

происхождение  
**ВСЕГО**

от Большого взрыва  
до человеческой цивилизации



## Annotation

Невероятно компактный рассказ геофизика Дэвида Берковичи о том, как все везде появилось: звезды и галактики, атмосфера Земли, океаны, клетка и, наконец, человеческие цивилизации, написан трепетно и талантливо. Сочетая юмор и безупречную научную канву, Берковичи с головокружительной скоростью проводит нас сквозь пространство и время – почти 14 млрд лет, показывая при этом связи между теориями, помогающие понимать такие темы, как физика частиц, тектоника плит и фотосинтез. Уникальный эксперимент Берковичи в равной мере впечатляет научной убедительностью и литературным мастерством и станет незабываемым опытом знакомства с вопросами космологии, геологии, климатологии, человеческой эволюции как для искушенного читателя, так и для новичка.

- 
- 
- [Дэвид Берковичи](#)
- 
-

**Дэвид Берковичи**  
**Происхождение всего: От Большого**  
**взрыва до человеческой цивилизации**

«Происхождение всего: От Большого взрыва до человеческой цивилизации / Дэвид Берковичи»: Альпина нон-фикшн; Москва; 2017  
ISBN 978-5-9614-4938-9

Дэвид Берковичи

# Происхождение ВСЕГО

От Большого взрыва  
до человеческой цивилизации

Перевод с английского



ТРАЕКТОРИЯ



Москва

2017

Переводчик Михаил Безруков  
Научный редактор Владимир Сурдин

Редактор Владимир Потапов  
Руководитель проекта Д. Петушкова  
Корректоры С. Чупахина, М. Миловидова  
Компьютерная верстка А. Фоминов  
Дизайнер обложки Ю. Буга  
Иллюстрация на обложке istockphoto.com

Издание подготовлено в партнерстве с Фондом некоммерческих инициатив «Траектория» (при финансовой поддержке Н.В. Каторжнова).



Фонд поддержки научных, образовательных и культурных инициатив «Траектория» ([www.traektoriafdn.ru](http://www.traektoriafdn.ru)) создан в 2015 году. Программы фонда направлены на стимулирование интереса к науке и научным исследованиям, реализацию образовательных программ, повышение интеллектуального уровня и творческого потенциала молодежи, повышение конкурентоспособности отечественных науки и образования, популяризацию науки и культуры, продвижение идей сохранения культурного наследия. Фонд организует образовательные и научно-популярные мероприятия по всей России, способствует созданию успешных практик взаимодействия внутри образовательного и научного сообщества.

В рамках издательского проекта Фонд «Траектория» поддерживает издание лучших образцов российской и зарубежной научно-популярной литературы.

© 2016 by David Bercovici

Originally published by Yale University Press

© Издание на русском языке, перевод, оформление. ООО «Альпина нон-фикшн», 2017

Все права защищены. Произведение предназначено исключительно для частного использования. Никакая часть электронного экземпляра данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, включая размещение в сети Интернет и в корпоративных сетях, для публичного или коллективного использования без письменного разрешения владельца авторских прав. За нарушение авторских прав законодательством предусмотрена выплата компенсации правообладателя в размере до 5 млн. рублей (ст. 49 ЗОАП), а также уголовная ответственность в виде лишения свободы на срок до 6 лет (ст. 146 УК РФ).

\* \* \*

## Предисловие

Историю Вселенной, пожалуй, лучше всего писать вспять. Разумеется, не набирая текст от конца к началу, а выстраивая рассказ в обратном хронологическом порядке. Притягательность момента творения и для религиозного, и для научного мышления объясняется нашим интересом к тому, как мы оказались там, где находимся сейчас. Если начать с настоящего момента и отмотать пленку назад на 7000 лет человеческой истории, то мы увидим, что далее перед нами простираются еще 7 млн лет до самой зари человечества. Как бы ошеломительно это ни звучало, но нас ждут еще 600 млн лет до появления животных, 3 млрд лет до момента зарождения жизни, ну и еще какой-нибудь жалкий миллиард до рождения нашей планеты и Солнечной системы. А уж из той точки открываются еще 9 млрд лет до момента возникновения самого времени. Если бы мы могли прокрутить историю Вселенной назад за сутки, как невыносимо длинный авангардистский фильм, то история человечества заняла бы в нем примерно 0,04 секунды и закончилась задолго до того, как с экрана исчезнут вступительные титры. Первые животные появились бы спустя час с начала просмотра; еще семь с лишним часов нам пришлось бы ждать сцен формирования Земли и Солнечной системы и затем промучиться еще 16 часов, чтобы наконец добраться до возникновения Вселенной.

Но как бы ни соблазнительно было вести рассказ об истории Вселенной «из настоящего в прошлое», хронологический подход оказывается значительно более продуктивным, тем более что мы привыкли мыслить и жить в мире, где все «устремлено вперед». В этой небольшой книге я изложу историю в ускоренном темпе не за 24 часа (хотя все зависит от тебя, дорогой читатель), а скользя по поверхности событий и останавливаясь лишь на важнейших из них. Книга охватывает самые знаменательные моменты в истории Вселенной, показывая, когда и, самое главное, как появились различные ее части. Понятие «происхождение» глубоко укоренилось в науке. Речь идет не о мифах и домыслах, а о важнейших научных гипотезах, объясняющих, как возникло все сущее. Разница между домыслом и гипотезой принципиальная. Исследователи могут опровергнуть или признать ложной гипотезу в ходе экспериментов или наблюдений, поскольку гипотеза – это предсказание, поддающееся проверке и измерению. Проверяемая гипотеза, пожалуй, стала основополагающим научным понятием, и, хотя кому-то такого рода материи могут показаться сухими, я надеюсь донести до читателя всю красоту этого понятия, рассматривая истории происхождения. Но не волнуйтесь, слишком усердствовать с красотой я не собираюсь.

Хочу заметить, что эта книга выросла из моего студенческого семинара в Йельском университете, скромно названного «Происхождение всего». Его целью было объяснить, что такое наука с помощью «больших» проверяемых гипотез. Книга предназначена широкой аудитории, но я не думаю, что разговор о науке следует вести на примитивном уровне. В то же время я постараюсь не утомлять читателя терминологией и пояснять, что к чему, там, где без толики научного жаргона не обойтись.

И хотя я буду излагать лишь основные моменты теорий происхождения, это не случайные или не связанные между собой эпизоды – каждый из них зависит от предыдущего и плавно перетекает в последующий. Те кирпичики, из которых построена жизнь, возникли из воздуха, моря и горных пород нашей планеты, а сама Земля сформировалась из космической пыли. Ее частицы родились в горниле гигантских звезд, которые возникли из газа, появившегося в результате Большого взрыва. Расположение нашей планеты в космическом пространстве, то, каким образом возникали и изменялись ее океаны, атмосфера и внутреннее строение, – все это позволило сложным формам жизни существовать на протяжении сотен миллионов лет.

Как ученый, который занимался рядом обсуждаемых здесь тем (хотя, конечно, не всеми), я часто рассматриваю вопросы происхождения сквозь призму геофизики, т. е., говоря откровенно, смотрю на вещи несколько предвзято. Со временем мои студенты уясняют, что в моем изложении важная роль отводится тектонике плит, и, если бы я мог каким-то образом возложить на нее ответственность за Большой взрыв, я бы это сделал (но, к сожалению, тут имеет место досадное несовпадение во времени). Есть прекрасные, гораздо более подробные, чем эта, книги по истории Вселенной и жизни на Земле, в конце я привожу их перечень. Моя же работа, не претендуя ни на глубину, ни на всеохватность, будет весьма немногословной и несколько поверхностной в лучшем смысле этих слов – если, конечно, такой смысл у них имеется. Моя цель – предложить краткий и, надеюсь, легко читаемый обзор, который призван дать представление об истории Вселенной (и в какой-то степени о месте человечества в этой истории), и, что еще важнее, побудить читателя расширять свои знания в этих интереснейших областях.

Предупреждение: читатель может предположить, что я являюсь специалистом во всех тех сферах, о которых говорится в этой небольшой книге. Что было бы замечательно, будь оно правдой, но, если честно, это не так. Определенный багаж знаний за почти три десятилетия преподавательской деятельности в университете я накопил, но я ни в коей

мере не астроном, не биолог и не антрополог. Поэтому темы, близкие к моим научным интересам – геофизике и науке о Земле, – поневоле будут рассмотрены более подробно. Читатель не должен полагаться на эту книгу как на окончательное слово в затрагиваемых ей вопросах. Она больше похожа на пробную тарелку кушаний из ресторана кухни фьюжн, шеф-повар которого главным образом знаменит своими лингвини.





## 1. Вселенная и галактики

Время началось после непостижимого, чудовищной силы взрыва –

неплохое начало, не так ли? Однако был ли этот взрыв первым моментом существования Вселенной или только Земли, еще сравнительно недавно – до XX в. – не знали. Первые строки Библии гласят: «В начале сотворил Бог небо и землю». В XVII в. ирландский архиепископ Джеймс Ашшер даже вычислил точную дату этого события – 23 октября 4004 г. до н. э.

Некоторые выдающиеся философы эпохи Возрождения, жившие незадолго до Ашшера, придерживались радикального мнения, что у времени вообще не было начала. В том числе знаменитый, в основном из-за своей мученической смерти, итальянский монах-доминиканец и мыслитель XVI в. Джордано Бруно. Он верил в альтернативную по тем временам идею Коперника о том, что Земля не является центром мира, а обращается вокруг Солнца. Бруно пошел дальше Коперника и предположил, что Солнце – всего лишь звезда, такая же, как и те, что мы видим на ночном небе, и вокруг которых также обращаются планеты. Но самое важное, по крайней мере, для нашей книги, – это утверждение Джордано Бруно о том, что Вселенная неизменна и безгранична во времени и пространстве. Бруно был не первым европейским мыслителем, высказывавшим такие взгляды, однако именно его идеи католическая церковь объявила еретическими наряду с еще более оскорбляющим веру отрицанием Божественности Христа и таинства Пресуществления. Бруно был схвачен в Венеции и предстал перед трибуналом, затем его увезли в Рим, где вновь подвергли допросам. Пылкий и язвительный Бруно заявил, что не отречется от своих трудов, пока папа римский или сам Господь Бог не скажут ему, что он не прав. Те промолчали, и в первый день великого поста 1600 г. Джордано Бруно был сожжен на костре на площади Кампо ди Фьори в Риме. Сейчас на этом месте стоит его статуя, грозно поглядывающая на веселых туристов, которые обедают в ближайших кафе.

К счастью, с тех пор ученых больше не сжигают на кострах за их идеи (по крайней мере буквально). Однажды в Риме мы с коллегой, стоя перед впечатляющим памятником Джордано Бруно, задались вопросом, отреклись бы мы от своих научных работ под страхом смерти, как это сделал Галилео Галилей через 33 года после казни Бруно. После короткого раздумья мы рассмеялись и признали, что тут же отреклись бы. Но независимо от нашей трусости – и от самой идеи умереть за труды, которые никто не читал, – у нас есть возможность оценить прошлое, поэтому мы понимаем, что лженаука умирает вместе с ее авторами, а настоящая наука не умирает никогда. Если наши воззрения погибают вместе с нами, то, вероятно, этого они и заслуживают. Однако Джордано Бруно пожертвовал жизнью ради своих убеждений, став одним из самых известных мучеников

науки. В конце концов его идеи оказались пророческими, особенно теория о том, что Земля – всего лишь одна из великого множества планет, обращающихся вокруг одной из многочисленных звезд в безграничной и древней Вселенной.

Однако идея Бруно о том, что Вселенная безгранична не только в пространстве, но и во времени, не верна – у времени было начало. Простейшее доказательство этого – темнота ночного неба. Если бы мы жили в безгранично древней и безгранично обширной Вселенной, каждый клочок ночного неба был бы занят звездами, свет этого беспредельного количества звезд успел бы достичь нашей планеты и все ночное небо было бы освещено этим светом. Еще современники Джордано Бруно немецкий математик Иоганн Кеплер и английский астроном Томас Диггес упоминали этот фотометрический парадокс, однако назван он был в честь немецкого астронома конца XVIII–XIX вв. Генриха Вильгельма Ольберса. Решение парадокса предложил Уильям Томпсон (лорд Кельвин), английский физик XIX–XX вв., а до него верную догадку высказал американский писатель и поэт Эдгар Аллан По: Вселенная должна быть ограничена либо во времени существования (и, таким образом, свет самых далеких звезд до нас еще не долетел), либо в размерах (потому звезды не занимают собой каждый клочок неба), либо в том и другом. Эта важная догадка впоследствии привела к гипотезе Большого взрыва, поскольку из нее следовало, что Вселенная появилась в некий момент прошлого и/или не везде одновременно.

В 1920-х гг. американский астроном Эдвин Хаббл на основании наблюдений в телескоп установил, что за пределами Млечного Пути, который прежде считали единственной галактикой в неподвижной и конечной Вселенной, имеются другие галактики. Расстояние до них Хаббл вычислил по цефеидам – пульсирующим переменным звездам, чей период (время между пульсациями) и светимость (полная излучаемая энергия в виде света) пропорциональны. Благодаря этому можно определять расстояния: у цефеид с одинаковым периодом пульсации светимость одинаковая, если же одна из этих звезд кажется более тусклой, значит, она находится дальше от нас, и наоборот. (Видимая яркость объекта убывает обратно пропорционально квадрату расстояния до него.) Таким образом, наблюдая цефеиды, можно вычислить расстояние до галактик, в которых они расположены. Хаббл также обнаружил, что чем дальше отстоят галактики, тем больше их красное смещение. Красный свет имеет наибольшие периоды колебаний и длину волны в видимой части спектра. Красное смещение света можно сравнить с понижением звука сирены

проезжающей мимо нас машины скорой помощи (звук понижается вследствие снижения частоты звуковых волн или увеличения их длины и периода колебаний). Красное смещение галактик показывает: чем больше расстояние между двумя галактиками, тем выше скорость их взаимного удаления, т. е. галактики удаляются друг от друга, разлетаясь в разные стороны.

До того как Эдвин Хаббл обнаружил, что галактики удаляются друг от друга, бельгийский астроном Жорж Леметр и русский физик Александр Фридман независимо друг от друга пришли к выводу, что Вселенная расширяется. Оба ученых использовали общую теорию относительности Эйнштейна, хотя сам Эйнштейн вначале отвергал их расчеты (правда, принял их позднее). Наблюдения Хаббла подтвердили идеи Леметра и Фридмана о расширяющейся Вселенной.

Если Вселенная конечна во времени и пространстве и при этом она расширяется, то, «отмотав назад» ее расширение, мы увидим, что вся ее масса и энергия некогда была сосредоточена в невероятно малой и горячей точке, которую Леметр назвал «космическим яйцом». Начальное расширение этой массы в первые моменты возникновения Вселенной астроном из Кембриджского университета Фред Хойл в насмешку (потому что ему очень не нравилась эта идея) назвал Большим взрывом. Название прижилось, хотя, вопреки фразе, которой я начал главу, слово «взрыв» не совсем подходит для описания этого явления. Взрыв представляет собой ударную волну, вызванную резким разделением газа с высоким давлением и газа с низким давлением, в то время как Вселенная со всей своей массой и энергией была сжата в одной крошечной точке, т. е. Вселенной некуда было распространяться. Расширяясь, Вселенная несет с собой границу нашего мира, за пределами которого нет ни света, ни энергии, ни пространства, ни времени. Представить это весьма трудно, не правда ли?

Наконец, в 1960-е гг. американцы Арно Пензиас и Роберт Уилсон открыли космическое микроволновое фоновое излучение, или реликтовое излучение, – радиационный шум, равномерно заполняющий Вселенную. Это показало, что космическое пространство не является абсолютно мертвым и холодным, с нулевыми показателями температуры и энергии, оно наполнено реликтовым излучением, которое «разогревает» температуру космоса до  $-270$  °С. Это остаточное тепло является доказательством более горячего состояния Вселенной после Большого взрыва.

Теория Большого взрыва, как и позднейшие наблюдения расширяющейся Вселенной, позволяют вычислить возраст Вселенной.

Если мы подсчитаем время, необходимое, чтобы Вселенная выросла с определенной скоростью расширения (названной постоянной Хаббла) из точки до своего сегодняшнего размера, а также учтем ее температуру, то можно предположить, что возраст Вселенной равен примерно 14 млрд лет (плюс/минус 1 млрд). Этот вывод подтверждается астрономическими наблюдениями старейших объектов Вселенной: главным образом это маленькие звезды с низкой скоростью горения (мы еще вернемся к ним в следующей главе). Однако они не могли возникнуть раньше чем через 500 млн лет после Большого взрыва, поэтому по ним нельзя точно определить возраст Вселенной. Сейчас он приблизительно оценивается в 13,8 млрд лет.

Теория Большого взрыва – нечто большее, чем просто описание разрастания Вселенной из крохотной точки до сегодняшнего громадного размера. Череда событий, изменивших ее начальное состояние, определила строение материи и структуру Вселенной. И все это произошло в интервале между первыми ничтожными долями миллисекунды до одной минуты после Большого взрыва. Не углубляясь в дебри, мы можем допустить, что на начальной стадии Вселенная была невероятно плотной и горячей и представляла собой крошечный шарик чистой колоссальной энергии. По мере его расширения и охлаждения появлялись различные состояния вещества, энергии и даже силы природы. Этот процесс отдаленно напоминает остывание пара и превращение его в воду, а затем в лед. Каждый этап ведет к изменению состояния вещества (газообразное, жидкое или твердое) – это называется фазовым переходом. Но в первые моменты Вселенной переходы были куда более странными, а о начальном этапе, из которого они вышли, мы пока ничего не знаем.

