфере за счет усиления активности хемолитоавтотрофов или стимуляции роста растений). Возможно, нам не придется испытать на себе эффект неконтролируемой положительной обратной связи между вечной мерзлотой и атмосферой. Скорее всего, единого ответа на вопрос о последствиях не существует, и последствия будут разными в зависимости от широты, высоты над уровнем моря, количества осадков и годовых колебаний температуры. И мы не получим ответ, даже если будем упорно

размышлять над проблемой или полагаться исключительно на лабораторные эксперименты. Нам нужно продолжать анализировать то, что происходит в реальном мире.

Большинство современных сценариев глобального изменения климата вообще не учитывают влияние микробов, живущих в вечной мерзлоте. Дело не в том, что создатели моделей не слышали о микроорганизмах из вечной мерзлоты или считают, что они неважны. Просто модели глобальных климатических изменений пока еще не могут учитывать такие нюансы. Когда я нахожусь в Арктике под порывами ветра при температуре –50 °C, пробивая камни и разрывая хлипкие бурильные трубы, я накапливаю знания — не только о том, как обитатели земных недр выживают в таких суровых условиях, но и о том, могут ли они каким-то образом смягчить последствия климатических изменений или, напротив, поспособствуют нашей гибели. Когда модели будут готовы учитывать данные об обитателях земных глубин, мы тоже должны быть готовы предоставить им эти данные.

Микроорганизмы из вечной мерзлоты — не единственные обитатели земных недр, которые могут сыграть роль в современном климати-

ческом кризисе. Нашими спасителями могут стать микробы из глубоких водоносных слоев и из небольших трещин в горных породах. Это не должно удивлять: значительная часть избыточных парниковых газов поступает в атмосферу от сжигания ископаемого топлива из земных недр. Поэтому одно из очевидных решений — заставить эти вредоносные газы вернуться туда, откуда они взялись, с помощью процесса, называемого “улавливание и хранение углерода” (*carbon capture and storage*).

Главная загвоздка в том, что углерод вышел из-под земли в виде нефти и метана, а возвращаем мы его обратно в виде диоксида углерода. К счастью, многие типы горных пород готовы впитать в себя большие объемы углекислого газа, и некоторые страны, такие как Исландия, добиваются в этом деле значительных успехов, что раньше казалось невероятным[5].

Для успешного улавливания и хранения углерод нужно удерживать глубоко под землей на протяжении тысячелетий или дольше, так чтобы он не мог попадать в атмосферу. Если бы недра Земли походили на пластиковый контейнер, мы бы просто закачивали туда углерод, садились и наблюдали, как стабилизируется температура

атмосферы, а ледники возвращаются туда, где им полагается быть. Однако недра Земли — не полый резервуар. Кроме химических соединений в составе горных пород, которые способны взаимодействовать с закачанным диоксидом углерода, в каждой трещине и расселине живут находчивые подземные микроорганизмы. Эти микробы из земных глубин могут захватывать дополнительный углерод, поступающий в процессе улавливания и хранения, и помогать нам превращать его в твердые породы, что надолго перекроет ему доступ в атмосферу. Но они могут превратить этот углерод в породу слишком быстро, пока мы еще закачиваем его вниз, что затормозит процесс. Или станут использовать выделяющийся из горных пород водород и соединять его с диоксидом углерода с образованием метана, который будет улетучиваться и усугублять глобальное потепление, поскольку метан — более мощный парниковый газ, чем диоксид углерода. Пока мы попросту не знаем, что подземные микробы будут делать с углеродом, который мы закачиваем в недра Земли в попытках справиться с климатическими изменениями.

По некоторым предварительным данным, обитатели земных глубин не будут нашими

союзниками в этом предприятии. Отдельные эксперименты с улавливанием и хранением углерода подтверждают, что подземные микроорганизмы начинают производить метан[6]. Однако другие исследования показывают, что в природных условиях обитатели земных недр участвуют в связывании диоксида углерода в виде карбонатных пород или потребляют его, примерно как это делают леса на поверхности Земли[7]. Такие микробы могли бы с радостью переварить весь лишний углерод. Если это так, нам первым делом нужно найти лучший способ улавливать углерод и перенаправлять им, а затем необходимо понять, в какой среде обитают самые правильные подземные микроорганизмы, чтобы вся затея прошла успешно. Пока мы только начинаем осознавать, что обитатели земных недр делают с подземными хранилищами углерода, но я все же надеюсь, что процесс улавливания и хранения в конечном итоге поможет нам ослабить влияние климатических изменений.

## Глубоководная добыча

Однако нам нужно не только вернуть углерод обратно в землю, но и остановить его извлечение

из недр. Мы можем получать энергию от солнца, ветра, приливов, температурных градиентов, плотин, растений и водорослей. Но чтобы возобновляемые источники энергии заменили ископаемое топливо, нужны гибкие условия хранения и транспортировки, для гибкости нужны хорошие аккумуляторы, а для хороших аккумуляторов — металлы. Как я уже упоминала, обитатели земных недр используют разнообразные металлы, многие из которых имеют коммерческое значение. Подземные микроорганизмы дышат этими металлами, в результате меняются их минеральные формы, а от них зависит, остаются ли металлы в почве и породах или вымываются оттуда. Кроме дыхания, обитатели земных глубин нуждаются в металлах для функционирования ферментов. Ферменты — моторы всех клеток, как микробных, так и человеческих, они осуществляют все без исключения клеточные функции, в том числе питание, дыхание, рост, производство токсичных продуктов и передвижение. Мы, люди, живем в богатой кислородом атмосфере, и поэтому наши ферменты чаще всего нуждаются в железе, магнии и небольшом количестве меди. Однако ферменты обитателей земных недр настроены на более восстановленную среду, и

им нужен более широкий спектр металлов. Им, как и нам, требуются железо, магний и медь, но еще никель, молибден, селен, вольфрам, неодим и так далее.

Сейчас все металлы, которые мы используем, чтобы изготавливать батареи для питания наших персональных электронных устройств (а также, в числе прочего, больших литиевых аккумуляторов для транспортных средств и мощных магнитов для ветрогенераторов), мы добываем из земных недр. И с самого зарождения горного дела мы пользуемся услугами микроорганизмов. Например, при разработке медно-сульфидных месторождений для добычи меди руду складывают биокучами, где микробы медленно, но неустанно высвобождают атомы меди из прочных связей с сульфидом и окисляют их. Конечно же, микробы не знают, что нам нужна медь. Они просто дышат, а перенос электронов от меди к кислороду[69] характеризуется большим отрицательным значением $\Delta G$. В результате медь выделяется в воду, которую можно собрать, дополнительно очистить и использовать для изготовления

**[69] Примечания: 69**

По большей части микроорганизмы переносят электроны со связанных с медью серы и железа на кислород. При этом высвобождается медь. — *Прим. науч. ред.*

водопроводных труб и электронных устройств. Отчасти возобновляемость минеральных ресурсов на Земле зависит от того, способны ли микробы концентрировать минеральные компоненты в виде полезных запасов. К сожалению, присутствие микробов может усиливать загрязнение окружающей среды при добыче руд. После извлечения ценных металлов в шахтах остаются отходы с высоким содержанием серы и железа, называемые хвостами. Это шведский стол для микробов, превращающих оставшуюся смесь в кислоту, которая попадает в поверхностные и грунтовые воды[70], уничтожает дикую природу и загрязняет питьевую воду.