Предполагается, что в самый первый момент Большого взрыва температура и давление были столь высоки, что Вселенная, какой бы она ни была, содержала только одну форму энергии, сжатой в невообразимо малую точку, значительно меньшую, чем атом и даже субатомные частицы. В этом состоянии Вселенная пребывала 10–43 секунд (для справки: например, 10–2 – это то же самое, что и 0,01, таким образом, 10–43 равняется единице, отделенной от десятичного знака 42 нулями). Этот отрезок времени называется Планковской эпохой – в честь Макса Планка, немецкого физика XX в., который известен как основоположник квантовой механики. В течение этой эпохи (не могу не заметить, что космологи весьма странно используют такие понятия, как «эпоха» и «эра», что может довести до сумасшествия большинство геологов) все фундаментальные взаимодействия были представлены одной силой. Силы вызывают обмен

частицами; например, магниты прицепляются к вашему холодильнику благодаря обмену фотонами – одновременно являющимися так называемыми «частицами-переносчиками» и частицами света. У других сил имеются свои частицы-переносчики. Если в Планковскую эпоху все эти частицы были одинаковы, значит, одинаковы были и сами силы. Концепция начальной объединенной силы, которую давно ищут физики-теоретики, иначе называется единой теорией поля, или теорией всего. Однако теория, которая объединила бы гравитацию, удерживающую нас на планете, с тремя другими фундаментальными взаимодействиями – электромагнитным (контролирующим взаимодействие между электрическими зарядами и силы магнитного поля), сильным и слабым (контролирующими связь и притяжение субатомных частиц внутри атомного ядра) – пока не сформулирована. Возможно, решить эту сложную задачу помогут такие разделы физики, как теория струн или петлевая квантовая гравитация. Объединение трех фундаментальных взаимодействий, кроме гравитации, лежит в основе теорий Великого объединения и того, что мы называем Стандартной моделью «почти для всего». Обнаружение частицы (бозона) Хиггса, названного в честь британского физика Питера Хиггса, стало огромным шагом вперед в рамках Стандартной модели. Это открытие объясняет, чем обусловлено наличие массы у материи (конкретно «инертной массы», она делает одни объекты при перемещении более тяжелыми, чем другие, и зависит это от степени их взаимодействия с повсеместно распространенным полем Хиггса).

Но я отвлекся от сути. На самом деле мы все еще не знаем, что представляла собой Вселенная в Планковскую эпоху и что было до нее. Так или иначе в конце Планковской эпохи сильно связанная крошечная Вселенная стала нестабильной и произошел Большой взрыв.

Следующие 10–35 секунд Вселенной можно уже и вправду назвать взрывом Большого взрыва, вызвавшим невероятно быстрое расширение. Этот неуловимо короткий период времени называют Космической инфляцией. Она расширила объем Вселенной на много (как полагают, на  $10^{70}$ ) порядков, и хотя сам объем был сравнительно мал (возможно, несколько кубических метров), расширение происходило со скоростью, во много раз превышающей скорость света. Предполагают, что оно началось благодаря высвобождению некой формы энергии, заключенной в едином силовом поле. Она стала источником материи и энергии образовавшейся Вселенной.

Идея быстрого расширения Вселенной стала неотъемлемой частью теории Большого взрыва, без нее трудно объяснить наличие в космосе

повсеместно распространенного электромагнитного излучения, называемого реликтовым. Если за прошедшие 14 млрд лет пустое космическое пространство Вселенной стало примерно одинаковой температуры, значит, разные ее части сообщались друг с другом до того момента, пока Вселенная не достигла столь больших размеров, чтобы сохранить одну и ту же температуру в будущем. Если же части Вселенной с начала времен не сообщались друг с другом, тогда трудно понять, почему сейчас они одной и той же температуры. Космическая инфляция позволила Вселенной распространиться в маленьком конечном объеме, в котором все находилось в контакте и было одной температуры, прежде чем разлетелось в разные стороны.

После расширения плотность высвобожденной распространившейся энергии стала меньше, но этого было достаточно для образования материи. Энергия может превращаться в материю согласно известному уравнению Эйнштейна:  $E = mc^2$ , где  $E$  – энергия,  $m$  – превращенная масса, а  $c$  – скорость света. Первоначальная материя представляла собой «суп» из субатомных частиц, так называемых кварков – строительного материала для протонов и нейтронов, которые, в свою очередь, составляют ядро атома. Однако после расширения осталось еще много чистой энергии в форме фотонов и группы легких частиц – лептонов (электронов – отрицательно заряженных частиц, обращающихся вокруг атомного ядра и отвечающих за протекание электрического тока в проводниках, и нейтрино – обладающих практически нулевой массой частиц, которые прямо сейчас пролетают сквозь ваше тело совершенно незамеченными). Лептоны рассматриваются отдельно от более тяжелых частиц, так как они не могут собраться вместе и составить атомное ядро.

Температура была все еще слишком высокой, чтобы кварки могли соединиться, но следующие 10–5 секунд жизни Вселенной стали богатыми на события. Приблизительно в равных количествах в ней существовали вещество и то, что мы называем антивеществом (например, античастица электрона – позитрон, который обладает такой же массой, но имеет противоположный электрический заряд). После короткого сосуществования вещество и антивещество аннигилировали друг друга. При этом высвобождалось огромное количество энергии и оставалось немного материи. Ее было «чуть» больше – именно поэтому материя сейчас преобладает. Похоже, тогда же возникла и темная материя, которая, как полагают, составляет большую часть массы Вселенной (мы поговорим об этом позже). В последние моменты этого отрезка времени происходило группирование кварков, достаточно охладившихся для объединения в

протоны и нейтроны. Но все же было еще слишком горячо, чтобы нейтроны и протоны смогли образовать атомные ядра, не говоря уже о целых атомах. Протоны и нейтроны называют адронами, поэтому последняя часть этих 10–5 секунд зовется эпохой адронов.

По прошествии этих 10–5 секунд температура оставалась довольно высокой, и у фотонов было достаточно много энергии, чтобы преобразовывать ее в материю и создавать лептоны. Но через секунду Вселенная охладилась, появление лептонов прекратилось, а созданные тогда лептоны сохранились до наших дней (кроме лептонов, созданных в ядерных реакциях). То, что происходило между 10–5 до 1 секунды после Большого взрыва, называют эпохой лептонов.

В промежутке примерно от 1 секунды до 100 секунд Вселенная достаточно охладилась, чтобы нейтроны и протоны смогли объединяться, образуя первые атомные ядра. Но свободный нейтрон по своей природе нестабилен и может распадаться на электрон и протон. Таким образом, по истечении этих 100 секунд нейтронов осталось не так много: из каждых 16 адронов лишь два были нейтронами, а остальные 14 – протонами. В этой порции из 16 адронов два нейтрона могли соединиться с двумя протонами и образовать ядро гелия. Оставшиеся 12 протонов образовали ядра водорода. Таким образом, гелий составлял четверть массы Вселенной (так как четыре из каждых 16 адронов стали гелием), а оставшиеся три четверти приходились на водород (его образовали 12 из каждых 16 адронов). Образовались и другие элементы, такие как литий и более тяжелые разновидности (изотопы) водорода (например, дейтерий, ядро которого содержит и нейтрон, и протон), но в очень малых количествах, потому что Вселенная охладилась слишком быстро, чтобы могло сформироваться большее количество этих веществ. То, что массовая доля элементов во Вселенной осталась неизменной с тех самых пор, а именно примерно 75 % водорода, 25 % гелия и крайне небольшое количество более тяжелых элементов (подробнее об этом ниже), является еще одним, причем успешно проверенным, аргументом в пользу теории Большого взрыва.

На протяжении последующих 100 000 лет Вселенная была еще слишком горячей, чтобы атомные ядра могли захватить электроны и образовать целый атом. Плотность материи и энергии фотонов была достаточно высокой, чтобы они «застряли» друг в друге. Это означает, что материя была слишком плотной и потому непрозрачной, а энергии было слишком много, чтобы позволить материи собраться в нечто большее, чем существующие отдельно друг от друга атомные ядра и электроны. Это время обычно называют радиационной эрой или стадией радиационного



доминирования, так как Вселенная была пронизана фотонами. Примерно через 100 000 лет после Большого взрыва масса и плотность фотонов уменьшилась настолько, что свет смог отделиться от материи. А когда после Большого взрыва прошло около 380 000 лет, Вселенная достаточно охладилась, чтобы ядра смогли соединиться с электронами и образовать атомы. С этого момента начинается эра доминирования вещества, в которой мы в общем-то и живем. Благодаря этому последнему соединению высвободилось большое количество энергии, остатки которой наблюдаются сейчас в виде реликтового излучения. Это окончательное соединение атомов и высвобождение энергии может содержать следы слегка небольшой комковатости кварковой плазмы после эпохи быстрого расширения. Таким образом, малые флуктуации яркости космического реликтового излучения – это сильно расширившиеся следы ранних флуктуаций плотности вещества.

По окончании стадии радиационного доминирования и высвобождения энергии от соединившихся атомов свет отделился от вещества, и Вселенная на 300 млн лет погрузилась во тьму. Этот период называется Темными веками. Коротко говоря, Вселенная остыла, и материя рассеялась настолько, что в тот период не было источников света.

В конце Темных веков слабые флуктуации в плотности водорода и гелия вызвали повышенное гравитационное притяжение к более плотным участкам, которые притягивали все больше вещества. Дополнительное количество вещества вызвало «сгущение» этих флуктуаций, увеличение массы и т. д., что впоследствии привело к появлению гравитационно-связанных структур в форме огромных межзвездных облаков. В этих газовых облаках начали формироваться первые звезды.

По-видимому, первые звезды состояли только из водорода и гелия, а их формирование обозначило окончание Темных веков – 300 млн лет после Большого взрыва. После того как самые массивные из первых звезд закончили свою эволюцию и взорвались, создав более тяжелые химические элементы (подробно об этом в следующей главе), более маленькие звезды начали формироваться в этих огромных межзвездных облаках, становясь гравитационно-связанными системами – первыми галактиками, пик появления которых пришелся на период между 1–3 млрд лет после Большого взрыва. Хотя галактики во Вселенной разлетаются, они не находятся в состоянии полностью свободного плавания, их группы гравитационно связаны друг с другом, образуя скопления галактик. Сами эти скопления связаны друг с другом вдоль галактических нитей, пронизывающих нашу Вселенную. Сети этих нитей являются

крупнейшими структурами во Вселенной, а в промежутках между ними находятся пустые пространства космоса (войды).

Наша Галактика, Млечный Путь, связана с галактикой Андромеды (в отдаленном будущем они могут даже столкнуться). Обе они являются крупными галактиками в скоплении Девы, которое может быть частью еще большего скопления под названием Ланиакея. Тем не менее, после того как через миллиард лет после Большого взрыва возникли первые галактики, потребовалось еще 1–2 млрд лет, чтобы сформировались скопления галактик и галактические нити.

Галактики сегодня не одинаковы по форме и размеру, но в то же время они не образуют совершенно случайные фигуры. Самые большие из них – эллиптические галактики, которые представляют собой сферические шары из звезд, обращающиеся вокруг центра по хаотически ориентированным орбитам. Распространенными видами галактик являются дисковые, спиральные, а также спиральные галактики с перемычкой – плоские и обращающиеся вокруг массивного тела, находящегося в их центре, например Млечный Путь или Андромеда. Гигантское облако из газа и звезд, сформировавших спиральную галактику, уплотнялось под действием своей гравитации, но центробежная сила препятствовала сжатию перпендикулярно оси вращения, позволяя облаку сжиматься параллельно оси, создавая таким образом форму плоского диска (это похоже на формирование Солнечной системы, о чем мы поговорим позднее). В центре сжимающегося облака всегда собирается большая часть массы: в Солнечной системе это Солнце, а в галактиках масса их центра столь велика, что там образуется сверхмассивная черная дыра – объект настолько тяжелый, что даже свет не может преодолеть его притяжение, если подойдет слишком близко.

Обычно диаметр галактик составляет около 100 000 световых лет (1 световой год – это расстояние, которое проходит свет за 1 год, примерно 10<sup>13</sup> км или 10 трлн км; для сравнения: Нептун, самая далекая от нас планета, находится на расстоянии 4,5 млрд км от Солнца, что в 2000 раз меньше светового года). Наша галактика содержит в себе сотни миллиардов звезд. Однако, по некоторым данным, можно предположить, что масса звезд составляет лишь крохотную долю общей массы галактики. Галактики содержат огромное количество скрытой массы, которую называют темной материей.

В 1960-х гг. американский астроном Вера Рубин и ее коллеги обнаружили, что в спиральных, дисковых и спиральных с перемычкой галактиках большинство звезд обращаются вокруг галактического центра

почти с одинаковой скоростью независимо от расстояния от центра галактики, и это сильно отличается от обращения планет Солнечной системы вокруг Солнца. Орбитальные скорости планет уменьшаются с удалением от светила, ведь единственная сила, удерживающая их на орбите, – это гравитационное притяжение Солнца, которое слабеет по мере увеличения расстояния (это называют Кеплеровым движением – в честь Иоганна Кеплера и его законов движения планет по орбитам). Одинаковая орбитальная скорость звезд означает, что чем дальше они находятся от галактического центра, тем бóльшая масса должна содержаться внутри их орбиты, чтобы сохранялась гравитационная связь с галактикой. Однако, чтобы звезды продолжали двигаться таким образом, требуется намного бóльшая масса, чем та, которую мы можем наблюдать. Это указывает на присутствие темной материи, которая и составляет остальную часть необходимой массы.

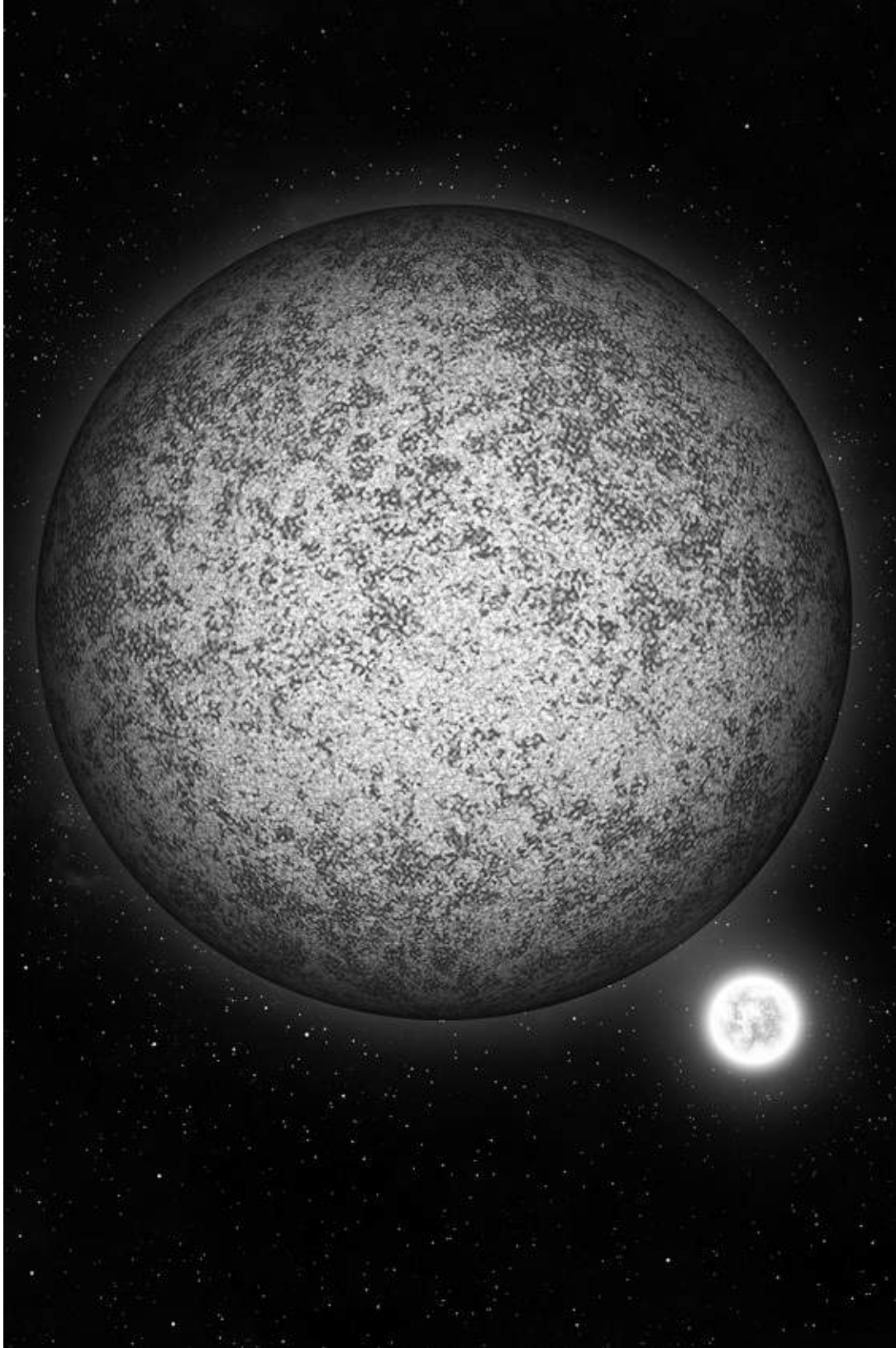
Астрономы также заметили, что относительные скорости галактик внутри скоплений слишком высоки, чтобы оставаться гравитационно связанными друг с другом, если их масса состоит только из наблюдаемой звездной массы. Таким образом, звездные скопления могут быть стабильными и не разлетаться, только если они содержат гораздо больше массы, чем та, которую мы наблюдаем. Есть и другие данные, подтверждающие наличие темной материи, например гравитационное линзирование, из-за которого свет искривляется, проходя мимо таких массивных объектов, как скопления галактик.