Океанографы знают, что металлы можно найти не только в горах или залежах руды в Австралии. Различные металлы встречаются на дне океана в виде крупных гранул размером с грейпфрут или в виде богатых металлами отложений у гидротермальных источников. Во время одной из первых научных океанографических экспедиций на судне “Челленджер” со дна моря было поднято несколько округлых черных камней.

**[70] Примечания: 70**

Такие воды называют “кислый шахтный дренаж”. Кислая среда дренажных вод растворяет твердые остатки руд, и металлы оказываются в растворе. — *Прим. науч. ред.*

Эти камни, называемые марганцевыми или полиметаллическими конкрециями, образуются на любой поверхности (раковине моллюска или зубе акулы), пригодной для осаждения металла, а это запускает цепную реакцию, в ходе которой осадок катализирует отложение все большего количества металла из морской воды. Со временем возникает круглое полиметаллическое образование с высокой концентрацией марганца, железа, кобальта, меди и никеля. Такое накопление металлов происходит чрезвычайно медленно. Формирование одного слоя металла толщиной со слой лака на ногтях занимает около миллиона лет, так что эти полиметаллические конкреции, как и ископаемое топливо, не являются возобновляемым ресурсом[8]. Если мы соберем с морского дна все конкреции, появления новых нам придется ждать дольше, чем существует человечество.

Десятилетиями исследователи и предприниматели пытались понять, можно ли заработать на добыче конкреций. До недавнего времени их не добывали, поскольку проводить работы на дне океана дорого и сложно. Во-первых, стоянка гигантских судов в океане стоит дорого. Во-вторых, еще дороже обойдется разработка новых технологий для подъема материала со дна и для

его переработки. И во время каждого шторма или бурных волн придется поднимать со дна все оборудование, останавливать процесс и расходовать топливо, чтобы укрыться от непогоды. Однако в последние годы ценность таких металлов продолжала расти, что радикально изменило экономические расчеты в области глубоководной добычи, и теперь эта сфера деятельности быстро развивается.

Каждая страна с выходом к морю имеет исключительную экономическую зону шириной около 370 километров, где контролирует добычу полезных ископаемых и отлов рыбы. Однако 54 % океана находятся слишком далеко от берега и никому не принадлежат. И поэтому теоретически судно любой страны может сбросить драгу в середине океана и забрать, что пожелает, не нарушая никаких государственных границ и законов. Для решения этой проблемы Конвенция ООН по морскому праву в 1982 году учредила Международный орган по морскому дну для “организации и контроля всей деятельности, связанной с минеральными ресурсами… на благо всего человечества”[9]. В этом органе состоят 168 стран (включая Европейский союз, но не Соединенные Штаты Америки), а штаб-квартира

находится в Кингстоне на Ямайке. Плохо это или хорошо, но участок Тихого океана, называемый зоной Кларион-Клиппертон, было решено сдать в аренду горнодобывающим компаниям, и теперь там активно ведется разработка дна.

Меня не вдохновляет идея развития глубоководной добычи. Я люблю океанские глубины, поскольку здесь проходит завораживающая граница между загадочным и достижимым. Это одно из наименее изученных мест на планете, и мы продолжаем исследовать его и раскрывать его тайны. Но теперь разные компании и государственные предприятия раскапывают морское дно, чтобы понять, можно ли его разрабатывать и начинать добычу на более обширной площади. Они делают это не ради получения знаний, а ради личной выгоды. Поверьте, я внимательно за всем этим слежу.

Вот как будет выглядеть добыча полиметаллических конкреций, если она станет крупномасштабным проектом. Корабль будет опускать на дно драгу размером с пару восемнадцатиколесных грузовиков. Драга будет там самостоятельно передвигаться, собирая, что попадется, с верхнего слоя дна сантиметров в пятнадцать и закачивая все это в трубу, доставляющую материал

на корабль. На корабле конкреции отделят от осадочных отложений, которые сбросят обратно за борт. Чтобы предприятие стало выгодным, необходимо переработать много тонн материала с морского дна и получить много тонн полиметаллических конкреций. Это приведет к выбросу гигантского количества “мусорных” отложений, и, если весь этот ил распределится по поверхности океана, верхние слои воды лишатся света, что уничтожит планктон и погубит морских животных. А нам нужен здоровый фитопланктон, который удерживает парниковые газы и производит кислород и пищу, поддерживая богатство жизни в океанах, что обеспечивает нам в том числе рыбную ловлю.

Нельзя допустить помутнения верхних слоев океанской воды — это может стать катастрофой для планеты и человечества. По этой причине добывающие компании предложили закачивать отходы обратно в глубины океана. Перекачка всех оставшихся хвостов на дно снизит экономическую прибыль, но ведь прибыли снизятся и в том случае, если океан будет полон телами мертвых дельфинов.

Однако на настоящий момент нет общего понимания, на какой глубине следует сбрасывать

ненужные осадочные отложения. Каждый дополнительный сантиметр стоит дополнительных затрат, поэтому добывающие компании финансово заинтересованы в том, чтобы сбрасывать отходы в самых мелководных участках океана из доступных. Кроме того, даже если отложения вернутся на дно, все равно возникнет шлейф мути. Я была на морском дне и могу уверенно сказать, что оно кишит жизнью. И полагаю, что тамошние экзотические животные предпочли бы не задыхаться в облаках грязи.

Глубоководная добыча влечет за собой и другие неблагоприятные последствия для окружающей среды. Во-первых, сбор конкреций нарушит состояние придонных экосистем. В мире, где преобладают вода, песок и ил, твердая поверхность конкреций — ценнейший ресурс для морских обитателей. Во-вторых, в верхней части придонных отложений происходит много важных биологических и химических процессов. Многие вещества, которые в итоге всплывают на поверхность океана, где стимулируют фотосинтез, питают популяции промысловых рыб и регулируют газовый состав атмосферы, выделяются из верхнего слоя отложений, а при глубоководной добыче этот процесс будет нарушен. В-третьих,

даже если мы найдем хорошее решение для доставки отходов обратно на дно (что не очевидно), драгирование дна неизбежно приведет к образованию мути, которая может распространиться далеко и затронуть большие пространства океана.

И каждое из пагубных последствий для окружающей среды усиливается пропорционально объему добычи. Чтобы вы понимали, уже заключенные контракты на добычу конкреций затрагивают как минимум вчетверо более обширные поверхности океанского дна, чем те, на которых осуществляется добыча нефти и газа, и как минимум вдвое большее пространство, чем открыто для донного тралового лова рыбы. Зона Кларион-Клиппертон, где в настоящее время ведется добыча “в малом масштабе”, по площади сравнима с половиной США. Территория суши, где сейчас ведется добыча полезных ископаемых, целиком составляет лишь около 3 % от того, что может быть отдано под глубоководную добычу, если компании разовьют свою деятельность до полного масштаба. И опасности будут множиться, что окажет сильное негативное влияние на состояние глубоководных зон океана.