Эта невидимая темная материя, удерживающая вместе галактики и скопления галактик, не наблюдается ни в одном из диапазонов электромагнитного спектра – от микроволнового до инфракрасного и ультрафиолетового излучения. Однако в последние годы ученые пришли к выводу, что бóльшая часть материи в космосе – именно темная и первые галактики состояли по большей части из нее, а не из водорода и гелия. Пока остается загадкой, что же она из себя представляет, поскольку мы не можем наблюдать ее непосредственно.

Поскольку Вселенная после Большого взрыва продолжает расширяться, резонно задаться вопросом о ее будущем. Если расширение Вселенной замедляется под действием собственной гравитации, хватит ли начальной взрывной энергии, чтобы продолжать расширяться, или же это расширение «выдохнется» и гравитация заставит Вселенную сжаться обратно в точку? Недавние исследования говорят нам, что ни одна из этих гипотез не верна. Расширение Вселенной не замедляется, а ускоряется. Прежде гравитацию считали единственной силой, действующей на

большие расстояния, она должна была бы замедлять скорость расширения Вселенной (и, возможно, привести к ее сжатию) под действием собственной массы. Ускоренное расширение Вселенной стало немалым сюрпризом и свидетельством действия не обнаруженной до сих пор силы. Создающее ее энергетическое поле фактически создает и давление, разгоняющее Вселенную все быстрее. Это поле назвали темной энергией. («Темная энергия» и «темная материя» называются темными не потому, что они как-то похожи друг на друга, а потому, что их нельзя увидеть с помощью света.) Темная энергия – сверхдальнодействующая сила, которая обнаруживается только на уровне сверхскоплений галактик. Вероятно, она не играла особой роли, пока Вселенная не расширилась до достаточно больших размеров. Преобладание темной материи над гравитацией (и наблюдающееся в результате расширение Вселенной), предположительно началось около 4 млрд лет назад, после формирования Солнечной системы. В некотором смысле расширение Вселенной похоже на то, как вода постепенно заполняет таз, пока не доходит до краев и не выливается с другой стороны.

Учитывая объем Вселенной, в котором имеется темная энергия, можно сделать вывод, что она занимает примерно 70 % содержимого (вместе взятых массы и энергии) Вселенной, при этом темная материя составляет 25 % объема, а оставшиеся 5 % – это обычная барионная материя, из которой состоят звезды, планеты и мы с вами. (Хотя большая часть этой материи по-прежнему представлена водородом и гелием.) Темная материя и темная энергия дают о себе знать только в масштабах галактик и их скоплений – совсем не те уровни, которые мы могли бы как-то чувствовать, наблюдать или понять интуитивно. Гравитация, пожалуй, единственная сила, которую мы физически ощущаем и с которой постоянно сталкиваемся – например, когда встаем с кровати, поднимаемся по лестнице или наливаем кофе. А будь мы размером с букашку или микроба, для нас важнее было бы электромагнитное излучение, которое вызывает статическое электричество и поверхностное напряжение воды. Гравитация была бы для нас менее важна и едва заметна. (Муравей легко взбирается вверх по стене и ничуть не пострадает, упав с высотного здания.) В общем, пока мы находимся на крайне низком, микроскопическом уровне понимания природы темной материи и темной энергии.



## 2. Звезды и элементы

Темные века ранней Вселенной закончилась, когда огромные облака

водорода и гелия (и темной материи), сжимаясь под воздействием собственного гравитационного притяжения, начали формировать первые звезды, а затем и галактики. Похожее звездообразование происходит и сейчас, одним из примеров является туманность Орла в нашей Галактике, которая до сих пор «штампует» новые звезды и звездные системы. Как мы уже отмечали, первые такие газовые облака состояли только из диффузной космической материи (если не считать темную материю), в основном в виде водорода и гелия, и потому не содержали ничего, из чего могли бы сформироваться планеты. Формирование первых и последующих за ними звезд обусловило появление более тяжелых элементов, из которых были созданы планеты и все живущее на них.

Когда протосолнечное облако начинает сжиматься под воздействием собственного гравитационного притяжения, молекулы устремляются к его центру с возрастающей скоростью – как шарик, катящийся с горки. Ускоряясь, они сталкиваются и отскакивают друг от друга, и энергия их движения преобразуется в тепло. Это повышает температуру и давление облака и в конце концов останавливает сжатие. (Размеры, формы и эволюцию этих облаков мы обсудим в следующей главе.)

Облако не может долго сжиматься под воздействием собственных гравитационных сил, в какой-то момент коллапс останавливается. Это зависит от размера. Не слишком массивное облако вообще не сжимается, а чем больше его масса, тем больше внутренняя гравитация, такое облако уплотнится еще до того, как внутри него станет слишком горячо.

Некоторые процессы помогают облаку избежать коллапса. Большая часть облака – это водород, молекулы которого состоят из двух связанных между собой атомов водорода. Если центр коллапсирующего облака становится достаточно горячим, чтобы молекулы водорода смогли распасться на атомы, этот распад поглотит энергию и не даст облаку нагреваться, позволяя ему продолжить существование.

Это похоже на фазовый переход, который происходит в кипящей воде (мы использовали такую аналогию при описании Большого взрыва). Тепловая энергия плиты передается воде, и вода закипает. Но превращение воды в пар поглощает энергию, и температура кипящей воды остается неизменной, пока вся вода не выкипит. Таким же образом превращение молекулярного водорода в атомарный поглощает тепловую энергию уплотняющегося облака и сохраняет его температуру стабильной, пока конверсия – в той части облака, которая стала достаточно горячей, – не завершится. То же происходит позже и в центре облака, где среда еще горячее и температура достаточно высока, чтобы атомы водорода

испускали электроны и становились ионами. Это происходит по принципу «фазового перехода», выравнивающего температуру.

Поэтому только очень большие молекулярные облака могут коллапсировать сами по себе. Первые звезды, которые полностью состояли из водорода и гелия (их называют звездами населения III, сегодня это «исчезнувший вид»), формировались в облаках, в тысячи и даже миллионы раз более массивных, чем Солнце, и были в сотни раз тяжелее его. Небольшим облакам, чтобы они продолжили сжатие, после того как станут достаточно плотными, необходим триггер, воздействие извне (к примеру, смерть гигантских звезд, которая часто сопровождается вспышками сверхновых). Распространяющиеся при этом ударные волны могут задеть молекулярное облако и запустить его коллапс. С такого стечения обстоятельств началось формирование первых малых звезд, которые живут очень давно и являются одними из основных доказательств возраста Вселенной. Части метеоритной пыли содержат доказательство того, что Солнечная система образовалась именно так. Мы еще вернемся к этому вопросу.

Если все условия выполнены и коллапсирующее облако достигает пика температуры (10 млн градусов по Цельсию), начинается рождение звезды. При такой температуре ядра ионизованного водорода начинают двигаться достаточно быстро, преодолевают электрическое отталкивание друг от друга (на этой стадии ядра представляют собой протоны, они несут положительный заряд и потому взаимно отталкиваются) и соединяются с гелием, ядра которого, как правило, состоят из двух протонов и двух нейтронов. При ядерном синтезе выделяется огромное количество энергии за счет перехода массы в энергию. Мы уже упоминали известное уравнение Эйнштейна  $E = mc^2$ , где  $E$  – это энергия,  $m$  – масса,  $c$  – скорость света, равная примерно 300 000 км/с (и достаточная, чтобы за секунду восемь раз облететь вокруг Земли). С учетом огромной величины  $c^2$  превращения всего 1 мг (масса крохотной таблетки) в энергию будет достаточно, чтобы испарить 40 000 л воды, а преобразование в энергию 60 мг массы (небольшая упаковка таблеток) полностью превратит в пар воду олимпийского бассейна. Процесс термоядерной реакции был открыт в 1920–1930-е гг. и впоследствии использовался для разработки теории звездного ядерного синтеза (в основном физиком Хансом Бете и астрофизиком Фредом Хойлом, хотя ранее идею нуклеосинтеза высказывал астроном Артур Эддингтон). Эту теорию мы здесь и излагаем.

В коллапсирующем протосолнечном облаке первый переход массы в энергию происходит потому, что масса четырех атомов водорода немного

больше, чем масса одного атома гелия, и вся ненужная оставшаяся масса превращается в энергию. Этот колоссальный выброс тепла останавливает дальнейшее сжатие облака и удерживает температуру примерно на уровне 10 млн градусов Цельсия (температура внутри солнечного ядра равна 15 млн градусов Цельсия). Переставшее уплотняться облако по сути уже является звездой, например, Солнце – это плотное облако газа, прекратившее сжатие из-за тепла, высвобожденного в результате термоядерной реакции.

Эта термоядерная реакция может происходить только в самой глубокой и самой горячей части звезды – в ее ядре. Снаружи ядра температура недостаточно высока для термоядерного процесса, но благодаря конвекции – переносу горячих плавучих масс к внешним слоям, из-за чего Солнце выглядит зернистым, – жар от ядра поднимается к поверхности светила и улетучивается вместе с радиацией или фотонами, достигая Земли в виде солнечной энергии (света). Солнце испускает и более тяжелые электроны и протоны, которые разлетаются с солнечным ветром и в конце концов попадают на Землю и другие планеты.

Сжатие звезд размером с Солнце или меньшего размера (красные карлики) останавливается благодаря «средней» температуре, поддерживаемой синтезом атомов водорода. За счет водорода эти малые звезды смогут гореть весьма долго, ведь синтез атомов водорода процесс не быстрый, нельзя просто взять и соединить четыре ядра атомов водорода (или четыре протона), чтобы сразу создать ядро атома гелия. Этот процесс, называемый протон-протонной цепочкой, протекает в несколько этапов. Первые два протона, преодолевая электрическое отталкивание, сливаются, создавая двупротонное ядро – легкий изотоп гелия. (Различные изотопы одного элемента имеют атомные ядра с одинаковым числом протонов, но с разным числом нейтронов, которые в силу своей нейтральности не влияют на химические свойства элемента. Все изотопы гелия имеют два протона, но при этом могут иметь от нуля до восьми дополнительных нейтронов, хотя только изотопы с одним и двумя нейтронами не распадаются.) Это легкое ядро гелия неустойчиво, и срок его жизни недолог. Оно испускает некоторое количество антивещества, позитронов, а также нейтрино, которые становятся частью солнечных нейтрино, превращая один из своих протонов в нейтрон и оставляя изотоп водорода, называемый дейтерием, с одним протоном и одним нейтроном. Затем дейтерий сталкивается и сливается с третьим протоном (ядром атома водорода), создавая еще один стабильный изотоп гелия с двумя протонами и нейтроном. На последнем этапе сталкиваются эти два вида ядер гелия и, испуская два других



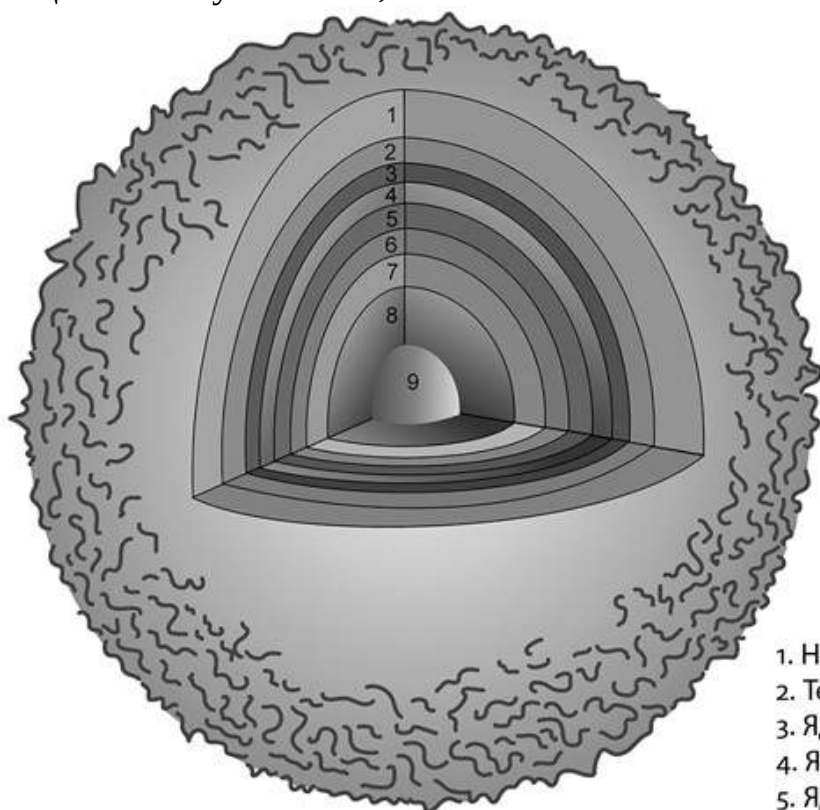
протона, создают другую форму стабильного гелия с двумя нейтронами и двумя протонами. При этом высвобождается большое количество энергии, и два освобожденных протона начинают сталкиваться с другими протонами, вызывая медленную цепную реакцию. Образовавшиеся ядра гелия с двумя нейтронами и двумя протонами называются альфа-частицами, они часто образуются при распаде тяжелых элементов, таких как уран.

Быть может, мы слишком углубились в тему термоядерных реакций, но она заслуживает нашего внимания по двум причинам. Во-первых, термоядерные реакции являются основным источником энергии, питающим Солнце, а значит, и жизнь на Земле. Они влияют на различные процессы в океанах и атмосфере – на морские течения, погодные условия, даже на особенности климата. Во-вторых, протон-протонная реакция – очень медленный процесс: весь водород Солнца сможет прогореть только за 10 млрд лет, а сейчас наша звезда достигла лишь половины этой отметки; и это хорошо, потому что дает достаточно времени для развития сложных форм жизни – таких, как мы с вами. Но строительный материал для новых планет звезды малого размера, как наше Солнце, не вырабатывают – они создают лишь новые атомы гелия, которые и так есть во Вселенной с момента Большого взрыва. Такие звезды, как Солнце, ничем не примечательны, по крайней мере с точки зрения создания новой материи.

Звезды с большей массой, которая в 15 и более раз превышает массу Солнца, не прекращают уплотняться при ничтожной температуре в 10–15 млн градусов Цельсия. Их гравитационное сжатие остановится только при более высоких температурах, при которых в результате термоядерных реакций могут образоваться более тяжелые элементы. Например, при 100 млн градусов Цельсия в звездах может происходить слияние ядер гелия, в результате чего образуется углерод и затем кислород. В самых больших звездах, красных сверхгигантах, температуры столь высоки, что позволяют образовывать всевозможные элементы вплоть до железа.

Некоторые из важнейших ядерных реакций, при которых образуются тяжелые элементы, происходят путем слияния ядер гелия, так называемых альфа-частиц (каждое из них, как мы упоминали выше, имеет два нейтрона и два протона). Одна такая реакция называется тройной гелиевой – тройным альфа-процессом. Она проходит в два этапа, в результате чего из трех альфа-частиц образуется углерод. Эта реакция довольно сложная и редкая, что ограничивает формирование тяжелых элементов в больших количествах. Но как только появляется углерод, альфа-цепочка продолжается, последовательно добавляя по одной альфа-частице за раз

вначале к углероду, производя кислород, потом неон, магний и кремний и так далее до железа, хотя по идее вначале появляются неустойчивые изотопы никеля, распадающиеся благодаря радиоактивности на стабильные изотопы железа. Процессы каждого последующего шага требуют все более высокой температуры и давления. Поэтому они происходят во все более глубоких и горячих слоях гигантской звезды, напоминающих слои луковицы. Чем глубже слой, тем более тяжелые элементы там появляются.



1. Несгораемый водород
2. Термоядерная реакция
3. Ядерное горение гелия
4. Ядерное горение углерода
5. Ядерное горение кислорода
6. Ядерное горение неона
7. Ядерное горение магния
8. Ядерное горение кремния
9. Железное ядро

Слоистая структура гигантских звезд напоминает луковицу. Каждый более глубокий и горячий слой – это фабрика, перерабатывающая более легкие элементы из наружных слоев в тяжелые: водород – в гелий, гелий – в углерод и так далее, вплоть до железа. Многие реакции включают слияние с ядрами гелия в альфа-процессах, создавая элементы, необходимые для возникновения планет и жизни, – углерод, кислород, магний, кремний и т. д. (С разрешения Барбары Шеберл, Animated Earth LLC.)

Самый верхний слой «звездной луковицы» достаточно горяч, чтобы поддерживать реакцию превращения водорода в гелий и снабжать этими

частицами более глубокие слои. Если бы этот слой производил гелий так же медленно, как Солнце, это помешало бы образованию тяжелых элементов во внутренних слоях или, по крайней мере, сильно бы затормозило процесс (при высоких температурах и давлении реакции протекают быстрее и запасы гелия быстро исчерпались бы). Но реакция в звездах-гигантах идет быстрее из-за участия углерода, азота и водорода в так называемом углеродном цикле. Водород быстро превращается в гелий, или альфа-частицы, и перемещается во внутренние слои звезды.

В самом глубоком и горячем слое, у ядра звезды, распадаются неустойчивые изотопы никеля и образуются стабильные изотопы железа. На этом образование элементов путем слияния легких ядер заканчивается. Формирование любого элемента тяжелее железа требует «создать» массу, так как масса этого нового элемента будет больше массы его компонентов. Значит, при его формировании энергия будет поглощаться, а не выделяться. Образование ядер тяжелых элементов ведет к снижению температуры, и термоядерная реакция прекращается.