Полиметаллические конкреции — не един-

ственная цель промышленной глубоководной добычи полезных ископаемых. Полиметаллические сульфиды у гидротермальных источников и кобальтоносные железомарганцевые корки тоже привлекают пристальное внимание предпринимателей. Полиметаллические сульфиды образуются там, где горячие и обогащенные металлами жидкости из-под поверхности дна устремляются, как из пожарного шланга, в холодную и богатую кислородом морскую воду, в результате чего происходит осаждение металлов. Напротив, кобальтоносные железомарганцевые корки возникают на участках морского дна, где океанские течения смыли все осадочные породы. Течения обнажают базальт, образовавшийся при спрединге срединно-океанических хребтов, и там из морской воды осаждаются такие металлы, как кобальт, никель, платина, марганец, таллий и теллур[10]. Структуры обоих типов — хорошие твердые поверхности для глубоководных мидий и других моллюсков, а также источник металлов для морских микробов. Эти структуры, как и полиметаллические конкреции, тихонько функционируют на дне моря, поддерживая в равновесии весь Мировой океан. Мне кажется, нам следует постараться, чтобы бездумно их не

уничтожить.

Негативное влияние глубоководной добычи усугубляется еще и тем, что придонный слой океана еще не исследован полностью. Многие геологические, химические, физические и биологические процессы, происходящие сейчас в глубинах океана, — те же, что происходят уже миллионы или даже миллиарды лет, — все еще не изучены. Я уверена в этом, поскольку мы постоянно находим на дне океана нечто новое. Как я рассказывала, недавно обнаруженные экосистемы помогают понять раннюю историю жизни на Земле, но еще они могут открыть для нас гены или процессы, которые, возможно, оказались бы полезными для медицинских целей или для сглаживания последствий климатических изменений. Но мы никогда не узнаем об их потенциальной пользе, если уничтожим всю экосистему.

Кажется, решение очевидно? Требуется просто запретить глубоководную добычу. Не допустим разграбления общественных ресурсов! Однако все не так просто. Нам нужны мобильные телефоны, ведь далеко позади осталась эпоха, когда телефоны висели на стене, и нам не вернуться обратно. Еще важнее, что нам нужны электромо-

били и ветровые турбины, поскольку мы хотим в большей степени опираться на возобновляемые источники энергии, а для этих технологий требуются металлы.

Думаю, есть другие решения. У нас на свалках больше металлов, чем мы сейчас используем. Если мы научимся лучше перерабатывать электронные отходы, снизится потребность в добыче. Однако перерабатывающая промышленность такого рода пока не достигла необходимого масштаба. Мы должны развивать подобные технологии или уменьшить свою зависимость от редких металлов. Например, уже существуют прототипы литий-железо-фосфатных аккумуляторов. Не исключено, что решение можно найти и под поверхностью Земли. Один из важнейших стимулов для выпуска аккумуляторов — крупномасштабное запасание энергии, периодически получаемой из возобновляемых источников. Превращение этой энергии в энергетически богатый водород и его закачивание под землю могло бы стать чистым, недорогим и эффективным методом хранения энергии, не требующим истощения минеральных ресурсов планеты[11]. Это многообещающая технология, и, хотя она не решит проблему добычи лития для производства новых

мобильных телефонов, она позволит снизить потребность в крупномасштабном, промышленном хранении энергии, получаемой от солнца или ветра. Конечно же, у обитателей земных недр может быть свое мнение насчет хранения водорода, как и насчет хранения диоксида углерода. И поэтому для разработки этой новой технологии нужны исследователи, разбирающиеся в специфике подземных микробов.

Глубоководная добыча быстро продвигается вперед, плохо это или хорошо. Бет Оркатт из Океанологической лаборатории Бигелоу, возглавляющая программу "Ускоритель исследований биосферы океанической земной коры", которая финансируется Национальным научным фондом США, недавно в разговоре со мной заметила, что одним из способов защиты этих чувствительных экосистем могло бы стать сопротивление потребителей: "Если общество будет настаивать на том, чтобы запретить использование в цикле производства и сбыта тех металлов, что получены неэкологичным способом глубоководной добычи, компании, хотелось бы надеяться, прислушаются. Такие крупные производители, как BMW, *Google* и *Samsung*, уже подписали мораторий на использование любых металлов, полученных за

счет глубоководной добычи, пока этот процесс не станет экологически устойчивым". Кроме того, не за горами введение сертификации ответственной добычи (по аналогии с сертификацией о неиспользовании детского труда), что тоже может стимулировать переход к экологически безопасным способам добычи.

Готова поспорить, что, учитывая характер законов о территориальных правах на разработку океанского дна, некоторые страны выберут неэкологичную технологию добычи. Пока я пишу эти строки, Норвегия, Япония и Острова Кука передали подрядчикам свои права на исключительную экономическую зону для проведения разведывательных работ. Папуа — Новая Гвинея поначалу намеревалась проводить добычу в своей исключительной экономической зоне, однако компания *Nautilus*[71] вышла из проекта, сочтя его экономически невыгодным, что привело к большим финансовым потерям для страны.

В чем же должно заключаться разумное международное регулирование? Это еще предстоит определить. Добыча полезных ископаемых на

**[71] Примечания: 71**

Теперь компания называется *Deep-Sea Mining Finance Limited*, и некоторые ее члены входят в состав *The Metals Company*, ведущей добычу в зоне Кларион-Клиппертон.

протяжении всей истории человечества оставляла за собой мрачный след, поскольку прибыль концентрировалась в руках нескольких человек, а окружающая среда разрушалась для всех. Глубоководная добыча может уничтожить минеральные башни, выстроенные микробами в ходе химических реакций, а также погубить виды животных, обитающих вблизи гидротермальных источников. Она может разрушить места обитания трепангов, крабов, креветок, рыб, осьминогов, актиний и крохотных ракообразных, пробирающихся по дну океана, на многокилометровых расстояниях.

У меня нет готового ответа на вопрос о глубоководной добыче, но я совершенно точно знаю, что эта промышленная деятельность в своей теперешней форме вредит здоровью океана. Если безопасная практика глубоководной добычи все-таки будет разработана, ее поддержание потребует строгих мер регулирования, надзора и контроля.

# заключение
# Наше (возможное) будущее

Раз обитатели земных недр могут так много рассказать о прошлом, не способны ли они дать и некоторые указания на будущее? Давайте немного порассуждаем, каким будет мир лет так через тысячу. Во-первых, мы точно знаем, что будут делать хронофилы: мало что. Через тысячу лет большинство индивидуальных клеток будут сидеть там же, где мы находим их сегодня, и делать ровно то же самое, что они делают сегодня. Приятно сознавать, что их жизнь так стабильна, в то время как наша постоянно меняется.

Я считаю, что через тысячу лет у нас уже будет полный список всех основных форм жизни на Земле — список, который мы начали составлять, по сути, лишь несколько десятилетий назад благодаря новым технологиям, появившимся после первой революции в исследованиях ДНК. Через тысячу лет у нас будет исчерпывающий перечень всех форм жизни с описанием их функций и эволюционной истории. Мы заполним все пробелы между гипотетическими химическими

реакциями, которые поддерживают жизнь, и формами жизни, которые их используют. Мы узнаем, сколько живой биомассы образуется в процессах хемолитоавтотрофии, и поймем, в какой степени все формы жизни на Земле от них зависят. Студенты университетов, изучающие науки о Земле, обязательно должны будут изучать еще и биологию, поскольку всем станет ясно, что биология — важнейший элемент для понимания геологии. Войны останутся в прошлом, поскольку мы поймем, что их единственное термодинамическое назначение — развивать инновации за счет разрушения устойчивых диссипативных структур, а этой цели можно достичь и гораздо менее жестокими методами. Вероятно, это лишь фантазия, но можно ведь и помечтать.