Некоторые элементы, наиболее распространенные в Солнечной системе (после водорода и гелия, конечно), полностью состоят из альфа-частиц и являются главными строительными кирпичиками планет и жизни: углерод, кислород, кремний, магний, кальций и железо. Возможно, это объясняет, почему жизнь зиждется на углероде. Углерода во Вселенной много, это один из первых устойчивых элементов в цепи производства альфа-частиц. Атом углерода входит в состав многих химических соединений, в частности, соединяется с вездесущим водородом, образуя органические вещества, которые являются основой жизни. Другие важные для жизни элементы, такие как азот и фосфор, появляются в результате других термоядерных реакций, особенно в соединениях с водородом. Таким образом, дорогой читатель, все атомы твоего тела, кроме возникшего вместе с Большим взрывом водорода, появились в недрах гигантских звезд. Трудно в это поверить, но должен же ты был откуда-то произойти.

В знаменитой Периодической системе химических элементов, составленной русским химиком Дмитрием Менделеевым, присутствуют все известные нам элементы. Многие из них значительно тяжелее железа, но по сравнению с другими элементами встречаются они в малых количествах. Дело в процессе, называемом нейтронным захватом. Известны две его разновидности: при происходящем внутри звезд медленном захвате нейтронов ядра атомов железа соединяются с нейтронами, оставшимися после термоядерных реакций. Тяжелые изотопы железа, как правило, нестабильны и обычно испускают электрон, при этом

один из нейтронов превращается в протон и создается более тяжелый по сравнению с железом элемент. Эти элементы, в свою очередь, захватывают все больше нейтронов, создавая все более и более тяжелые элементы. Вторая форма, быстрый нейтронный захват, происходит во время коллапса гигантских звезд.

Через 5 млрд лет наше Солнце сожжет весь имеющийся в его ядре водород и умрет. Термоядерные реакции прекратятся, и Солнце вновь начнет сжиматься, продолжая свой начавшийся 5 млрд лет назад коллапс. Однако оно будет все еще очень горячим, и возобновленный коллапс может нагреть его до 100 млн градусов Цельсия. Это позволит превращать гелий в углерод, а затем в кислород, как это происходит в звездах-гигантах. В этот момент Солнце расширится до размеров красного гиганта (не путать с красным сверхгигантом) и поглотит ближайшие объекты Солнечной системы, включая Землю. Из-за ядерного горения гелия, или реакции альфа-процесса, топливо в солнечном ядре быстро прогорит, последует сжатие, но оно уже не нагреет Солнце до температур, при которых вновь начнутся термоядерные реакции создания тяжелых элементов. Наша звезда будет уже, по сути, мертва. Когда остатки водорода и гелия иссякнут, она станет медленно остывающим, светящимся, очень плотным объектом, состоящим из углерода и кислорода, – белым карликом, который будет меньше Солнца примерно в 100 раз.

Гибель гигантских звезд при всей своей катастрофичности для Вселенной событие продуктивное. Исчерпав топливо для термоядерных реакций, гигантская звезда начинает вновь сжиматься. Она так огромна, что коллапс получается внезапным и очень мощным, и столкновение внешнего слоя звезды с более плотным ядром вызывает мощную ударную волну и вспышку сверхновой. Во время вспышки протекает быстрый процесс захвата нейтронов: они присоединяются к атомам, образуя химические элементы тяжелее железа. Вспышки сверхновых выбрасывают в межзвездное пространство продукты термоядерного синтеза, произведенные во всех слоях этих звезд. Они образуют новое поколение молекулярных облаков с более тяжелой пылью, облака сформируют звездные системы, полные материала для образования планет. Вспышки сверхновых могут запускать коллапс протосолнечных облаков. Судя по всему, именно так образовалась Солнечная система. Об этом говорит, например, то, что частички космической пыли в некоторых метеоритах содержат тяжелые изотопы железа, которые могли образоваться только при вспышке сверхновой.

Большая часть массы гигантской звезды выбрасывается в

пространство во время вспышки сверхновой, то, что остается, сжимается в чрезвычайно плотную массу. Если она в два-три раза больше массы Солнца, электронное облако, сохраняющее объемы атомов, не может противостоять внутреннему давлению массы, электроны сходят с орбит и «вдавливаются» в ядро, превращая протоны в нейтроны. Радиус атома примерно равен  $10^{-10}$  м (1 ангстрем,  $1\text{\AA}$ ), а радиус его ядра –  $10^{-15}$  м – отличие, как между стадионом и муравьем. Поскольку радиус и объем каждого атома сожмутся в  $10^5$  раз, плотность вещества (т. е. масса, поделенная на объем) возрастет в  $10^{15}$  раз, т. е. в квадриллион раз! Образовавшееся сверхплотное тело ученые называют нейтронной звездой. Ее плотность столь высока, что, если бы мы наполнили таким веществом обычную пипетку, она весила бы больше, чем все население Земли.

Если оставшаяся масса нейтронной звезды превышает массу Солнца более чем в три раза, нейтроны сожмутся в еще более плотную массу, предположительно состоящую из кварков. Такой объект называют кварковой звездой, ее существование пока не подтверждено наблюдениями.

Наконец, если оставшаяся масса превысит пять солнечных масс, тогда даже кварки не могут сопротивляться дальнейшему сжатию и масса уплотнится до крошечного объема, образовав ядро черной дыры. Ее гравитационное притяжение так велико, что даже свет не может покинуть ее центр. Граница в пространстве-времени, начиная с которой свет не может покинуть объект, называется горизонтом событий. У нас есть доказательства того, что черные дыры действительно существуют, в том числе и сверхмассивные, находящиеся в центрах галактик.

Эта предсмертная агония сверхмассивных звезд играет важную роль в нашей «истории всего», ведь эти звезды производят «строительные блоки» для планет и жизни и распространяют их по галактике благодаря вспышкам сверхновых. Для формирования планет (и лично тебя, дорогой читатель) звезды должны в огромных количествах производить элементы тяжелее водорода и гелия и испускать их, чтобы образовались новые пылевые облака. В одном таком облаке около 5 млрд лет назад сформировалась наша Солнечная система. Необходимо много сверхмассивных звезд, чтобы они создали и распространили в галактике нужные элементы. И это должно происходить часто, чтобы галактику заполнили пылевые облака, из которых впоследствии сформируются планеты.

В нашей Галактике совсем неподалеку от нас обнаружено большое число планетных систем; скорее всего, они формируются часто, и во Вселенной для этого достаточно нужного материала. Если бы сверхмассивные звезды жили столько же, сколько и звезды малой массы,

некоторые из них все еще выбрасывали бы в пространство тяжелые элементы. Но из-за высоких температур и давления сверхмассивные звезды – как и самые первые звезды, образовавшиеся через сотни миллионов лет после Большого взрыва, – быстро, по космическим меркам, сгорели. Процесс выгорания водорода, в результате которого образуются элементы тяжелее железа, так скоротечен, что звезды за несколько миллионов лет успевают израсходовать запас горючего и взорваться, образуя новые протопланетные облака. Рождаясь и умирая, сверхмассивные звезды за несколько миллиардов лет производят достаточно пылевых облаков, чтобы формировались планетарные системы – как наша около 5 млрд лет назад. Пик звездообразования, возможно, был достигнут 10 млрд лет назад, так что мы вступили в космическую игру с некоторым опозданием.



3. Солнечная система и планеты  
Солнечная система и Земля сформировались около 5 млрд лет назад,

когда Вселенной уже исполнилось 9 млрд лет. Вопрос о возрасте Солнечной системы и нашей планеты сопровождался не меньшим количеством открытий и дебатов, чем споры о возрасте Вселенной. Известно, что взгляд ученых на возраст Земли вступает в конфликт с религиозной доктриной, однако одна из самых известных и продолжительных дискуссий произошла не между учеными и богословами, а в научной среде.

В XIX в. уже упоминавшийся в главе 1 британский физик Уильям Томсон, он же лорд Кельвин, подсчитал, что некогда расплавленная Земля, остывая под воздействием холодной среды (космоса, атмосферы, океана и т. п.), должна была достичь современной температуры примерно за 20 млн лет. Из этого Кельвин сделал вывод, что Земля моложе, чем принято было считать в его время. Заодно он пересчитал возраст Солнца. Кельвин был убежден, что Солнце вырабатывает тепло только благодаря коллапсированию, вызванному гравитационным сжатием (о реакции ядерного горения водорода тогда не знали). Учитывая размер Солнца и его светимость, ученый ограничил возраст нашей звезды теми же 20 млн лет. Это намного больше 6000 лет, что высчитал, основываясь на Библии, Джеймс Ашшер, но геологи и эволюционные биологи не верили Кельвину и продолжали считать, что Земля должна быть еще старше.

Ученые-геологи, включая и Чарльза Дарвина, вычислили, что для образования осадочных слоев в горах и каньонах потребовались бы как минимум сотни миллионов лет, особенно учитывая низкую скорость отложения осадочных пород реками и наводнениями. Биологи также полагали, что Земле не меньше нескольких сотен миллионов лет: при черепашьей скорости биологических мутаций биологическое разнообразие и богатая палеонтологическая летопись планеты не могли быть созданы за меньшее время. Но лорд Кельвин с высоты своего научного авторитета не счел эти доказательства убедительными. Споры между физиками и геологами, иногда ожесточенные, продолжались десятилетиями. В конце концов выяснилось, что все были не правы.

Точку в спорах о возрасте Земли поставило открытие ядерного распада радиоактивных элементов. Радиоактивность была открыта в конце XIX в. Анри Беккерелем и Мари и Пьером Кюри. Их исследования, удостоенные Нобелевской премии, показали, что атомы некоторых элементов, например урана, нестабильны и могут, испуская частицы из ядра, спонтанно трансформироваться в другие элементы. А поскольку множество радиоактивных элементов обнаруживается в скальных породах, ученые предположили, что внутренний слой Земли должен быть в высокой степени



радиоактивен. Тепла, выделяемого излучаемой энергией частиц во время радиоактивного распада, могло быть достаточно, чтобы поддерживать Землю достаточно горячей (до ее сегодняшней температуры), даже если некогда расплавленная планета остыла миллиарды лет назад. Этот аргумент, впервые высказанный британским физиком Эрнестом Резерфордом, однако, не выдерживает критики, потому что Земля, похоже, имеет намного меньшую концентрацию радиоактивных элементов, чем думали раньше. Более того, если принять кельвиновскую модель статичной Земли, радиоактивность можно было вообще не брать в расчет. Британские ученые Джон Перри и Осмонд Фишер предположили, что теплообмен внутри Земли, при котором горячие массы поднимаются вверх, а холодные опускаются (этот процесс называется конвекцией), делает теорию Кельвина несостоятельной. Потеря тепла Землей могла продолжаться миллиарды лет благодаря подъему на поверхность более горячих масс от центра планеты. Открытие в 1920–1930-х гг. термоядерных реакций привело к осознанию, что Солнце вырабатывает энергию не из-за постоянного гравитационного сжатия, а из-за реакции горения водорода (мы затрагивали эту тему в главе 2), и это горение может длиться миллиарды лет.

Окончательная точка в полемике была поставлена лишь к середине XX в., когда возраст Земли был весьма точно подсчитан благодаря методу радиоизотопного (радиометрического) датирования скальных пород и метеоритов. Он основан на том, что, распадаясь, радиоактивные элементы превращаются из элементов с материнскими ядрами (например, уран) в элементы с дочерними ядрами (например, свинец). Относительное количество материнских и дочерних атомов в отдельно взятом образце может быть использовано для определения его геологического возраста: чем больше дочерних атомов по сравнению с материнскими, тем образец старше. Подсчет соотношения материнских и дочерних атомов, а также определение скорости распада, так называемый период полураспада, помогают вычислять возраст достаточно точно. Согласно этому методу возраст Земли и Солнечной системы был единодушно определен на отметке 4,6 млрд лет, и хотя столь старых скальных пород на Земле не существует, они находятся в метеоритах, большинство из которых являются кусками камней, падавших на нашу планету из пояса астероидов.

Наша Солнечная система сформировалась около 5 млрд лет назад в результате коллапса гигантского газопылевого облака. Он был вызван ударной волной от вспышки сверхновой звезды. Доказательством могут служить крошечные алмазы, вкрапленные в метеориты вместе с тяжелыми изотопами железа, которые могли сформироваться только во время

вспышки сверхновой. Обычно размер коллапсирующего пылевого облака, из которого формируется звезда размером с наше Солнце, – 1–3 световых года в диаметре, что многократно превышает размер Солнечной системы. Чтобы образовались звезды большей массы, облако должно достигать десятков световых лет в диаметре. Но и эти гигантские размеры ничто по сравнению с протяженностью Галактики – примерно 100 000 световых лет.

Лишь небольшая часть пылевого облака – облачное ядро – в итоге становится планетарной системой. После коллапса, приведшего к образованию Солнечной системы, большая часть массы ядра облака сместилась в центр, где образовалось Солнце (этот процесс описывался в предыдущей главе). Лишь ничтожно малая часть массы, порядка 0,1 % от массы Солнца, досталась планетам Солнечной системы.

Все основные планеты Солнечной системы обращаются вокруг Солнца в пределах почти плоского диска, который называется эклипстикой. Считается, что Солнечная система приняла дискообразную форму благодаря медленному вращению и постепенному сжатию космического облака, из которого она образовалась. По мере сжатия скорость вращения облака возрастала – так, фигурист, выполняющий «винт», ускоряется, прижимая к груди распростертые руки. Облако вращалось все быстрее и быстрее, но одновременно росла и центробежная сила, «разносящая» материю к краям экватора, перпендикулярно оси вращения. Однако центробежная сила не действует вдоль оси вращения. Поэтому облако продолжало сокращаться вдоль оси, но сохраняло свою форму перпендикулярно ей, постепенно образуя диск. Из остатков вещества, которые сохранились в плоскости диска и продолжали обращаться вокруг Солнца, сформировались планеты Солнечной системы.

Однако, как ни привлекательна гипотеза о пыльном космическом облаке, «сплюсненном» в диск благодаря вращению, она приводит к серьезным парадоксам. Если бы такое облако действительно вело себя, как фигурист, выполняющий «винт», то Солнечная система сегодня вращалась бы намного быстрее и под воздействием центробежной силы не сжалась бы до нынешнего, весьма небольшого, размера. Даже если бы изначально облако вращалось очень медленно, сжатие должно было охватить огромные расстояния, и потому наше облако уже нельзя сравнить с обычным фигуристом, который в «винте» подтягивает ничем не занятые руки к корпусу, – скорее это фигурист, у которого на руках повисли стопудовые гири, а сами руки при этом раскинуты на многие километры.

Отдаленные туманности, похожие на облако, из которого родилась Солнечная система, вращаются крайне медленно. Энергия вращения,

особенно кинетическая, обычно составляет несколько процентов от общей энергии облака и по природе своей является преимущественно гравитационной – полученной в результате сжатия облака, разогревающей газ и запускающей термоядерные реакции водорода и формирование звезд. Если бы гигантское облако сжалось до размеров Солнечной системы, даже такая небольшая энергия вращения заставила бы Солнце вращаться намного быстрее, чем мы наблюдаем сейчас. Сама Солнечная система вращалась бы гораздо быстрее, чем позволяют нынешние орбиты наших планет. Тем не менее центробежная сила не позволила бы Солнечной системе сжаться до ее нынешнего размера, и Юпитер, расположенный в пять раз дальше от Солнца, чем Земля, оказался бы за пределами орбиты Нептуна, который отстоит от Солнца в 30 раз дальше, чем Земля. Каким-то образом Солнечная система в процессе сжатия потеряла энергию вращательного движения или, что не совсем то же самое, «момент импульса». Это подводит нас к парадоксу момента импульса в физике Солнечной системы, парадокса, который до сих пор не объяснен. Его объясняют разными влияниями – от магнитных полей до турбулентности, «отнимающей» момент импульса Солнца и выталкивающей его из Солнечной системы, но ни одна из догадок не утвердилась в качестве основной. В любом случае Солнечная система смогла (непонятно каким образом) решить проблему с моментом импульса, и протосолнечное облако сжалось в хорошенький диск размером с Солнечную систему, что в итоге позволило Юпитеру двигаться по его текущей орбите. Это первоначальное сжатие было очень быстрым (в геологической шкале времени) – вероятно, около 100 000 лет.

Пора рассказать, что такое момент импульса. Понимание этого явления так или иначе пригодится нам далее. Импульс – это физическая величина, являющаяся мерой механического движения тела и способная передавать это движение другим объектам соответственно его массе и скорости. Импульс равен произведению массы тела на его скорость. Автомобиль, который едет со скоростью 100 км/ч, имеет больший импульс, чем едущий с той же скоростью мотоцикл, и передаст больший импульс силы другому объекту при столкновении с ним. Так же рассчитывается момент импульса вращающегося тела (на месте или вокруг точки по орбите), только масса тела умножается на угловую скорость (обычно в оборотах в минуту) и затем на квадрат действительного размера системы. Под «действительным размером» я подразумеваю расстояние от оси вращения до места, где сосредоточена большая часть массы тела. Колесо велосипеда, большая часть массы которого сосредоточена в ободе, весящее

1 кг и совершающее 100 оборотов в минуту, будет иметь больший момент импульса, чем, например, тонкое веретено весом 1 кг, вращающееся с такой же скоростью. Разницу в движении, которое эти два тела передадут другим объектам, легко визуализировать – просто представьте, как вы останавливаете тот и другой объект рукой.

Поскольку бóльшая часть планетарной массы Солнечной системы досталась Юпитеру, а сам он находится весьма далеко от Солнца, момент импульса Солнечной системы должен быть на орбите Юпитера. Если бы на каком-то этапе момент импульса протосолнечного облака не был утрачен, Солнце вращалось бы намного быстрее, момент импульса Юпитера был бы значительно больше и сама эта планета располагалась бы намного дальше от Солнца, чем сейчас.

Первоначально протосолнечный диск состоял из газа и примесей: водород, некоторое количество гелия, пыль, лед, элементы, созданные в гигантских звездах за несколько миллиардов лет... Все это вращалось вокруг центральной массы облака, которая вскоре должна была стать Солнцем. Это движение создавало эффект центробежной силы, препятствующей дальнейшему сжатию диска внутрь себя. Однако газ обращается вокруг центральной массы облака не так, как планеты обращаются вокруг Солнца.