Если глубоководная добыча полезных ископаемых будет развиваться, она, скорее всего, оставит рубец в виде измененного расположения микроорганизмов в морских отложениях. Если это дойдет до общественного сознания, человечеству, возможно, удастся избежать худшего сценария. Предсказать будущее можно на основании законов неравновесной термодинамики. Одно из главных свойств жизни заключается в ее способности растягивать повышение энтропии на

длительные промежутки времени, обеспечивая долгосрочную устойчивость процессов. Разрушение сред обитания ради добычи металлов, которые в конечном итоге попадут на свалку, не соответствует законам функционирования жизни. Скорее это абиотический сценарий, как всепоглощающий пожар. Живые организмы изобретают более творческие способы поиска металлов, и применение этих способов позволило бы нам сдерживать повышение энтропии на протяжении длительного времени.

Существующие сегодня методы улавливания углерода лучше работают при высоких значениях pH, поэтому недавно обнаруженные обитатели земных глубин, адаптированные к жизни при высоком pH, возможно, подарят нам фермент, который мы будем использовать для более эффективного связывания диоксида углерода из атмосферы. Вероятно, мы узнаем о жизни подземных организмов достаточно, чтобы понять, какие геологические пространства лучше подходят для хранения углерода, и тогда применим новые технологии для превращения многих и многих тонн углерода в такую форму, которая легко удерживается в подземном пространстве, что позволит стабилизировать климат.

Я представляю себе женщину, живущую через тысячу лет, — некую версию меня самой — и воображаю, как она будет писать книгу, чтобы поделиться с землянами своими знаниями о *внеземных* существах. Она будет объяснять, что мы наконец начинаем понимать этих инопланетных жителей, и будет описывать планеты, где мы их обнаружили, а также наши сходства и различия.

Судя по всему, поверхность большинства планет Солнечной системы и их спутников лишена жизни, так что, по моему мнению, с наибольшей вероятностью жизнь можно найти под поверхностью планет. В частности, Марс периодически выпускает в свою атмосферу небольшое количество метана. Быть может, под поверхностью Марса живет, растет и умирает сложная экосистема организмов, но выброс метана — единственное доказательство их существования, которое мы видели до сих пор.

Эта женщина из будущего, возможно, станет писать и о жизни под поверхностью Энцелада, спутника Сатурна, или Европы, спутника Юпитера. Оба покрыты льдом, но подо льдом находятся океаны жидкой воды, где вполне может прятаться жизнь[1]. Кажется, будто жизнь на маленьком спутнике, полностью объятом льдом, должна

быть совершенно непохожей на жизнь у нас на Земле. Однако и Земля не всегда была зелено-голубым шаром, как сегодня. Миллионы лет наша планета была скована льдом и очень походила на современную Европу. Вообще, Земля неоднократно превращалась в “снежок”, однако жизнь при этом не останавливалась[2]. Более того, на примере обитателей земных глубин становится очевидно, что жизнь не обязательно должна иметь прямой доступ к солнечному свету. Внеземная жизнь вполне может счастливо протекать под океанами небесных тел — таким же образом, как жизнь “внутриземных” существ.

Гипотетическая женщина-ученый из будущего также опишет экспедиции, предпринятые для изучения внеземных организмов, когда ей придется несколько лет прожить на Европе, прежде чем она вернется на Землю. Она расскажет, что чувствовала, стоя на ледяной поверхности Европы и наблюдая за гигантским шаром Юпитера, перекрывающим чуть ли не всю линию горизонта. Признается, как уставала, увлекаясь работой и забывая поспать больше одного раза в сутки, хотя сутки на Европе длятся в три с половиной раза дольше, чем на Земле.

Быть может, в воде, вырывающейся на поверх-

ность Европы каждый раз, когда эта женщина и ее коллеги пробивают лед, найдут множество живых организмов. Там могут оказаться самые разные виды инопланетных одноклеточных существ, но, кто знает, может, еще и крохотные инопланетные существа, похожие на животных. Я думаю, эта жизнь будет иметь клеточную основу, поскольку живым организмам необходимо отделять свое внутреннее содержимое от внешней среды, но могу и ошибаться. Возможно, в этих клетках будет ДНК или РНК, а возможно, и нет. Если нет, то, вернувшись на Землю, ученые должны будут разработать новые методы для обнаружения и описания информационных молекул, используемых обитателями Европы. Если выяснится, что у них совсем другие информационные молекулы, чем ДНК и РНК, это станет первым доказательством множественного происхождения жизни во Вселенной.

Может оказаться, что внеземная жизнь родственна земной, но роднит их не общность каких-то конкретных биохимических реакций, а термодинамические свойства систем, стремящихся уйти от равновесия. И это знание подкрепит уверенность людей в том, что жизнь существует на (или *в*) миллионах других планет,

вращающихся вокруг звезд по всей Вселенной. Ведь если жизнь возникла дважды в нашей маленькой Солнечной системе, то должно существовать еще много других солнечных систем, где это тоже произошло. Сравнивая жизнь на Европе и на Земле, ученые смогут еще точнее определить термодинамические границы жизни. Возможно, они поймут, что обитатели земных недр, о которых будет известно уже тысячу лет, дают лишь ограниченное представление о том, какой бывает жизнь. И обнаружение живых организмов на Европе покажет ученым будущего, что жизнь существует в таких формах, о каких мы и не подозревали, даже с учетом расширенных знаний, полученных благодаря изучению обитателей земных глубин.

## Командная работа и воплощение мечты

На нашем пути от сегодняшнего дня к этому отдаленному будущему наверняка возникнет множество препятствий. Несколько недель назад я вновь побывала на том далеком аргентинском плато Ла-Пуна и опять хватала ртом воздух, отбирая образцы из горячих источников на высоте более четырех тысяч метров над уровнем моря. Чтобы добраться до одного из мест, нужно было пересечь редко посещаемый высокогорный перевал, но дорога оказалась перекрыта из-за оползней. В соседней деревушке мы с коллегами узнали, что вроде бы кому-то удалось добраться туда на машине с двумя ведущими колесами. И мы решили, что на наших полноприводных грузовиках у нас есть шанс прорваться. По дороге к источнику мы преодолели отметку в 4895 метров. Извилистую и грязную дорогу окружали зубчатые горы, и я радовалась, что не веду машину, а просто любуюсь удивительно зелеными горными склонами. Это были единственные невулканические горы, которые мы видели во время

путешествия. Они символизировали нечто еще более мощное, чем вулканы, ибо возникли при сжатии континентальной плиты погружавшейся под нее океанической плитой. На этих горах не было видно никаких следов человеческой деятельности, лишь две ламы паслись у подножия.

Мы с легкостью нашли свой источник, поскольку он расположен на вершине гигантской насыпи из карбонатов и оксидов железа, выпавших в осадок из вытекающей жидкости. Отобрали образцы воды, зная, что это чистый материал почти без следов антропогенного влияния. А потом с удовольствием умяли изумительный мясной пирог, раздобытый моим коллегой в маленькой деревушке, где мы останавливались на ночь, и полюбовались суровым пустынным пейзажем и невероятно голубым небом.

А затем мы продолжили путь, спеша покинуть горы и добраться до следующего участка. Но через несколько сотен метров поняли, почему дорогу перекрыли. Она была полностью завалена обломками камней, оставшихся после недавнего наводнения. Не сговариваясь и не колеблясь ни секунды, все одиннадцать участников экспедиции вылезли из грузовиков и начали перетаскивать камни. Кто-то исследовал

рельеф дороги, чтобы проложить путь для колес. Каждый раз, когда звучала команда “Насыпьте щебня перед этим булыжником” или “Завалите эту канаву”, сыпался град камней. Мы постоянно двигались, как колония муравьев, поддерживая друг друга без лишних слов. Когда путь показался достаточно гладким, мы отошли в сторону, чтобы посмотреть, как проедет первая машина. В одном месте из-под днища донесся неприятный скрежет и грузовик подзастрял, но в конце концов проехал! Мы принялись выравнивать проблемное место для следующего грузовика. В итоге все три машины сдюжили, не повредив ни шин, ни тормозов. Нам удалось восстановить дорогу при помощи собственных мышц, мозгов и в буквальном смысле тонн камней. Когда я вновь запрыгнула в грузовик, измученная и вся в поту и пыли, я чувствовала себя и свою команду всемогущими. Моторы взревели, и мы понеслись по изумительным горным ландшафтам.

Однако праздник продлился недолго. Через пять минут мы резко затормозили, чтобы не угодить в только что образовавшуюся размоину. На этот раз мы уже были профессионалами по перетаскиванию камней и действовали не как отдельные люди, а как единый организм. Мы вы-

полнили работу, забрались обратно в грузовики и, как вы догадываетесь, почти тут же натолкнулись на следующую размоину. Не успевали мы ликвидировать одну, как незамедлительно натыкались на следующую. Я столько времени провела в дорожной пыли, перетаскивая камни, что чувствовала себя просто еще одним булыжником в общем пейзаже. Однако наша волшебная групповая сила продолжала действовать.

Пятая размоина была другого рода. Потоки воды прорыли поперек дороги канаву метровой глубины. Мы запустили дрон, чтобы увидеть состояние дороги с другой стороны от оврага. Она казалась прочной. Если мы преодолеем эту последнюю преграду, то доберемся домой. Но чтобы поправить дорогу, нужно было срыть большой кусок насыпи и заделать брешь, а для этого требовался экскаватор. Я направилась к насыпи с упрямством полярной крачки, не желая признавать поражение[72], но было ясно: дорога победила.

Мы развернулись и отправились в трудный обратный путь. По крайней мере, только что

**[72] Примечания: 72**

Я действительно думала, что смогу сдвинуть насыпь, пока мой коллега из Южного университета Чили Герхард Йессен не посмотрел на меня, хихикая, и не протянул: “У-у-у-у-у, Карен…”

отремонтированная нами дорога позволила нам вернуться. Вполне понятно, что мы могли чувствовать себя деморализованными: мы отобрали образцы лишь в одном месте, работали не покладая рук, но дорога нас все равно победила. Однако, как заметил позднее один из аспирантов, это был лучший день во всем путешествии. Великолепная иллюстрация того, что движет вперед весь наш проект — и экспедиционные работы, и науку: люди, работающие сообща ради общей цели. Больцман никогда бы не создал современную термодинамику, если бы не восхищался Дарвином. Я бы не определила последовательности ДНК из нового домена жизни, если бы не воспользовалась результатами работы моих коллег со всего мира. Многие из нас не подозревали бы о растущей угрозе, исходящей от глубоководной добычи полезных ископаемых, если бы другие наши коллеги не занимались изучением ее последствий. Открытие невероятного разнообразия жизни в земной коре — грандиозное событие. И осознание мощи подземной жизни потребует коллективных усилий.

Теперь у меня есть ответ на вопрос, который впервые заставил меня погрузиться на дно океана в батискафе “Джонсон-Си-Линк II”. *Есть ли*

*внутри Земли такие необычные формы жизни, которые могут изменить наше понимание жизни как таковой?* Ответ однозначный: да! Теперь мы знаем, что в земле под нашими ногами существует другой мир. И он остается почти неизведанным, поскольку в него трудно проникнуть. Нужно быть осторожными, чтобы подсознательно не переиначить выражение "Видеть — значит верить" в "Верить — значит видеть". Ведь когда речь идет об обитателях земных недр, нам необходимо поверить в то, что увидеть трудно. Обитатели земных глубин показывают нам, что термодинамические законы жизни не накладывают таких ограничений, какие нам представлялись. Спектр химических, энергетических и временных возможностей для жизни намного шире, чем тот, с которым мы имеем дело в нашем мире на поверхности.

Подземный мир существовал под нами постоянно, но мы не знали о нем, словно были заколдованы. Однако подповерхностная биосфера чрезвычайно важна для жизни на нашей планете. Кроме того, она позволяет понять, как эволюционировала жизнь на Земле, и показывает, что жизнь может существовать и в других уголках нашей Солнечной системы.

Чтобы применить на пользу всего общества те знания, что были получены при изучении обитателей земных глубин, потребуются усилия не только ученых. Если ученые объединятся с педагогами, политиками, инженерами, социологами, предпринимателями и людьми других специальностей, возможно — не наверняка, но возможно, — нам всем вместе удастся продвинуться вперед. Стоит ли включиться в эту трудную работу, чтобы понять, как обитатели земных глубин могут изменить наши представления о жизни и предложить решения проблем, угрожающих человечеству? Я отвечу так же, как отвечаю на приглашение к участию в новом интересном научном проекте: “Почему бы и нет? Я в деле!”

# Благодарности

Многие люди оказали влияние на мою работу, и некоторых из них я упомянула в этой книге. Трое учителей появились в моей жизни раньше остальных и направили меня на путь научных исследований.

Моя учительница по естественным наукам в восьмом классе средней школы в Бофорте Марджери Майзенхеймер объяснила, как делаются научные открытия. Она рассказала, что “наука” заключена не только в толстых пыльных учебниках, наука — это поиски неизведанного. Однажды она пришла в класс с яйцом в руке и заявила, что уронит его, не разбив. Мы уже видели другие впечатляющие эксперименты в ее исполнении и поэтому вытянули шеи: что же будет на этот раз? Она подняла яйцо высоко над собой и отпустила, и оно разлилось по линолеуму. Учительница весело посмотрела на нас и спросила: “Видели? Получилось!” Мы промычали: “Э-э-э… нет, ничего не вышло”. На что она ответила: “Конечно вышло! Оно разбилось, когда ударилось об пол, а пока падало, оставалось целым”. Я запомнила

этот нелепый маленький эксперимент, потому что он показал, как учительница пытается заставить нас рассуждать вдумчиво и критически. Она призывала не принимать все за чистую монету — небольшой творческий эксперимент иногда помогает понять, что вы чего-то не учитываете.

После второго курса я провела лето в научном и математическом лагере при Центральном университете Северной Каролины. Финансировался лагерь из государственных средств. Для меня это было важно, поскольку у родителей не было возможности отправить меня в дорогой лагерь для учебы у настоящих ученых, а этот лагерь предоставил мне такой шанс. Я понимала, как мне повезло, и старалась усвоить как можно больше. Выбрала я курс микробиологии, который вел Джон Мейфилд — специалист по грибам, разрушающим мертвые деревья в лесах. То, о чем он нам рассказывал тем летом, в конечном итоге определило мою научную карьеру и вообще всю мою жизнь. Он объяснял, что микробы — крохотные одноклеточные бактерии, археи и эукариоты — это скрытая сила, движущая почти всеми земными процессами. Тогда я впервые услышала это утверждение и уже никогда не переставала об этом думать.