Движение планеты по окоლოსолнечной орбите – результат баланса между центростремительной силой притяжения Солнца и центробежным выталкиванием наружу в результате обращения планеты вокруг своей оси. Положение планеты на орбите определяется законами Кеплера. Протосолнечный диск ведет себя иначе: к центру он уплотняется, формирующееся Протосолнце разогревает газ, отчего давление здесь выше, чем в более холодных окраинных частях. Из-за этой разницы давлений диск слабее притягивается к Протосолнцу, чем летящая в вакууме планета. Поэтому облако движется по орбите чуть медленнее, чем планета и все небесные тела, движущиеся по Кеплеровым орбитам. Что и говорить, звучит это весьма загадочно, но без этого нельзя понять еще одну загадку формирования нашей Солнечной системы.

Планеты Солнечной системы сформировались из мельчайших частиц в газопылевом диске в то же время, когда бóльшая часть массы диска смещалась к центру облака, чтобы сформировать Солнце. Потребовались бы десятки миллионов лет, чтобы Солнце поглотило всю массу диска, только после этого Солнце бы загорелось и в нем начались термоядерные реакции. А прямо перед началом термоядерных реакций Протосолнце сделало бы невозможным дальнейшее формирование планет (мы вкратце

обсудим почему). Таким образом, планетам, особенно большим, следовало бы поторопиться сформироваться до того, как Солнце бы зажглось, – и это была не единственная их проблема.

Как только в облаке сформировался диск, твердые частицы пыли и льда стали присоединяться друг к другу посредством электростатических сил (таких, как статическое электричество и некоторые другие явления, например силы Ван-дер-Ваальса, которые я оставляю читателю для самостоятельного ознакомления), поскольку они еще были недостаточно массивными, чтобы притягиваться друг к другу силой гравитации. Турбулентные завихрения газа, вероятно, позволили частицам льда и пыли зависнуть поблизости друг от друга и вращаться достаточно долго, чтобы сцепиться. Весьма похоже на то, как образуются комки пыли (по крайней мере, у меня дома).

Но для создания даже маленькой планеты первые частички пыли, минеральные и ледяные, должны были расти, чтобы силой собственной гравитации притягивать больше массы и увеличиваться. Проще сказать это, чем сделать. Когда собирающиеся частички были очень малы (порядка микрона, примерно размером с бактерию), они свободно летали по газовому диску, двигаясь с газом и в то же время присоединяясь друг к другу электростатическими силами. Став достаточно большими, скажем, диаметром 1 см или больше того, частицы стали сильнее испытывать притяжение Протосолнца и слабее – силу выталкивания наружу давлением газа. В результате их вращение вокруг Протосолнца стало походить на то, как обращаются по орбитам планеты, уже точнее соблюдая траектории Кеплеровых орбит. Эти сформированные куски будут лететь по орбите быстрее, чем газ в диске, и поэтому встретят сопротивление газа – оно замедлит их движение и направит по спирали к центру облака.

Если этим кускам удастся стать достаточно большими и достичь размера планетезимали (небесного тела размером с маленький астероид, скажем, от 10 м до 1 км), они могут двигаться сквозь газ, почти не испытывая встречного сопротивления и не скручиваясь по спирали к центру облака (или скручиваясь, но очень медленно), и уцелеть в противостоянии с газом (который будет вытеснен, о чем пойдет речь ниже). Достигнув километровой диаметра, эти тела, уже достаточно тяжелые, смогут притягивать еще больше массы и расти еще быстрее.

В то же время объекты среднего размера, от нескольких сантиметров до метра в диаметре, подвергнутся сильному встречному сопротивлению газа, которое заставит их быстро закручиваться по спирали и сгинуть в Протосолнце всего через 200 лет – мгновение по космическим меркам!

Вдобавок эти куски будут недостаточно тяжелыми, чтобы притягивать друг друга, наоборот, они будут взаимно отталкиваться.

Образовавшиеся из крошечных пылинок планеты должны нарастить массу и вырасти с нескольких сантиметров до метра (а из-за своего размера они не очень-то хорошо схватывались друг с другом), чтобы не улететь по спирали прямо в Протосолнце. И дорасти до метрового размера планеты должны невероятно быстро – за несколько сотен лет, в противном случае они сгинут. Этот парадокс, называемый барьером одного метра, также пока не разрешен. Однако новые исследования показывают, что давление растущих комков пыли на газ заставляет их сбиваться в кластеры – сплотившись в кучи большей массы, они защищают друг друга от встречного сопротивления газа, прямо как велосипедисты на «Тур де Франс».

В то время как накапливались первые комочки пыли, коллапсирующая масса в центре облака нагревалась, становясь звездой. Еще до начала термоядерных реакций эта масса уже была достаточно горячей, чтобы нагреть внутреннюю часть газового диска. Комочки пыли, собравшиеся в более горячем внутреннем диске, представляли собой в основном минеральные соединения, в конечном счете из них образовались камни. Во внешних частях будущей Солнечной системы было достаточно прохладно, там могли скапливаться льды и жидкости, такие как вода, метан и аммоний. Граница между двумя этими областями называется снеговой линией, она проходит недалеко от орбиты Юпитера – между орбитами Марса и Юпитера.

Из-за давления газа на мелкие частицы, о котором говорилось выше, крупницы и кусочки льда, стремящиеся по спирали к центру облака, испарились бы при пересечении снеговой линии, и высвобождение газа привело бы к появлению зон с относительно высоким давлением. Газ в диске за пределами зон высокого давления испытывал бы воздействие силы, направленной наружу, что способствовало бы дальнейшему ослаблению гравитации, заставляя газ двигаться по орбите Протосолнца еще медленнее. Это вызвало бы еще большее встречное сопротивление и давление на летящие быстрее твердые частички, что ускорило бы их движение по спирали в снеговую линию. Газ в пределах снеговой линии и зон высокого давления вызвал бы дополнительное давление, направленное внутрь, по направлению к Протосолнцу, что усилило бы гравитационное притяжение, заставляя газ вращаться быстрее, чем твердые частицы, уже не оказывая им сопротивления, а создавая «попутный ветер». Частицы могли подняться на более высокую орбиту и выйти по спирали в обратную

сторону. По существу, частицы будут втягиваться в обладающую высоким давлением снеговую линию с обеих сторон, и она будет действовать как ловушка для крупниц льда. (Весьма неожиданный эффект, ведь жидкости обычно устремляются к зонам низкого давления, достаточно вспомнить обычный слив. Но взаимодействие газа и частиц во вращающемся диске гораздо сложнее, чем поток воды, стекающей из ванны.)

Скопление газа и льда в снеговой линии, возможно, создало благоприятную почву для формирования планеты-гиганта – Юпитера. По массе – и орбитальной энергии или моменту импульса – это самый крупный планетный объект Солнечной системы. Если не принимать во внимание тот факт, что на Земле живем мы, то основная часть содержимого Солнечной системы, в терминах массы, энергии и момента импульса, приходится на счет Солнца и Юпитера. Но это лишь показывает, что размер не всегда имеет значение (по крайней мере, мы, земляне, так бы и сказали).

Как только Юпитер начал формироваться, это ускорило рост ближайших газовых гигантов, например Сатурна. В частности, гравитационное притяжение Юпитера ускоряло бы медленное вращение масс за пределами его орбиты, заставляя их уходить по спирали во внешнее пространство. Частицы пыли и льда, закручивающиеся по спирали по направлению к Юпитеру с еще более высоких орбит, слились бы с этим уходящим потоком, что привело бы к накоплению массы и образованию фидерной зоны для другой гигантской планеты, например Сатурна.

Первые протопланеты, формировавшиеся из частиц пыли, должны были поторапливаться и расти очень быстро. словно мало было таких помех на пути их развития, как уменьшение момента импульса и преодоление барьера одного метра, – им еще приходилось постоянно соревноваться в скорости с Солнцем. Пока комочки пыли соединялись в большие куски, растущая протозвезда поглощала массу диска и была готова положить начало термоядерным реакциям и зажечься. Непосредственно перед тем как зажечься, протозвезда нагревала внутренние части Солнечной системы и выбрасывала газ, создавая сильный солнечный ветер. Он выдувал из облака остатки пыли и газа, которые не успели присоединиться к относительно массивным телам. Потеря газа и интенсивный солнечный ветер длились несколько десятков миллионов лет после начала коллапса протосолнечного облака в диск, это очень мало по геологическим и космологическим меркам. Это значит, что протопланетам, особенно гигантским планетам с их массивной газовой оболочкой, следовало очень поспешить и успеть сформироваться до того, как их элементы будут поглощены или унесены прочь. Вырастить из этих

комочков пыли планетезималь, а потом и планету – задача чрезвычайно трудная, но у Солнечной системы это получилось, хотя ученые до сих пор не могут понять, как ей это удалось. И это еще одна из многих не дающих покоя загадок формирования Солнечной системы.

Каменные протопланеты, которым удалось уцелеть и сформироваться в более горячей внутренней части Солнечной системы, были сначала, вероятно, размером с крупные астероиды. Некоторые из этих небесных тел были достаточно большими, чтобы нагреваться и плавиться; большая часть этого тепла происходила от столкновений, а остальная – от интенсивного нагрева от короткоживущих радиоактивных элементов, например нестабильных изотопов алюминия и калия. Если камень расплавляется и начинает снова застывать, концентрация железа в остаточной магме (расплавленной породе) становится невероятно высокой, поскольку железо легче растворяется в сплавах. Этот затвердевший сплав столь богат железом, что становится тяжелее окружающих его каменных пород, и проваливается к центру этих небесных тел (если, конечно, они достаточно велики, чтобы иметь значительную гравитацию), образуя железное ядро. Такие крупные астероиды, как Веста и Церера, также имеют железное ядро. (Метеориты, которые достигают Земли и содержат чистое железо – их вполне логично называют железными и железокремниевыми метеоритами, – предположительно, являются остатками тех ядер, которые были выброшены после разрушения астероида в столкновениях.) Многие из астероидов были слишком малы, чтобы это произошло, потому они остались нерасплавленными и примерно в том же составе, в каком изначально сформировались. Большинство таких метеоритов называются хондритами, и они, возможно, представляют собой строительные блоки Солнечной системы. Многие метеориты, достигающие Земли, также относятся к классу хондритов.

Эти ранние планетезималь быстро перемещались по Солнечной системе по различным эллиптическим и случайным орбитам, и лишь те, чьи орбиты были более-менее круглыми, смогли выжить. Небесные тела, летящие по одной круговой орбите или близко к ней, двигались более медленно по отношению друг к другу, и потому их столкновения были «мягкими», они смогли соединиться, не разрушив друг друга. Спустя десятки миллионов лет эти небесные тела стали намного больше и уже не разрушались и не теряли свои части при столкновениях (из-за возросшей собственной гравитации) с объектами астероидных размеров; и, таким образом, они стали еще больше, превращаясь в конце концов в планеты земной группы, которые существуют сейчас в Солнечной системе.



Сегодня в Солнечной системе насчитывают восемь планет и Плутон, который переживает кризис идентификации. Хотя Международный астрономический союз лишил в 2006 г. Плутон ранга планеты, открытия зонда НАСА «Новые горизонты» в 2015 г. позволили утвердить Плутон в звании карликовой планеты. Тем не менее во внутренней области Солнечной системы располагаются сухие каменные планеты, а гигантские газовые и водные планеты – во внешней. Эти области разделяет линия, наличие которой лучше всего объясняется гипотезой снеговой линии. Однако Солнечная система не совсем обычна, даже планеты в ней не обязательно сформировались там, где они находятся сейчас. Самые впечатляющие примеры – это Уран и Нептун, расположенные далеко на окраине Солнечной системы (соответственно в 20 и 30 раз дальше от Солнца, чем Земля). Они должны были бы иметь доступ к большому количеству материала диска, поглощать его и таким образом становиться больше. По идее, эти планеты должны были быть намного больше, чем они есть сейчас. Принято считать, что они формировались, находясь гораздо ближе к Юпитеру и Сатурну (которые, в свою очередь, были ближе друг к другу), и потому были обделены строительным материалом, доставшимся их большим соседям. Сатурн, Уран и Нептун были выброшены на более дальние орбиты во многом из-за того, что сильнейшее гравитационное притяжение Юпитера выбрасывает небесные тела с их орбит во внешние части Солнечной системы. Пожертвовав часть своего момента импульса для того, чтобы «выселить» соседние планеты, сам Юпитер мог переместиться ближе к центру. Смещение орбит этих огромных планет, вероятно, заставило большое количество объектов уходить по спирали с орбиты Юпитера во внутреннюю область Солнечной системы, что вызвало около 4 млрд лет назад так называемую позднюю тяжелую бомбардировку – планеты земной группы были подвержены массивным ударам астероидов. Теория, описывающая перемещение планет в Солнечной системе, называется «модель Ниццы», в честь научно-исследовательской группы Университета Ниццы во Франции.

Во внутренней области Солнечной системы находятся небольшие каменные планеты, в то время как астрономические наблюдения других планетных систем показывают, что в их внутренних областях небесные тела размером с Юпитер располагаются очень близко, почти «на орбите Меркурия», к звезде. Лучше всего это объясняется тем, что эти «горячие юпитеры» образовались во внешней области системы, а потом мигрировали к центру, как, вероятно, и планеты Солнечной системы.

Но из всех историй о формировании Солнечной системы и ее планет

одну из самых больших загадок задает наша собственная планета. Как у Земли появилась эта странная Луна? Даже само существование естественного спутника такого большого размера очень странно, потому что Луна почти такая же большая, как многие из спутников Юпитера и Сатурна. Самый большой спутник Юпитера – Ганимед – лишь в два раза массивнее нашей Луны (ничто в космических масштабах). Для сравнения, масса Юпитера в 300 раз больше, чем масса Земли, а Сатурна – почти в 100 раз. Остается загадкой, как такая маленькая планета, как Земля, заполучила такой большой естественный спутник.

Наша необычно крупная Луна, возможно, оказала важное влияние на эволюцию жизни. Приливы и отливы океана, вызываемые притяжением Луны (лунные приливы), становятся причиной появления приливных заводей, где, как предполагал Дарвин и другие ученые, возникли благоприятные условия для развития жизни. Благодаря приливам также образуются литоральные зоны – участки берега, которые затопляются морской водой во время прилива и осушаются (ну, не совсем осушаются, а остаются влажными) во время отлива. Организмы, развивавшиеся в этой зоне, приспособились жить в двух средах, что в конечном счете стало причиной их переселения (или нашествия, в зависимости от вашей точки зрения) на сушу.

Этим странности Земли и Луны не ограничиваются. Радиус орбиты Луны равняется примерно 60 радиусам Земли, и сейчас Луна совершает оборот вокруг Земли примерно за месяц (на самом деле за 27 дней). Однако раньше орбита Луны была намного ближе к Земле. Из-за того что Земля и Луна притягивались друг к другу посредством взаимных гравитационных сил, а Луна располагалась близко к Земле, наша планета вращалась вокруг своей оси быстрее, подобно тому как это происходит у вращающегося на льду фигуриста, когда он прижимает к себе руки. Действительно, ископаемые остатки кораллов, по которым можно определить суточные и сезонные циклы роста, а также пласты осадочных горных пород возрастом в сотни миллионов лет подтверждают, что дни раньше были значительно короче, чем сейчас. Если бы мы прилепили Луну к Земле, период обращения вокруг своей оси этой объединенной планеты составлял бы 4 часа. Скорость вращения вокруг своей оси объединенной системы Земля – Луна будет намного больше, чем у самой быстро вращающейся планеты Солнечной системы (легко на помине!) – Юпитера, период обращения которого равен 10 часам. Орбита Луны стала такой, какой мы ее наблюдаем сейчас, потому, что лунные приливы на поверхности быстро вращающейся Земли вызывают приливные выступы на поверхности нашей планеты,

которые опережают вращение Луны. Гравитационное притяжение этих сил тянет Луну вперед, медленно «выбрасывая» (если вы, конечно, можете себе представить медленное выбрасывание) ее на более высокую орбиту. Из-за приливного трения Луна удаляется и замедляет вращение Земли. Хотя Земля отдает свой момент импульса Луне, момент импульса системы Земля – Луна остается постоянным.

Еще об одной загадке Луны мы узнали благодаря искусственным спутникам и посадочным модулям, которые кое-что рассказали нам о внутреннем строении Луны. Большинство небесных тел – планеты, спутники, крупные астероиды – имеют каменистый наружный слой, мантию, кору и довольно большое металлическое, по большей части железное, ядро (это объясняется теми же причинами, что и наличие ядер у планетезималей: нагрев и плавление отделяют каменистые части от металлических). Но ядро Луны очень маленькое, значит, железо составляет лишь небольшую часть ее массы, а остальное приходится на каменные породы. По сравнению со строением других небесных тел это выглядит весьма странно.

Почему же у Земли оказался такой большой и столь странный естественный спутник? Этот вопрос о формировании нашей планеты не давал покоя людям сотни лет. В 1960-х, когда я был маленьким, нас учили, не предлагая никаких альтернативных теорий, что Луна откололась от Земли, оставив после себя бассейн Тихого океана. Это объяснение «из учебника», называющееся гипотезой центробежного разделения, позднее было развенчано: нельзя так просто взять и оторвать спутник от тела планеты. Вот и разберись.

Тем не менее огромная скорость вращения системы Земля – Луна и чрезмерная каменистость (и недостаток железа) Луны позволили высказать лучшую на сегодняшний день рабочую гипотезу. В начале формирования Солнечной системы, когда планеты уже были почти того же размера, как сейчас, а по орбитам беспорядочно летало много более мелких объектов, небесное тело размером с Марс – названное по некоторым причинам Тейей (возможно, по тем же причинам, по которым бомбам дают имена, прежде чем сбросить) – предположительно столкнулось с Протоземлей. К счастью, удар пришелся по касательной. В результате этого столкновения было выброшено много каменистых пород мантии Земли и каменистых пород задевшего нашу планету небесного тела. Ядро Тейи, потеряв большую часть своего импульса, погрузилось в расплавленную Протоземлю, которая аккумулировала в себе ядра обоих тел. Мелкие частицы каменистых пород мантий обеих планет были выпарены во время столкновения и затем

образовали облако, вращающееся на орбите Земли. За несколько тысяч лет это облако сконденсировалось и его части объединились в Луну, которая тогда почти полностью состояла из каменных пород и практически не имела железного ядра. А так как столкновение произошло вскользь, оно заставило Протоземлю вращаться быстрее, и в конце концов Земля через приливы и отливы передала свое вращение, а точнее, свой момент импульса орбитальному движению Луны. Модель ударного формирования Луны, или сценарий гигантского столкновения, была впервые предложена в середине 1970-х гг. планетологом Уильямом Хартманном, но лишь компьютерное моделирование, начатое в конце 1980-х гг. и растянувшееся на два десятилетия, показало, что такое столкновение и все вытекающие из него последствия действительно были возможны.

Как бы то ни было, теория гигантского столкновения и компьютерное моделирование не позволяют разгадать все лунные тайны. К примеру, почему детальный химический состав Луны (в соотношениях концентраций изотопов кислорода) столь похож на земной? Если Тейя быстро переместилась из другой части Солнечной системы, почему химический состав Луны больше напоминает состав Земли? Тайна происхождения Луны еще не разгадана до конца.

Кроме восьми больших планет с их спутниками в Солнечной системе имеется значительное количество материала, который не был вовлечен в создание планет. Далеко за пределами орбит Нептуна и Плутона находится обволакивающее Солнечную систему огромное сферическое облако, заполненное мелкими ледяными телами. Эта область называется облаком Оорта (в честь астронома Яна Оорта) и расположена она примерно в 50 000 раз дальше от Солнца, чем Земля, и почти в 2000 раз дальше, чем Нептун. Расстояние от облака Оорта до Солнца составляет почти световой год. Облако Оорта служит источником долгопериодических комет, которые проходят через внутреннюю область Солнечной системы каждые 200 или более лет. Их огромные и медленные орбиты лежат во всех плоскостях, а не только в плоскости Солнечной системы. Предполагается, что они приходят из очень далеких областей из сферической оболочки, состоящей из ледяной материи. Ближе к Солнцу располагается пояс Койпера, который представляет собой еще одну группу малых тел, состоящих из ледяного кометного материала. Пояс Койпера находится в непосредственной близости от орбиты Нептуна, в 30–50 раз дальше от Солнца, чем Земля. В 2006 г. Плутон, считавшийся планетой, был переклассифицирован в объект пояса Койпера, тем более что было обнаружено еще несколько таких тел (как уже отмечалось, впоследствии Плутону вернули звание карликовой

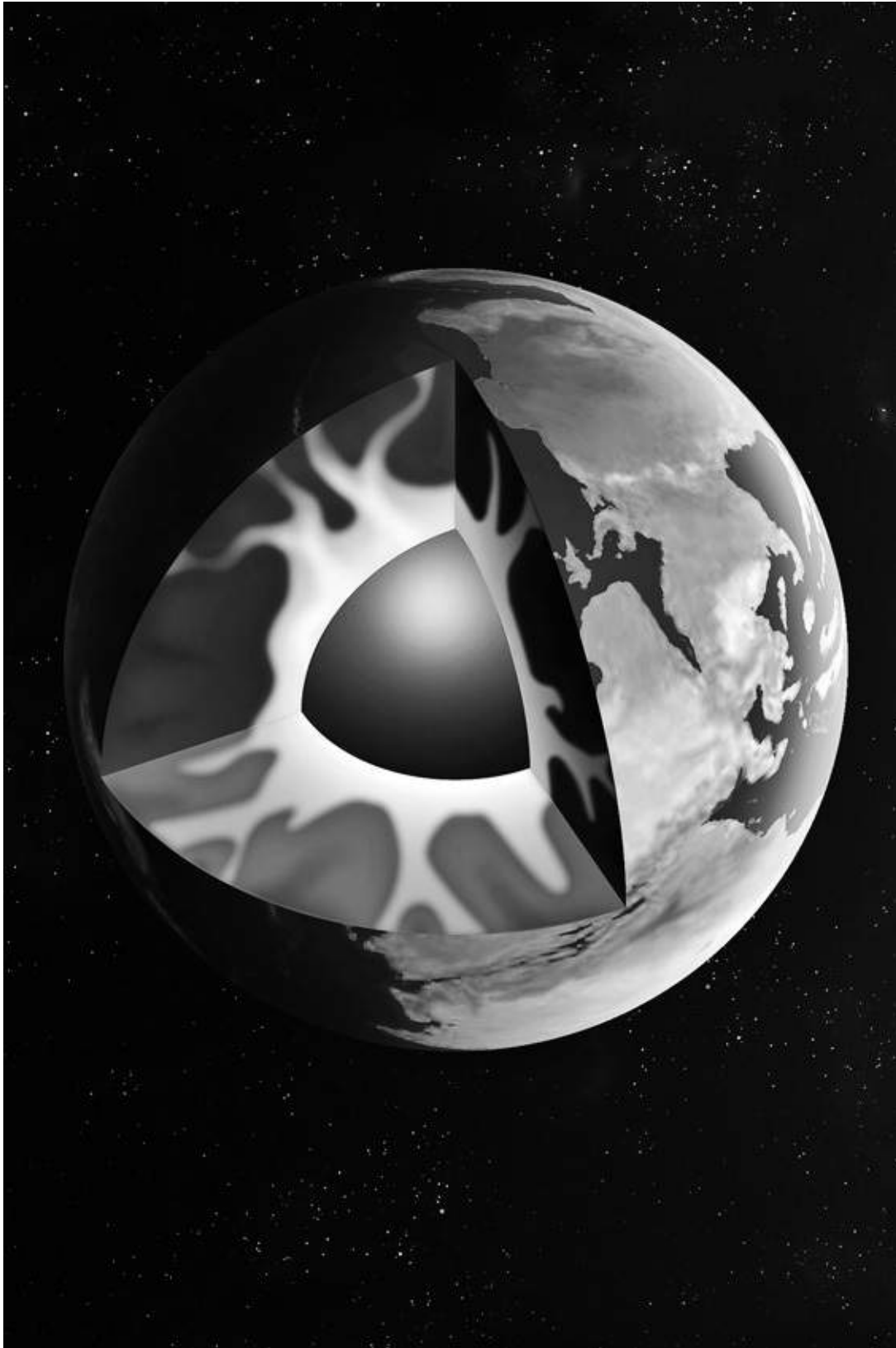
планеты). Пояс Койпера является главным источником короткопериодических комет с орбитальными периодами менее 200 лет, например кометы Галлея, которая возвращается в близкие к нам области каждые 76 лет. И облако Оорта, и пояс Койпера сохранили материал, который мог бы быть использован для появления газовых планет, планет-океанов и ледяных спутников.

Наиболее заметное место скопления материала, из которого могли образоваться планеты земной группы, – это главный пояс астероидов, располагающийся между Марсом и Юпитером. Его составляет множество астероидов размером от камня и автомобиля до больших объектов неправильной формы, как Веста, диаметром примерно 500 км, и даже более крупных, хорошо сформированных сферических карликовых планет, подобных Церере, диаметром 950 км (оба этих объекта были предметом исследования недавней миссии НАСА Dawn ). В поясе астероидов достаточно материала для образования большой планеты земного типа, но из-за Юпитера шансов на это образование нет: гравитационное притяжение этого гиганта разрушит любое тело с прирастающей массой, как только оно станет достаточно большим. Гравитационные силы Юпитера до сих пор оказывают влияние на пояс астероидов: проходя по одному и тому же месту своей орбиты, Юпитер может периодически сближаться с орбитами объектов пояса (так называемый орбитальный резонанс), выталкивая с них тела и открывая так называемые щели Кирквуда в поясе астероидов. Как предполагают, материал, выбрасываемый из щелей Кирквуда, образует большинство метеоритов, достигающих Земли.

Пояс астероидов и все метеориты, которые из него прилетают, – отличные примеры «кирпичиков», из которых построены планеты внутренней области Солнечной системы. Некоторые классы астероидов (и метеоритов), называемые хондритами, которые не были расплавлены и вообще избежали серьезных изменений, существенно повторяют изначальный химический состав Солнечной системы, сохранившийся в Солнце. Это нетронутые строительные блоки Земли. Состав хондритов играет важную роль в понимании того, как образовалась Земля и проходила эволюция внутренней структуры нашей планеты, состоящей из горных пород, а также океанов и атмосферы (мы обсудим это в следующей главе).

Наконец, во внутренней области Солнечной системы между Венерой и Марсом, в промежутке, где располагается и Земля, находится три семейства астероидов (пусть и не столь плотные, как Главный пояс астероидов), называемых Амуры, Аполлоны и Атоны. Астероиды последних двух семейств иногда пересекают орбиту Земли и периодически падают на нашу

планету. Так, 65 млн лет назад один из таких астероидов – возможно, около 10 км в диаметре, размером с небольшой город, – упал на полуостров Юкатан, что вызвало вымирание динозавров. Столкновение с астероидом считается очень редким, но не невозможным событием. Хотя вероятность такого столкновения мала, потенциальные урон и жертвы могут быть столь велики, что шанс погибнуть при этом примерно таков же, как шанс погибнуть в авиакатастрофе. Поэтому подсчет и отслеживание астероидов, а также усилия по предотвращению их падения на Землю (скорее всего, путем медленного изменения их курса при условии, что объект удастся заблаговременно обнаружить) – серьезные задачи таких правительственных организаций, как НАСА. Хотя падение астероида имело бы катастрофические последствия для нас и многих других форм жизни на Земле, но по большому счету наша планета всего лишь занимается очисткой Солнечной системы от старого «строительного мусора».



4. Континенты и строение Земли  
Создав Солнечную систему и планеты, мы можем сфокусироваться на

нашей родной планете и спросить себя, как же возникла окружающая среда, в которой мы живем. Как и множество других организмов, мы – наземные существа. В какой-то момент истории Земли нашим очень далеким предкам понадобилась суша и конкретно континенты, чтобы распространиться по всему миру. Континенты с их весьма необычной корой присущи только Земле. Но чтобы понять, как они появились, нам придется совершить путешествие в глубины Земли.

Большую часть информации о планетах, звездах, галактиках и Вселенной дают астрономические наблюдения, физика элементарных частиц, полеты космических аппаратов в пределах Солнечной системы и метеориты. Но чтобы понять что-либо во внутреннем строении Земли, не говоря уже о строении любой другой планеты, нам нужно «взглянуть» на центр нашей планеты сквозь 6400-километровую толщу горных пород и металла. Это делает внутренние области Земли еще менее доступными для наблюдения, чем другие галактики, и понимание устройства нашей планеты остается одной из самых важных задач науки.

Большую часть того, что мы знаем о внутренней структуре Земли, нам дала сейсмология – наука о том, как упругие колебания, например звуковые волны, распространяются в недрах Земли. Но мы не можем позволить себе такую роскошь, как проведение сейсмических измерений на других планетах. Пока только на Луне имеется несколько активных сейсмометров, оставленных астронавтами программы «Аполлон», несколько сейсмометров будут доставлены на Марс в рамках будущей миссии InSight. Не густо, но пока это все, что у нас есть. Поэтому нам необходимы другие способы наблюдений. Основной способ – взвесить планету и потом вычислить ее массу. На Земле мы можем с легкостью это сделать, поместив нужный нам объект на весы. Вес объекта – это взаимное притяжение между массой Земли и массой объекта. Таким образом, мы измеряем не только вес объекта, находящегося на Земле, но и вес Земли, находящейся на объекте (если можно так выразиться). Зная также окружность и радиус Земли, которые были впервые рассчитаны древнегреческим философом Эратосфеном, мы можем вычислить массу нашей планеты, а также ее плотность и таким образом произвести приблизительную оценку ее состава. Средняя плотность Земли составляет около  $5,5 \text{ г/см}^3$ , что можно сравнить с плотностью воды ( $1 \text{ г/см}^3$ ), или камешка, который можно подобрать на дороге ( $2\text{--}3 \text{ г/см}^3$ ), или с большинством металлов, чья плотность составляет около  $10 \text{ г/см}^3$  (железо – около  $8 \text{ г/см}^3$ , золото – около  $20 \text{ г/см}^3$ ). Таким образом, Земля обладает большей плотностью, чем большинство горных пород, но она легче, чем большинство металлов, хотя



мы также знаем, что плотность Земли становится выше, чем обычно, в глубине ее недр, где наблюдается экстремальное давление.

Массу других планет можно вычислить путем измерения того, как гравитация планеты влияет на движение проходящего рядом с ней спутника; например, мы можем взвесить Землю, зная орбитальный период Луны (лунный цикл) и расстояние до ее орбиты (с помощью некоторых астрономических измерений: сегодня это в основном метод лазерной локации Луны). Мы также можем узнать чуть больше о внутренних слоях и структуре планеты, наблюдая за осью вращения планеты, которая крутится подобно волчку (это явление называется прецессией). Эта информация может сообщить нам, есть ли в центре планеты плотное ядро. У Земли такое ядро есть, как и у большинства других планет земной группы, за исключением, вероятно, Луны, о чем говорилось в предыдущей главе. Другие измерения со спутников дают более подробные данные, а горные породы, излитые в виде магмы из вулканов, информируют о химическом составе некоторых внутренних областей Земли (подробнее поговорим об этом ниже).

И все же большую часть информации о структуре Земли мы получаем именно с помощью сейсмологии. Для этого необходимо, чтобы мощный источник звука, вроде взрыва, создавал достаточно сильные волны, которые проходят планету насквозь и выходят с другой стороны. Из-за тектоники плит, про которую мы поговорим совсем скоро, часто происходят сильные землетрясения, которые и служат источником звука. Эти звуковые волны проходят через все более глубокие слои со всевозрастающей (обычно) скоростью звука и доходят до различных сейсмографов на сейсмических станциях по всему миру с разными средними скоростями – в зависимости от того, насколько глубоко они проходили (в более глубоких слоях волны, как правило, движутся быстрее). Эти волны, зарегистрированные на разных сейсмических станциях, затем используются для создания карты, точнее, инфразвуковой картины глубинных слоев Земли.

Благодаря сейсмологии мы смогли узнать о многих слоях, лежащих под поверхностью нашей планеты, но три из них наиболее примечательны: сравнительно тонкая кора, состоящая из легких осадочных горных пород (которые в некоторых частях стали толще с течением времени по мере разрастания материков; более подробно об этом ниже); очень плотная мантия, состоящая из более тяжелых пород и занимающая почти половину радиуса Земли, и, наконец, еще более плотное, в основном состоящее из железа ядро, на долю которого приходится вторая половина радиуса Земли. Но так как мантия «обернута» вокруг ядра, ее объем намного больше

объема ядра. Действительно, мантия составляет более 80 % общего объема Земли. (Этот факт определяется простой геометрией: объем шара пропорционален кубу его радиуса, так что если ядро составляет половину радиуса Земли, то, соответственно, это одна восьмая часть ее объема, значит, около семи восьмых объема будет приходиться на мантию.)

Для измерения плотности слоев Земли сейсмологи используют различные виды упругих волн, проходящих через внутреннюю часть планеты. Наиболее быстро движущиеся сейсмические волны – звуковые волны – вызваны сжатием и расширением, которые происходят в любой среде. Причиной появления еще одних быстрых волн является сгибание (деформирование) и разгибание вещества, подобно тому как образуются волны на натягиваемой нитке. Эти волны могут проходить только через твердые тела, так как жидкости не могут «разогнуться» сами по себе, если они были деформированы. Скорость этих двух типов волн может быть использована, чтобы узнать, насколько легко вещество подвергается сжатию под действием сильного давления, и, исходя из этого, уже можно вычислить его плотность. (Есть еще два типа сейсмических волн, которые являются более медленными и передаются только по поверхности Земли. Эти волны вызывают сотрясение грунта и его сдвиги и таким образом приводят к разрушительным последствиям землетрясений.)

Используя эти волны, сейсмологи пришли к выводу, что массивное ядро Земли состоит в основном из жидкости, обладая плотностью, характерной для таких металлов, как железо. В частности, так как чистые «изгибные» волны, которые рождаются от землетрясений по всей планете, не могут пройти через ядро Земли, это означает, что оно жидкое. Тем не менее более детальные исследования показали, что внутри этого жидкого железного ядра находится твердое внутреннее ядро, которое также состоит из железа и, скорее всего, медленно остывает и твердеет – как замерзающее озеро, только перевернутое вверх ногами. На самом деле существуют еще более детальные измерения, которые показывают, что и мантию Земли, и земную кору следует делить на разные слои, но мы не будем на этом останавливаться и двинемся дальше.