Преподаватель химии в Суортмор-колледже Кэтлин Ховард помогла мне стать настоящим ученым. Она была моим научным руководителем во время дипломной работы. И она не только разъяснила мне мельчайшие подробности спектроскопии ядерного магнитного резонанса и биохимические свойства липидных мембран. Однажды она сказала: “В исследованиях бывает больше поражений, чем побед. Если твой эксперимент не получается с понедельника по четверг, но потом получается в пятницу и ты отправляешься домой на выходные удовлетворенной результатами рабочей недели, значит, исследовательская деятельность тебе подходит. Но если тебя раздражает, что ты потеряла первые четыре дня, нужно поискать какое-то другое дело”. Это мудрое напутствие помогало мне пережить бесчисленные неудачи на протяжении многих лет, и я до сих пор благодарна Кэтлин за то, что она открыла передо мной двери в мир исследований.

Еще я хочу поблагодарить трех замечательных и влиятельных ученых, которые сыграли важнейшую роль в развитии биологических исследований глубоких земных недр и оказали значительное влияние на меня как на ученого. Профессор наук о Земле и декан Университета

Южной Калифорнии Ян Аменд, скончавшийся в 2024 году, углубил мое понимание термодинамики и жизни. Ян обладал чудесным даром: он умел разрядить обстановку во время любой напряженной научной дискуссии остроумным замечанием и заразительным смехом, которые были просто бальзамом для души. Он самым непосредственным образом участвовал в создании этой книги, прочитав первые варианты рукописи. Профессор наук о Земле в Принстонском университете Туллис Онстотт, скончавшийся в 2021 году, был олицетворением сил добра в этом мире, и я многим обязана таким ученым, как Туллис, за доброжелательное и уважительное отношение к более молодым ученым вроде меня. И я благодарна профессору наук о Земле из Университета Южной Калифорнии Катрине Эдвардс, скончавшейся в 2014 году: она излучала такой яркий свет, что он освещал всю нашу область исследований.

Я очень благодарна моему мужу и коллеге Дрю Стину, который помог мне обдумать самые сложные части книги, напоминал, что лишние слова вредят, и дарил мне свою любовь и поддержку. Наши дети — Клара и Мэри Джон Стин — подбадривали меня, слушали, как я читаю вслух, делали отличные замечания и терпели, пока я

стучала по клавиатуре. Моя мама и отчим Пенни Ллойд и Джон Болдридж, родители мужа Боб и Рут Стин, а также мои тетя и дядя Нэнси Фергюсон и Том Орум не только оказывали моральную поддержку и подбадривали меня, но и работали с многочисленными черновиками рукописи. Мой отец Фрэнк Ллойд был бы на седьмом небе от счастья, если бы узнал, что я написала книгу. Он умер в 2014-м, спустя долгие годы после того, как обеспечил мне детство, полное приключений.

Я выражаю благодарность участникам проекта "Биология и субдукция", в первую очередь Питеру Бэрри, Агостине Кьоди, Мартену де Муру, Донато Джованнелли, Герхарду Йессену, Якопо Пазотти и Карлосу Рамиресу. Спасибо, что слушали мои рассуждения о будущей книге во время наших путешествий в Андах и других местах и терпели, когда я орудовала научными инструментами ногой, чтобы одновременно вести записи и отбирать образцы из горячих источников.

Я многим обязана Элисон Калетт из издательства Принстонского университета, которая первой заговорила со мной о создании книги, Халли Шефер из того же издательства, помогавшей редактировать текст, Дане Хендрикс за корректуру, а также ребятам из компании по под-

держке издательских проектов *Moon & Company* Аманде Мун, Томасу Лебьену и Джеймсу Брандту, которые прочли книгу столько же раз, сколько и я сама, и помогли ей обрести форму.

Многие другие люди тоже читали рукопись, предлагали полезную правку, давали советы, делились фотографиями и вообще оживляли мой мир: Андрей Абрамов, Чуквуфумнанья Абуа, Дженнифер Бейли, Джиллиан Бэнфилд, Джеймс Брэдли, Джой Бонджорно, Гейдж Кун, Марк Фоллер, Дэник Форсман, Эйвери Фулфорд, Роберт Хейзен, Джули Хьюбер, Брайан Хайнек, Оливер Джефферс, Бо Баркер Йоргенсен, Эллен Лалк, Дуглас Лароу, Финли Ллойд, Джеффри Марлоу, Говард Мендловиц, Флавия Мильяччо, Сарина Митчелл, Франческо Монтеманьо, Бет Оркатт, Дорте Петерсен, Кэтрин Пратт, Ларс Шрайбер, Кейти Сайпс, Дуглас Соуфер, Рамунас Степанаускас, Андреас Теске, Элизабет Трембат-Райхерт, Стив Тёрнер, Джозеф Валлино, Татьяна Вишнивецкая, Лекета Уильямс и все сотрудники кемпинга *Ferguson Camp* на озере Элфин и Епископальной церкви Святого Иакова в Ноксвилле, штат Теннесси. Без энтузиазма и поддержки этих людей я никогда бы не довела дело до конца.

# Список литературы

## Вступление

1 Pedersen K. *Exploration of deep intraterrestrial microbial life: Current perspectives*. FEMS Microbiol. Lett. 185, 9–16 (2000).

2 Onstott T. C. *Deep Life: The Hunt for the Hidden Biology of Earth, Mars, and Beyond.* Princeton University Press, 2017.

3 Valentine D. L. *Microbiology: Intraterrestrial lifestyles*. Nature. 496, 176–77 (2013).

## Глава 1. Живет ли кто-то в земной коре?

1 Chivian D. et al. *Environmental genomics reveals a single-species ecosystem deep within Earth*. Science. 322, 275–78 (2008).

2 Ruff S. E. et al. *Hydrogen and dark oxygen drive microbial productivity in diverse groundwater ecosystems*. Nat. Commun. 14, 3194 (2023); Kraft B. et al. *Oxygen and nitrogen production by an ammonia-oxidizing archaeon*. Science. 375, 97–100 (2022).

3 LaRowe D. E. et al. *Temperature and volume of global marine sediments*. Geology. 45, 275–78 (2017).

4 Karner M. B. et al. *Archaeal dominance in the mesopelagic zone of the Pacific Ocean*. Nature. 409, 507–10 (2001); Parkes R. J. et al. *Recent studies on bacterial populations and processes in subseafloor sediments: A review*. Hydrogeol. J. 8, 11–28 (2000).

5 Kallmeyer J. et al. *Global distribution of microbial abundance and biomass in subseafloor sediment*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 109, 16213–16 (2012).

6 Magnabosco C. et al. *The biomass and biodiversity of the continental subsurface*. Nat. Geosci. 11, 707–17 (2018).

7 Lloyd K. G. et al. *Spatial structure and activity of sedimentary microbial communities underlying a Beggiatoa spp. mat in a Gulf of Mexico hydrocarbon seep*. PLOS One. 5, e8738 (2010).

## Глава 2. Вгрызаемся в твердую землю

1 Heuer V. B. et al. *Temperature limits to deep subseafloor life in the Nankai Trough subduction zone*. Science. 370, 1230–34 (2020).

2 Onstott T. C. *Deep Life: The Hunt for the Hidden Biology of Earth, Mars, and Beyond*. Princeton University Press, 2017.

3 Summit M., Baross J. A. *A novel microbial habitat in the mid-ocean ridge subseafloor*. Proc. Natl. Acad. Sci. 98, 2158–63 (2001).

## Глава 3. Две ДНК-революции

1 Rappé M. S., Giovannoni S. J. *The uncultured microbial majority*. Annu. Rev. Microbiol. 57, 369–94 (2003).

2 Там же; Teske A., Sørensen K. B. *Uncultured archaea in deep marine subsurface sediments: Have we caught them all?* ISME J. 2, 3–18 (2008).

3 Sogin M. L. et al. *Microbial diversity in the deep sea and the underexplored "rare biosphere"*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 103, 12115–20 (2006); Huber J. A. et al. *Microbial population structures in the deep marine biosphere*. Science. 318, 97–100 (2007).

4 Lloyd K. G. et al. *An anaerobic methane-oxidizing community of ANME-1b archaea in hypersaline Gulf of Mexico sediments*. Appl. Environ. Microbiol. 72, 7218–30 (2006).

5 Louca S. et al. *A census-based estimate of Earth's bacterial and archaeal diversity*. PLOS Biol. 17, e3000106 (2019).

## Глава 4. Люди и другие растения

1 Margulis L., Schwartz K. V. *Five Kingdoms: An Illustrated Guide to the Phyla of Life on Earth.* Freeman & Company, W. H., 1982.

2 Woese C. R. *Bacterial evolution*. Microbiol. Rev. 51, 221–71 (1987).

3 Mayr E. *Perspective: Two empires or three?* Comp. Gen. Pharmacol. 95, 9720–23 (1998).

4 Там же.

5 Baker B. J. et al. *Diversity, ecology and evolution of Archaea*. Nat. Microbiol. 29, 887–900 (2020).

6 Hug L. A. et al. *A new view of the tree of life.* Nat. Microbiol. 1, 1–6 (2016).

7 Jagus R. et al. *Diversity of eukaryotic translational initiation factor eIF4E in protists*. Comp. Funct. Genomics. 2012, 1–21 (2012).

8 Jurgens G. et al. *Identification of novel Archaea in bacterioplankton of a boreal forest lake by phylogenetic analysis and fluorescent in situ hybridization*. FEMS Microbiol. Ecol. 34, 45–56 (2000).

9 Inagaki F. et al. *Microbial communities associated with geological horizons in coastal subseafloor sediments from the sea of Okhotsk*. Appl. Environ. Microbiol. 69, 7224–35 (2003).

10 Takai K. E. N. et al. *Archaeal diversity in waters from deep South African gold mines.* Appl. Environ. Microbiol. 67, 5750–60 (2001).

11 Lloyd K. G. et al. *Predominant archaea in marine sediments degrade detrital proteins*. Nature. 496, 215–18 (2013).

12 Edwards K. J. *An archaeal iron-oxidizing extreme acidophile important in acid mine drainage*. Science. 287, 1796–99 (2000).

13 Tyson G. W. et al. *Community structure and metabolism through reconstruction of microbial genomes from the environment.* Nature. 428, 37–43 (2004).

14 Wrighton K. C. et al. *Fermentation, hydrogen, and sulfur metabolism in multiple uncultivated bacterial phyla.* Science. 337, 1661–66 (2012).

15 Meng J. et al. *Genetic and functional properties of uncultivated MCG archaea assessed by metagenome and gene expression analyses*. ISME J. 8, 650–59 (2014).

## Глава 5. Как выжить в вулкане?

1 Madshus I. H. *Regulation of intracellular pH in eukaryotic cells*. Biochem. J. 250, 1–8 (1988).

2 Golyshina O. V. et al. *The “pH optimum anomaly” of intracellular enzymes of Ferroplasma acidiphilum*. Environ. Microbiol. 8, 416–25 (2006).

3 Baker-Austin C., Dopson M. *Life in acid: pH homeostasis in acidophiles*. Trends Microbiol. 15, 165–71 (2007).

4 Hynek B. M. et al. *Lack of microbial diversity in an extreme Mars analog setting: Poás volcano, Costa Rica*. Astrobiology. 18, 923–33 (2018).

5 Russell M. J. et al. *Serpentinization as a source of energy at the origin of life.* Geobiology. 8, 355–71 (2010).

6 Krulwich T. A. et al. *Adaptive Mechanisms of Extreme Alkaliphiles* // *Extremophiles Handbook* (ed. Horikoshi K.). Springer Japan, 2011.

7 Suzuki S. et al. *Unusual metabolic diversity of hyperalkaliphilic microbial communities associated with subterranean serpentinization at the Cedars*. ISME J. 11, 2584–98 (2017).

## Глава 6. Дышим минералами

1 Larowe D. E., Cappellen P. V. *Degradation of natural organic matter: A thermodynamic analysis*. Geochim. Cosmochim. Acta. 75, 2030–42 (2011).

2 Nealson K. H. *Sediment bacteria: Who's there, what are they doing, and what's new?* Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 25, 403–34 (1997).

3 Lloyd J. R. *Microbial reduction of metals and radionuclides*. FEMS Microbiol. Rev. 27, 411–25 (2003).

4 Lovley D. R., Malvankar N. S. *Minireview: Seeing is believing: Novel imaging techniques help clarify microbial nanowire structure and function*. Environ. Microbiol. 17, 2209–15 (2015).

5 Kuenen J. G. *Anammox bacteria: From discovery to application.* Nat. Rev. Microbiol. 6, 320–26 (2008).

6 Lu G.-S. et al. *Bioenergetic potentials in terrestrial, shallow-sea and deep-sea hydrothermal systems*. Chem. Geol. 583, 120449 (2021).

## Глава 7. Жизнь на грани возможного

1 Buongiorno J. et al. *Complex microbial communities drive iron and sulfur cycling in arctic fjord sediments*. Appl. Environ. Microbiol. 85, 1–16 (2019).

2 Wehrmann L. M. et al. *Iron and manganese speciation and cycling in glacially influenced high-latitude fjord sediments (West Spitsbergen, Svalbard): Evidence for a benthic recycling-transport mechanism*. Geochim. Cosmochim. Acta. 141, 628–55 (2014).

3 Zinder S. H. *Syntrophic acetate oxidation and "reversible acetogenesis"* // *Acetogenesis* (ed. Drake H. L.). Springer US, 1994.

4 Ferry J. G. *Acetate metabolism in anaerobes from the domain Archaea*. Life Basel Switz. 5, 1454–71 (2015).

5 Lloyd K. G. et al. *Environmental evidence for net methane production and oxidation in putative ANaerobic MEthanotrophic (ANME) archaea*. Environ. Microbiol. 13, 2548–64 (2011).

6 LaRowe D. E., Amend J. P. *The energetics of fermentation in natural settings*. Geomicrobiol. J. 36, 492–505 (2019).

7 Bradley J. A. et al. *Widespread energy limitation to life in global subseafloor sediments.* Sci. Adv. 6,

eaba0697 (2020).

## Глава 8. Бессмертные микробы

1 Lloyd K. G. et al. *Effects of dissolved sulfide, pH, and temperature on growth and survival of marine hyperthermophilic archaea*. Appl. Environ. Microbiol. 71, 6383–87 (2005).

2 Lennon J. T., Jones S. E. *Microbial seed banks: The ecological and evolutionary implications of dormancy*. Nat. Rev. Microbiol. 9, 119–30 (2011).

3 Alnimr A. M. *Dormancy models for mycobacterium tuberculosis: A minireview*. Braz. J. Microbiol. 46, 641–47 (2015).

4 Davis K. E. R. et al. *Effects of growth medium, inoculum size, and incubation time on culturability and isolation of soil bacteria*. Appl. Environ. Microbiol. 71, 826–34 (2005).