Сейсмология позволяет нам взглянуть на структуру Земли с точки зрения физики. Например, мы можем определить плотность слоев или узнать, что одни части мантии Земли могут быть горячее или холоднее, чем другие. Но сейсмология не дает сведений о химических свойствах. Химический состав земных недр в основном определяется путем исследования поверхностных горных и вулканических пород, которые были извержены из недр Земли, а также метеоритов и даже Солнца,

которое отражает исходный химический состав всей Солнечной системы. Средний химический состав Земли – это то, что мы могли бы вычислить, если бы все слои планеты были однородно перемешаны. Вероятно, это было бы нечто вроде неизменных хондритовых метеоритов из Главного пояса астероидов (мы рассматривали их ранее), хотя ученые еще не пришли к согласию, какой точно тип хондритов это был бы. Имея некоторое представление об исходном химическом составе Земли и предполагая, каким образом эта «смесь» разделяется на различные слои, которые либо остаются на плаву, либо проваливаются вниз в зависимости от их плотности, можно дать вполне обоснованную оценку состава основных слоев Земли. Можно сделать вывод, что ядро состоит в основном из железа с некоторым количеством никеля и легких элементов, таких как сера, которые легко растворяются в расплавленном железе и переносятся в ядро. Мантия состоит из минералов, в основном из железа, кремния и кислорода, которые, как вы помните, были созданы во время слияния ядер гелия внутри гигантских звезд (посредством альфа-процесса). Кора также состоит из минералов, в ней даже больше кремния и кислорода и более широкое сочетание легких металлов (помимо магния и железа), включая кальций, калий, алюминий, натрий и т. д. (Я не буду перечислять названия всех горных пород и минералов, потому что вряд ли сам их все вспомню.) Главной причиной разделения всех этих компонентов из однородной массы стало плавление, и это ведет нас к еще одной истории.

Легко представить себе, что после того столкновения с небесным телом, в результате которого сформировалась Луна, Земля стала в значительной степени расплавленной. Однако наша планета могла быть расплавлена и до этого столкновения, в общем-то большой разницы здесь нет, если только это не повлияло на сам процесс столкновения. Хотя последующие геологические процессы стерли все следы того расплавленного состояния Земли, есть доказательства того, что оно существовало на Луне, где можно найти остатки раннего океана магмы – океана расплавленных горных пород. Вопрос, был на Земле этот океан магмы или же нет, все еще открыт, но, учитывая драматический характер планетных столкновений и аккреции, магматическое начальное состояние – гипотеза, которая хорошо объясняет то, что произошло потом.

Многие крупные планетезимали, столкнувшиеся с аккрецирующей Землей, могли иметь собственные железные ядра. Возможно, на этих небесных телах было значительное количество свободного железа. Его тяжелые бесформенные сгустки провалились к центру Земли на ранней стадии ее формирования и образовали протоядро до столкновения, в

результате которого образовалась Луна и которое способствовало накоплению большего количества железа в ядре при плавлении Земли (снова).

Получившийся в результате океан магмы мог составлять значительную часть всего объема Земли. Остывая и затвердевая, он продолжал разделять компоненты Земли, так как различные элементы смеси расплавленных горных пород, называемой магмой, затвердевают при разной температуре и по мере кристаллизации тонут и разделяются. Любой избыток железа, еще растворенного в магме, остался бы в расплавленном состоянии до конца (как и при формировании планетезималей), и в итоге, когда богатая железом магма стала бы достаточно тяжелой, спустился бы к ядру. Большая часть затвердевшего слоя горных пород составила бы мантию, а более легкие компоненты в конечном итоге всплыли бы к поверхности, образовав тонкую земную кору. Океан магмы также мог разделиться пополам по мере затвердевания: более легкие расплавы остались бы в верхней части, более тяжелые, сжатые до высокой плотности в нижней части океана магмы, опустились бы к основанию мантии. Следы этого «нижнего океана магмы» сохранились до наших дней – сейсмологи до сих пор обнаруживают вкрапления магмы в нижней части мантии.

Если океан магмы действительно существовал, то затвердел он очень быстро (по крайней мере та часть, которая не ушла в нижнюю часть мантии). Это могло занять от нескольких десятков миллионов до нескольких сотен миллионов лет, по геологическим меркам – весьма быстро. Фактически с этого времени начинается геологическая история Земли, которая запечатлена в горных породах. Считается, что образование Солнечной системы произошло примерно 4,6 млрд лет назад, но эта информация получена по метеоритам, а не по горным породам Земли. Древнейшим породам на Земле всего около 4 млрд лет, вероятно, они сохранились с тех времен, когда океан магмы окончательно затвердел. (В некоторых местах Земли были найдены крошечные кристаллы циркона, которые на несколько сотен миллионов лет старше, но породы, в которых они содержатся, не такие старые.) Таких древних пород сохранилось очень мало, потому что большая часть коры, которая поднялась к поверхности океана магмы, была размыта и «переварена» последующими геологическими процессами. Также возможно, что она была уничтожена астероидами, частые столкновения с которыми продолжались несколько сотен миллионов лет и прекратились около 4 млрд лет назад. Таким образом, 4 млрд лет назад фактически началась геологическая эра, называемая археем, в которой уже существовали современные горные

породы и которая занимает огромный отрезок геологического времени (около 2 млрд лет из общих 4,6 млрд). Эра до архея, когда, вероятно, существовал океан магмы, называется катархей или гадей, в честь Гадеса (Аида), древнегреческого бога подземного царства.

После того как океан магмы окончательно остыл, Земля продолжала развиваться и остывать, хотя и более медленно, выделяя тепло в холодный вакуум космоса. Это развитие в значительной степени определялось и определяется мантией Земли. Мантия настолько огромна и малоактивна, что управляет не только процессом остывания планеты, но и ее геологическим развитием. Мантия осталась горячей со своих первых дней (после того, как затвердел океан магмы), но сейчас она представляет собой почти полностью твердое тело, за исключением нескольких небольших, но важных мест. Мантия все еще нагревается энергией, выделяющейся при распаде таких радиоактивных элементов, как уран, торий, а на ранней стадии – неустойчивого изотопа калия. Он быстро распадается, выделяя много тепла (калий распадается на аргон, который составляет важную часть элементного состава атмосферы в наши дни). Как вы помните, более тяжелые радиоактивные элементы уран и торий возникли в результате нейтронного захвата в процессе эволюции красных сверхгигантов. Внутри звезд этот процесс проходил медленно, но, как только произошла вспышка сверхновой, он стал быстрее. В любом случае мантия остается горячей и остывает, отдавая тепло в космос. Более половины ее тепла осталось со времен образования Земли и океана магмы, остальное получено от нагрева радиоактивными элементами.

Однако мантия не остывает как большое горячее статическое каменное тело – она очень медленно движется. Породы мантии, становясь рядом с более холодной поверхностью прохладными и тяжелыми, опускаются, а породы в нижней части мантии вблизи горячего ядра теплее и легче, поэтому они поднимаются. Этот процесс, при котором горячее вещество всплывает вверх, а холодное опускается вниз, называется тепловой (естественной) конвекцией, она широко распространена в природе – в земной мантии и океанах, в атмосферах планет и звезд, в чашке кофе. Конвекция управляет ураганами, грозами и океанскими течениями, она причина появления гранул на Солнце. Чтобы вещество могло двигаться под действием силы тяжести (которая делает горячее вещество легче, а холодное – тяжелее), оно должно обладать текучестью. Хотя мантия является твердой, а не жидкой, в течение очень долгого времени она ведет себя как флюид, подобно тому как перемещаются ледники – медленно, если они не тают, не разваливаются на части и не происходит обламывания

льдов.

То, что твердые частицы ведут себя как флюиды, звучит как-то нелогично, но, как уже говорилось в предисловии, я не пойду по пути наименьшего сопротивления. Вместо того чтобы снисходительно сказать «это слишком сложно», я попытаюсь объяснить, что к чему, простым языком. (Обратите внимание: слово «флюид» часто ошибочно используют как синоним слова «жидкость». Вещества могут быть твердыми, жидкими и газообразными, а также в состоянии плазмы, если их очень сильно разогреть. Но «флюид» не обозначает состояние вещества, это слово говорит о том, какой именно текучестью обладает вещество или как оно деформируется. Сюда также относятся другие способы деформации: упругость, пластичность, хрупкость и т. д. Твердое вещество может действовать как флюид, когда ледники и мантии деформируются, а газ и жидкость могут действовать как упругие вещества, когда через них проходят звуковые волны.)

Представьте банку, которая на четверть заполнена разноцветными шариками-марблами или, если хотите, шариками из подшипников. Если шарики хорошо уложены на самое дно банки и пребывают в состоянии покоя, они выстраиваются в идеальные ряды, плотно прилегая друг к другу. Как правило, каждый шарик лежит в углублении, образованном другими шариками под ним. Это похоже на поведение атомов твердого вещества – атомы также имеют строгую структуру и обычно не двигаются (если оставить их в состоянии покоя). Если начать трясти банку так, чтобы шарики смещались и сталкивались друг с другом, это будет похоже на то, как ведет себя жидкость: атомы движутся, но все еще находятся в контакте друг с другом. Если же мы начнем трясти банку изо всей силы, шарики начнут хаотично подпрыгивать внутри нее и заполнят весь объем: по сути, они ведут себя как газ, атомы которого движутся хаотично, заполняют объем, отражаясь от стенок контейнера и редко встречаясь друг с другом. Но вернемся к находящейся в покое банке с «твердым» слоем шаров. Немного наклоним ее – плотно лежащие шары не сдвинутся с места. Если мы продолжим наклонять банку, то некоторые шары покинут занятые ими углубления и займут другие ниши внизу. Мы увидим медленное движение шариков из одного углубления в другое – так, чтобы слой постепенно перетекал и приспособливался к наклону, но большую часть времени (т. е. в долгих интервалах между тем, как каждый шарик перемещается на новое место) по-прежнему оставался «твердым». В настоящих твердых телах двигающиеся атомы покидают свое положение между другими атомами и занимают новое устойчивое положение в атомарной структуре. Горные

породы в мантии двигаются в условиях механического напряжения (растяжения и сдвливания) и под действием силы тяжести, перемещающей легкие и тяжелые породы. Но мантия движется невероятно медленно. Прибегнем к такому сравнению: она движется примерно с той же скоростью, с какой растут ногти у вас на руках: вам не слишком-то хочется рассматривать, как они растут (разве что от скуки), но вы знаете, что они растут.

Пусть это так же скучно, как наблюдать за ростом ногтей, но тем не менее это важно, потому что медленная конвекция твердой земной мантии управляет всеми процессами, происходящими в Земле. Как мы увидим далее, конвекция является причиной движения тектонических плит и, следовательно, причиной землетрясений, вулканов, горообразования и т. д. Конвекция мантии также устанавливает медленный темп остывания нашей планеты, в процессе которого она отдает свое тепло в космос, ведь Земля не может терять тепло быстрее, чем мантия. Конвекция является одним из способов, с помощью которого флюиды избавляются от тепла, поглощая холодное вещество около поверхности и смешивая его с горячим веществом внизу (представьте себе кубики льда, брошенные в горячий чай). Также в результате конвекции горячее вещество из нижних слоев поднимается к более холодной поверхности, где быстрее теряет тепло. Мантия охлаждается именно таким образом: быстрее, чем если бы она представляла собой большой статичный монолит из горных пород, но постепенно из-за того, что мантия движется очень медленно. Это означает, что мантия перемещает литосферные плиты на протяжении миллиардов лет, и это движение плит необходимо нам, потому что оно поддерживает стабильный климат на Земле и способствует сохранению жизни – но об этом поговорим чуть позже.

Медленное охлаждение мантии не позволяет ядру Земли остывать слишком быстро, и оно по-прежнему большей частью находится в расплавленном состоянии. Мы уже говорили, что сейсмологи смогли по сейсмическим волнам определить, что основная часть ядра является жидкой, хотя внутри его содержится твердое внутреннее ядро, которое медленно остывает и твердеет. Жидкое внешнее ядро, расположенное вокруг затвердевающего внутреннего, является текучим, а поскольку оно состоит из железа, то может проводить электрический ток. Текучесть внешнего ядра обеспечивается конвекцией, вызванной охлаждением ядра, и вращением Земли. Движение этого электрического проводника в слабом магнитном поле, создаваемом магнитным полем Солнца, создает электрические токи по принципу работы электрогенератора (вращение

проволочной катушки в магнитном поле вызывает электрический ток). Затем эти электрические токи генерируют собственное магнитное поле. Все магнитные поля без исключения вызваны движением электрических зарядов либо свободными электронами, текущими в электрических проводниках, например в проводах, или связанными электронами, вращающимися вокруг атомного ядра (благодаря чему магниты прикрепляются к дверце холодильника). Электрические токи и связанное с ними магнитное поле, генерируемое в ядре, стало достаточно сильным и организованным, чтобы поддерживать общее магнитное поле Земли.

Земля обладает чрезвычайно сильным магнитным полем для такой маленькой планеты, гораздо более сильным, чем у других планет земной группы. Поле Земли хорошо структурировано, преимущественно как стержневой магнит с «северным» и «южным» полюсами. У Венеры, мнимого близнеца нашей планеты, своего магнитного поля нет. В коре Луны и Марса встречаются участки намагниченных пород, возможно, у них когда-то были свои собственные магнитные поля, но сейчас их нет. Меркурий обладает крупным железным ядром, являющимся источником дипольного магнитного поля, похожего на земное, но значительно более слабого. И только газовые гиганты и планеты-океаны во внешней области Солнечной системы имеют сильные магнитные поля, самым мощным полем обладает – вот сюрприз – Юпитер.

Магнитное поле Земли проходит через верхние слои атмосферы и даже достигает Луны (благодаря солнечному ветру, «обтекающему» поле Земли таким образом, что оно становится похоже на кита с длинным хвостом). Поле защищает нас и нашу атмосферу – о чем пойдет речь в следующей главе – от заряженных частиц солнечного ветра и от солнечных вспышек. Магнитное поле удерживает эти частицы высоко над атмосферой в регионах, называемых радиационными поясами Ван Аллена, которые расположены вокруг Земли. Пояса действуют как «магнитные бутылки»: когда после солнечных вспышек и геомагнитных бурь в них накапливается слишком много заряженных частиц, они «изливают» эти частицы в верхние слои атмосферы вблизи Северного и Южного полюсов, вызывая полярные сияния. Магнитное поле Земли, вопреки тому что утверждается в голливудских фильмах, не защищает нас от незаряженных частиц и излучения, например микроволнового.

Магнитное поле Земли создается в жидком ядре – эта идея исходила из того, что геомагнитное поле зарождается внутри Земли (это установил в начале XIX в. немецкий математик Карл Фридрих Гаусс), но перемещается гораздо быстрее, чем геологические процессы передвигают вещество в



мантии (и чем растут ваши ногти). Геомагнитное поле схоже с полем обычного магнита (минерала магнетита, свойства которого обусловлены его кристаллическим строением), однако его источник – не постоянный магнит, ведь земная мантия и ядро слишком горячи, чтобы превратиться в намагниченные минералы и железо. Магнитное поле Земли от десятилетия к десятилетию и от века к веку смещается (это заметил в конце XVII в. Эдмунд Галлей, чьим именем названа знаменитая комета), а каждые несколько сотен тысяч лет резко меняет направление: происходит инверсия северного магнитного полюса на южный. Такой процесс в недрах Земли должно создавать что-то большое, подвижное и электропроводящее (о чем догадывался еще Галлей), и единственным претендентом на эту роль является жидкое внешнее железное ядро. Однако лишь в последние 20 лет с помощью компьютеров удалось смоделировать механизм генерации магнитного поля Земли (геодинамо).

Многие детали этой теории все еще вызывают споры. Например, до конца не известно, что является источником энергии геодинамо. Тепловая конвекция? (Действительно, на границе ядра и мантии жидкое железо, остывая, становится тяжелее и опускается.) Но железо отлично проводит тепло, конвективные потоки легко смещаются, и тепловая конвекция кажется слишком слабым источником энергии.

По другой теории, конвекция обусловлена различным химическим составом ядра Земли. Считается, что жидкое внешнее ядро состоит из смеси железа, никеля и небольшого количества легких элементов, таких как сера. Когда этот расплав застывает на границе внешнего и внутреннего ядер, легкие элементы растворяются в нем, расплав становится чрезвычайно плавучим и быстро поднимается со дна к верхней части внешнего ядра, создавая конвективное движение и питая геодинамо. Отсутствие магнитного поля у Венеры может быть связано с более высокими температурами на этой планете, горячие мантия и ядро которой не позволяют остыть внутреннему ядру. Это укрепляет предположение, что механизм геодинамо вызывается химической конвекцией, связанной с кристаллизацией внутреннего ядра. В принципе есть и другие потенциальные источники энергии для геодинамо, вопрос, какой из них является главным, нам еще предстоит прояснить.