5 Könneke M. et al. *Isolation of an autotrophic ammonia-oxidizing marine archaeon*. Nature. 437, 543–46 (2005); Rappe M. S. et al. *Cultivation of the ubiquitous SAR11 marine bacterioplankton clade*. Nature. 418, 630–33 (2002).

6 Nauhaus K. et al. *In vitro cell growth of marine archaeal-bacterial consortia during anaerobic oxidation of methane with sulfate*. Environ. Microbiol. 9, 187–96 (2007); Imachi H. et al. *Isolation of an*

*archaeon at the prokaryote — eukaryote interface*. Nature. 577, 519–25 (2020); Katayama T. et al. *Isolation of a member of the candidate phylum "Atribacteria" reveals a unique cell membrane structure*. Nat. Commun. 11, 1–9 (2020).

7 Bradley J. A. et al. *Widespread energy limitation to life in global subseafloor sediments*. Sci. Adv. 6, eaba0697 (2020); Hoehler T. M., Jørgensen B. B. *Microbial life under extreme energy limitation*. Nat. Rev. Microbiol. 11, 83–94 (2013); Larowe D. E., Amend J. P. *Power limits for microbial life*. Front. Microbiol. 6, 1–11 (2015).

8 Lloyd K. G. et al. *Evidence for a growth zone for deep subsurface microbial clades in near-surface anoxic sediments*. Appl. Environ. Microbiol. 86, 1–13 (2020); Starnawski P. et al. *Microbial community assembly and evolution in subseafloor sediment*. Proc. Natl. Acad. Sci. 114, 2940–45 (2017); Braun S. et al. *Size and carbon content of sub-seafloor microbial cells at Landsort Deep, Baltic Sea*. Front. Microbiol. 7, 1–13 (2016).

9 Trembath-Reichert E. et al. *Methyl-compound use and slow growth characterize microbial life in 2-km-deep subseafloor coal and shale beds*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 114, E9206–E9215 (2017).

10 Braun S. et al. *Size and carbon content of sub-seafloor microbial cells at Landsort Deep, Baltic*

*Sea*. Front. Microbiol. 7, 1–13 (2016).

11 Starnawski P. et al. *Microbial community assembly and evolution in subseafloor sediment*. Proc. Natl. Acad. Sci. 114, 2940–45 (2017); Walsh E. A. et al. *Bacterial diversity and community composition from seasurface to subseafloor*. ISME J. 10, 979–89 (2016).

12 Teske A., Sørensen K. B. *Uncultured archaea in deep marine subsurface sediments: Have we caught them all?* ISME J. 2, 3–18 (2008); Durbin A. M., Teske A. *Archaea in organic-lean and organic-rich marine subsurface sediments: An environmental gradient reflected in distinct phylogenetic lineages.* Front. Microbiol. 3, 168 (2012).

13 Steen A. D. et al. *Kinetics and identities of extracellular peptidases in subsurface sediments of the White Oak River Estuary, NC*. Appl. Environ. Microbiol. 85, 1–14 (2019).

14 Bird J. T. et al. *Uncultured microbial phyla suggest mechanisms for multi-thousand-year subsistence in Baltic Sea sediments*. mBio. 10, 1–15 (2019).

15 Finkel S. E. *Long-term survival during stationary phase: Evolution and the GASP phenotype.* Nat. Rev. Microbiol. 4, 113–20 (2006).

16 Lloyd K. G. et al. *Evidence for a growth zone for deep subsurface microbial clades in near-surface anoxic sediments*. Appl. Environ. Microbiol. 86, 1–13

(2020).

17 Steen A. D., Arnosti C. *Long lifetimes of* β-*glucosidase, leucine aminopeptidase, and phosphatase in Arctic seawater*. Mar. Chem. 123, 127–32 (2011).

18 Pianka E. R. *On r- and K-Selection*. Am. Soc. Nat. 104, 592–97 (1970).

## Глава 9. Переосмысливаем свое происхождение

1 Vernadsky V. I. *The Biosphere.* Copernicus, 1998. [На русском языке см., например: Вернадский В. И. *Биосфера и ноосфера.* АСТ, 2024.]

2 Knittel K. et al. *Diversity and distribution of methanotrophic archaea at cold seeps*. Appl. Environ. Microbiol. 71, 467–79 (2005).

3 Spang A. et al. *Complex archaea that bridge the gap between prokaryotes and eukaryotes.* Nature. 521, 173–79 (2015).

4 Imachi H. et al. *Isolation of an archaeon at the prokaryote — eukaryote interface*. Nature. 577, 519–25 (2020).

## Глава 10. Равновесие – это смерть

1 Schneider E. D., Sagan D. *Into the Cool: Energy Flow, Thermodynamics, and Life*. University of Chicago Press, 2005.

2 Prigogine I., Stengers I. *Order out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature*. Bantam, 1984.

3 Vallino J. J. *Ecosystem biogeochemistry considered as a distributed metabolic network ordered by maximum entropy production*. Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci. 365, 1417–27 (2010).

## Глава 11. Что обитатели земных недр могут сделать для нас?

1 Liang R. et al. *Predominance of anaerobic, spore-forming bacteria in metabolically active microbial communities from ancient Siberian permafrost*. Appl. Environ. Microbiol. 85, e00560–19 (2019).

2 Sipes K. et al. *Eight metagenome-assembled genomes provide evidence for microbial adaptation in* 20,000— *to* 1,000,000-*year-old Siberian permafrost*. Appl. Environ. Microbiol. 87, e00972–21 (2021).

3 Waldrop M. P. et al. *Molecular investigations into a globally important carbon pool: Permafrost-protected carbon in Alaskan soils*. Glob. Change Biol. 16, 2543–54 (2010).

4 Mann P. J. et al. *Evidence for key enzymatic controls on metabolism of Arctic River organic matter*. Glob. Change Biol. 20, 1089–1100 (2014).

5 Panko B. *World's largest carbon capture plant opens in Iceland*. Smithsonian Magazine (2021).

6 Tyne R. L. et al. *Rapid microbial methanogenesis during $CO_2$ storage in hydrocarbon reservoirs*. Nature. 600, 670–74 (2021).

7 Mitchell A. C. et al. *Microbially enhanced carbon*

*capture and storage by mineral-trapping and solubility-trapping*. Environ. Sci. Technol. 44, 5270–76 (2010).

8 Cronan D. S. *Manganese nodules // Encyclopedia of Ocean Sciences* (ed. Cochran J. K. et al.), vol. 5. Academic Press, 2019.

9 International Seabed Authority. *About ISA. https://www.isa.org.jm/about-isa/*

10 Hein J. R. et al. *Cobalt-rich ferromanganese crusts in the Pacific* // *Handbook of Marine Mineral Deposits* (ed. Cronan D. S.). CRC Press, 1999.

11 Dopffel N. et al. *Microbial side effects of underground hydrogen storage: Knowledge gaps, risks and opportunities for successful implementation*. Int. J. Hydrog. Energy. 46, 8594–8606 (2021).

## Заключение. Наше (возможное) будущее

1 Hand K. P. *Alien Oceans: The Search for Life in the Depths of Space.* Princeton University Press, 2020.

2 Hoffman P. F. et al. *Snowball Earth climate dynamics and cryogenian geology-geobiology.* Sci. Adv. 3, e1600983 (2017).