Но вернемся к поверхности Земли и к вопросу о происхождении земной коры и континентов. Кора планеты обычно формируется из самых легких расплавов, которые остывают, поднявшись на поверхность. Когда на Земле существовал океан магмы, самые легкие вещества именно так образовали тонкую кору. Но, вероятно, от нее мало что сохранилось до

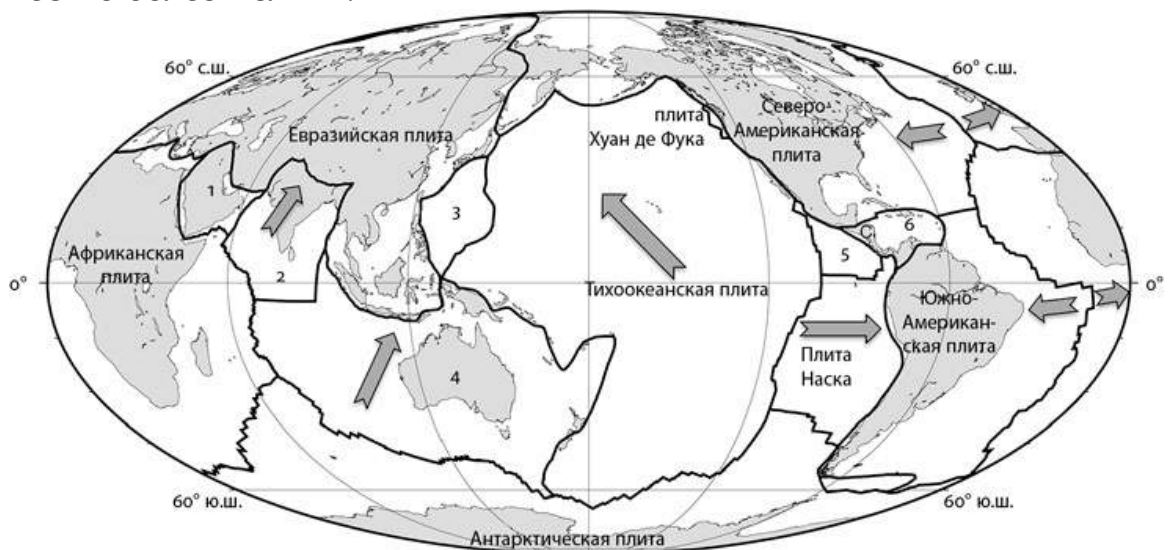
наших дней. Расплав, поступающий из мантии (или океана магмы) на поверхность планеты, представляет собой жидкую текучую лаву – базальт. Лучший пример – лава гавайских вулканов, образующих базальт и в наши дни. Гавайские острова сформировались (а некоторые все еще формируются) над необычно горячей областью земной мантии, называемой «горячей точкой». Эту точку, по всей видимости, создает горячий конвективный апвеллинг, он же мантийный плюм, который поднимается по всей площади мантии с нижней ее части, расположенной вблизи горячего железного ядра. В глубине мантии плюм остается твердым, а по мере приближения к поверхности частично плавится (на 10–20 % или больше), поскольку плавление легче происходит при низком давлении. Плавящееся вещество выходит на поверхность планеты уже в виде базальта. Гавайский плюм выбрасывает его так много, что образует огромные вулканические острова (по сути это щитовые вулканы – широкие и с пологими склонами). На других планетах земной группы также есть базальтовая кора, возможно созданная таким же образом, – к примеру, гора Олимп на Марсе выглядит, как гигантский щитовой вулкан.

Вместе с тем огромное количество базальтовой коры Земли образуется без участия наземных вулканов – вдоль длинных поясов подводных горных хребтов, называемых срединно-океаническими. Они опоясывают Землю, как швы на бейсбольном мяче. Правда, швы это никудышные, именно в этих местах дно разрывается, и из мантии поднимаются потоки базальтовой лавы, застывая и формируя новые участки океанической коры. Этот процесс называется растеканием (спредингом) морского дна, и его открытие привело к появлению революционной теории тектоники литосферных плит.

Растекание морского дна предсказал геофизик Гарри Хесс в начале 1960-х гг., а вскоре Фредерик Вайн, Драммонд Мэтьюз и Лоуренс Морли открыли это явление. Базальты срединно-океанических хребтов содержат магнитные минералы. Растекаясь и застывая, они «записывают» направление магнитного поля Земли – как металлическая стружка на листе бумаги показывает линии магнитного поля подложенного магнита. Как мы уже говорили, геомагнитное поле нашей планеты периодически меняет свое направление, и по мере растекания дна эти инверсии фиксируются в базальте как на телеграфной ленте или магнитофонной пленке (не самые популярные в наши дни носители, но ни современные флеш-накопители, ни компакт-диски явно не подходят для этой аналогии). Таким образом, параллельно срединно-океаническим хребтам образуются полосы магнитных аномалий, показывающие, когда геомагнитное поле было

направлено вверх или вниз, а это означает, что морское дно двигалось наружу во время «записи» этих событий (следовательно, можно выяснить, как быстро оно перемещалось).

Открытие растекания морского дна стало, по мнению большинства геологов, началом революционных открытий в геологии. Идея о том, что поверхность Земли подвижна, обсуждалась с 1920–1930-х гг. Вначале возникла теория дрейфа материков. Предложенная немецким метеорологом Альфредом Вегенером, эта гипотеза утверждала, что континенты перемещаются подобно айсбергам, пробиваясь сквозь океаническую кору (впоследствии было доказано, что это невозможно). Сформулированная позже теория тектоники плит утверждает, что вся поверхность планеты разделена на гигантские фрагменты-пазлы, которые находятся в постоянном движении относительно друг друга, а встроенные в эти пазлы континенты лениво движутся вместе с ними. Гигантские куски пазлов называются литосферными плитами, из них выделяют восемь крупных, например Тихоокеанскую плиту (самую большую), и небольшое количество более мелких.



- |                         |                        |
|-------------------------|------------------------|
| 1. Аравийская платформа | 4. Австралийская плита |
| 2. Индостанская плита   | 5. Плита Кокос         |
| 3. Филиппинская плита   | 6. Карибская плита     |

Литосферные плиты, как фрагменты пазла, раскалывают верхний каменный слой Земли, при этом плиты движутся относительно друг друга. На рисунке изображены основные литосферные плиты, стрелки указывают направления их движения. Взаимные движения плит определяют типы их границ: дивергентные (см. расширяющийся Срединно-Атлантический хребет между Евразийской и

Северо-Американской плитой), конвергентные (например, столкновение Индостанской и Евразийской плит, в результате которого сформировались Гималаи) и трансформные (например, разлом Сан-Андреас на Западном побережье США, между Тихоокеанской и Северо-Американской плитой). Там, где плиты сходятся в зоны субдукции, происходит погружение более старых и холодных плит в нижележащую мантию, что охлаждает ее. Это одна из форм мантийной конвекции. (Схема предоставлена Полом Весселом из Гавайского университета в Маноа.)

Многие ученые внесли свой вклад в уточнение теории тектоники плит, математическая модель, описывающая их движение, была предложена Дэном Маккензи и Джейсоном Морганом. Однако до сих пор остается загадкой, почему на Земле, в отличие от других планеты земной группы, вообще происходит тектоника плит.

Тектонические плиты – это прочные твердые блоки холодной породы толщиной до 100 км (при этом у них слабые края). Плиты непрерывно скользят (в геологическом масштабе времени; в масштабе времени человека скольжение может принимать форму землетрясений), благодаря чему происходит их движение. Как уже было сказано, там, где происходит растекание морского дна, эти фрагменты пазла раздвигаются. Но если плиты расходятся друг от друга в одной зоне, значит, в другой их противоположные края будут сближаться. Регионы, где это происходит, называются зонами субдукции. В частности, плита, сдвигающаяся от другого блока земной коры, обычно противоположным краем сталкивается с третьей плитой и погружается под нее. Процесс погружения одной плиты под другую называется субдукцией. Эти зоны хорошо прослеживаются в самых глубоких желобах океана, таких как Марианская впадина, где океанское дно проваливается вниз под весом погружающихся плит. Все это движение не случайно: насколько об этом можно судить с поверхности, оно является проявлением конвекции мантии Земли. Литосферная плита опускается, потому что остывает, удаляясь от горячего места растекания морского дна, где была создана. В конце концов она становится холодной и достаточно тяжелой, чтобы погрузиться под медленнодвигающуюся мантию, при этом охлаждая ее. Таким образом, субдукция (погружение одних участков земной коры под другие) эквивалентна холодному и тяжелому конвективному даунвеллингу (опусканию слоев вещества).

Геофизики (и я в их числе) полагают, что субдукция – это не только проявление конвекции земной мантии, но и главная движущая сила тектоники плит. Холодная, погружающаяся часть плиты (слэб) остужает мантию благодаря конвекции и в то же время тянет заднюю часть плиты на

поверхность. Это подтверждается тем фактом, что плиты с обширными зонами субдукции на краях самые быстрые. Есть целый ряд плит, которые практически не имеют зон субдукции и движутся гораздо медленнее: по всей видимости, их просто толкают погружающиеся плиты. Самая крупная литосферная плита – Тихоокеанская – обладает самым большим количеством зон субдукции и быстро перемещается, примерно на 10 см в год.

Зоны субдукции также являются областями, где происходят наиболее сильные и разрушительные землетрясения. Землетрясения случаются и в районе срединно-океанических хребтов, но они незначительны. Подводные хребты также производят большую часть лавы, но она жидкая и легко течет. Там, где плиты не расходятся в разные стороны и не сближаются, а «скользят» одна рядом с другой (как, например, в разломе Сан Андреас и Анатолийской зоне разломов), землетрясения происходят значительные, но не разрушительно сильные. Также в этих зонах практически отсутствует вулканизм, так как движение там не связано с поднятием горячей породы мантии к поверхности. Однако погружающаяся плита задевает край верхней плиты и тянет ее вниз, сгибая в форме лука. Когда сила трения между этими плитами уже не может выдержать напряжение, верхняя плита распрямляется обратно вверх, «выстреливает», порождая сильнейшие землетрясения и зачастую цунами.

А еще в зонах субдукции активно извергаются вулканы, несмотря на то что эти зоны находятся там, где происходит погружение холодных плит. Что же заставляет расплавленные горные породы подниматься к поверхности, создавая вулканы? Образование вулканов в этих областях – ключ к пониманию того, откуда вообще берется большая часть континентальной коры. В самом деле, на других известных нам планетах нет тектоники плит и континентальной коры.

Процесс плавления в зонах субдукции сложнее, чем в срединно-океанических хребтах или таких горячих точках, как Гавайи. Ни в одном из этих случаев плавление не вызвано тем, что порода становится горячее (что мы обычно представляем себе, когда думаем о плавлении льда или воска). На срединно-океанических хребтах и в горячих точках породы мантии Земли плавятся, потому что поднимаются к зонам более низкого давления, которое облегчает процесс плавления. В зонах субдукции плавление облегчает вода. Литосферные плиты, входящие в зону субдукции, как правило, находились под водой от десятков до нескольких сотен миллионов лет. Извергающаяся в районе срединно-океанических хребтов лава вступает в реакцию с водой и создает гидратированные

минералы (породы, содержащие воду или водород), такие как амфиболы и серпентин. Осадочные отложения, смываемые с континентов (которые, как принято считать, тогда еще не образовались) и опускающиеся на дно океана, также вбирают воду (и углерод, что мы обсудим позже). Когда плита достигает зоны субдукции, значительная часть ее тонкой коры содержит гидратированные минералы и большинство их погружаются в зону субдукции вместе с остальной частью плиты, хотя многие осадочные отложения откалываются и скапливаются на поверхности. Когда эти минералы погрузятся примерно на 100 км в глубь мантии, температура и давление становятся слишком высокими, чтобы они могли остаться гидратированными, поэтому минералы испускают воду – в сущности, она просто выпаривается и просачивается из верхней части погружающейся плиты или слэба в более горячую мантийную породу, которая становится гидратированной. Гидратированные мантийные горные породы плавятся легче, чем сухие, так как водород ослабляет минеральные связи, и поэтому даже при «скромных» температурах рядом с холодным погружающимся слэбом увлажненная мантия становится достаточно горячей, чтобы расплавиться. Это не совсем горячий мантийный расплав, тем не менее он поднимается к поверхности и похож на жидкую базальтовую лаву, хотя и холоднее, чем гавайские лавы. Достигнув поверхностных слоев земной коры, он будет плавить части, которые легко поддаются плавлению, т. е. могут быть расплавлены путем «прохладного мокрого» плавления. Такие легко плавящиеся горные породы, как правило, богаты диоксидом кремния (кремнекислородными молекулами или силикатами). Они плавятся и отделяются от остальной части коры. Наиболее богатой кремнием магмой является гранит – типичный продукт такого «холодного» плавления.

Первое субдукционное плавление на ранней Земле могло создать лишь немного гранита из существовавшей тогда тонкой океанической коры. Даже плавление современной океанической коры не дает большого количества гранита или похожих на него горных пород. Образующиеся при этом островодужные системы вулканов вблизи океанских хребтов, например на Антильских и Алеутских островах, могут иметь много первоначальной базальтовой магмы, перетекшей из земной мантии. (Термин «островодужные» используется потому, что зоны субдукции имеют форму сегментов круга.) Но так как все больше гранитной породы появлялось путем непрерывной плавки и переплавки коры, а также потому, что гранит слишком легкий, чтобы погружаться в мантию, он накапливался возле зон субдукции, как плавающие игрушки собираются возле слива ванны. Постепенно гранитная порода собиралась в груды земной коры, которая

становилась все толще и в конечном итоге образовывала континентальную кору. Кроме того, субдукционные процессы под континентами вызывают движение расплавов мантии к толще земной коры, где происходит еще большее плавление и отделение богатых диоксидом кремния пород, из-за чего образуется еще больше гранита. Хотя породы, богатые диоксидом кремния, плавятся легко, они очень толстые и вязкие, хотя и менее плотные, и потому их перемещение затруднено. Также они держатся за свои газовые пузырьки (образованные в основном из воды, которая способствовала плавлению мантии), отделившиеся от магмы при подъеме к зонам низкого давления (похожий процесс происходит, когда вы открываете бутылку газировки). Поэтому обычно созданные из такой магмы вулканы (чаще всего это вулканы континентальных дуг) выше и круче, так как толстой и вязкой магмы накапливается больше, прежде чем она растечется. Кроме того, они создают гораздо большее давление газа перед извержением, отчего извержения этих вулканов особенно сильные. Хотите верить, хотите нет, но именно благодаря процессу «мокрого плавления» в зонах субдукции появились континенты нашей планеты.

В общей сложности для формирования континентов Земли потребовалось около 2 млрд лет. В это время медленно отделялись от мантии и плавилась силикатные и гранитные породы. Периодически континенты собирались в гигантские пласты толстой коры, потом эти суперконтиненты из-за движения литосферных плит распадались на фрагменты размером с обычные континенты, а через несколько сотен миллионов лет вновь объединялись. Цикл образования и распада суперконтинента называется циклом Уилсона (в честь канадского геолога Тузо Уилсона). Последним суперконтинентом была Пангея, которая начала распадаться около 200 млн лет назад, о чем можно судить по разлому в Атлантическом океане вдоль Срединно-Атлантического хребта (центра растекания морского дна). Это объясняет, почему очертания восточного побережья Северной и Южной Америки совпадают с западными побережьями Евразии и Африки.

Для образования наших континентов были необходимы два условия: тектоника плит и вода в состоянии жидкости – много воды, чтобы минералы морского дна могли гидратироваться (присоединять молекулы воды). Оба этих условия являются уникальными для Земли, и, вероятно, одно не может существовать без другого. И тектоника плит, и вода в фазе жидкости (как мы увидим в следующих главах), вероятно, необходимы для того, чтобы стабилизировать климат на Земле на долгий геологический период времени. Это, в свою очередь, будет поддерживать температуры на

поверхности планеты достаточно ровными, чтобы вода могла существовать в жидком виде. Точно так же вода (или, по крайней мере, прохладный климат), вероятно, была нужна для тектоники плит. Похоже, тектоника плит, вода и умеренный климат нуждаются друг в друге и являются взаимозависимыми.

Насколько необходима вода или прохладный климат для тектоники плит? Ученые об этом до сих пор спорят. Например, скользкие отложения и гидратированные расплавы в зонах субдукции могут сохранять субдукцию гладкой и текучей. Но более прохладный климат Земли также помогает сохранять края литосферных плит мягкими, гибкими и скользкими. Трудно представить, что вода увлажняет границы плит по всей их 100-километровой толщине, вряд ли она может достигнуть зон с таким высоким давлением. Что-то еще должно делать плиты скользкими на таких глубинах. Горные породы, возникающие вблизи «быстро» деформирующихся границ плит, часто имеют необычные свойства, например минералы или минеральные зерна чрезвычайно малого размера (такие породы называются меланитами). Возможно, именно эти крошечные зерна, разрушаясь при трении, делают горные породы мягче и облегчают скольжение границ плит. Тем не менее минеральные зерна, находясь в состоянии покоя, также имеют тенденцию к медленному росту (по аналогии с пузырьками, возникающими в пене). Это помогает восстанавливать и укреплять горные породы, а такое восстановление происходит быстрее при высоких температурах. Возможно, прохладная поверхность Земли не только делает возможным существование океанов, но и предотвращает восстановление поврежденных границ литосферных плит. На Венере, поверхность которой намного более горячая, восстановление будет проходить быстрее, а повреждения будут слабее, поэтому границы плит вряд ли сохранились бы. Возможно, это объясняет, почему на планете – сестре Земли, похоже, нет тектоники плит. Но если говорить начистоту, гипотеза «разрушения и восстановления», объясняющая природу тектоники плит, является предметом исследований автора этой книги и потому не лишена доли предвзятости.

Если тектоника плит, океаны и умеренный климат зависят друг от друга, возникает вопрос, подобный загадке о курице и яйце: что же появилось раньше? Это «вопрос на миллион» в науках о Земле, не дешевый, конечно, вопрос, но и не такой дорогой, как Большой взрыв, который можно оценить в триллионы долларов. Чтобы ответить на него, мы должны знать, когда – если даже не знаем как – возникла тектоника плит и океаны. Есть привлекательные, но далекие от окончательных



предположения, которые могут дать ответ на этот вопрос.

В последнее десятилетие мы стали свидетелями открытия очень древних крошечных минералов циркона (тип кристалла) возрастом 4,4 млрд лет, собранных в основном лишь в австралийской местности Джек Хиллс. Эти кристаллы, по всей видимости, образовались в гранитах. Поскольку большинство гранитов образуются за счет плавления гидратированных горных пород, само их наличие означает, что вода и процессы субдукции (и, следовательно, что-то вроде тектоники плит) уже существовали в то давнее время. Мы не знаем, что появилось раньше, возможно, они появились одновременно. Возможно, если бы они не появились одновременно, то не появились бы вообще никогда. Тем не менее есть вероятность, хотя и весьма низкая, что граниты формировались другими способами. Можно неоднократно переплавлять горные породы, например беспрестанно изливая на нее горячую лаву гавайского типа. Вопрос, что появилось раньше, тектоника плит или вода, все еще открыт. Тем не менее мы рассмотрим его в следующих главах.

Рассматривая образование континентов, на которых мы с вами живем, нам пришлось заглянуть внутрь Земли и понять, как она движется. При этом мы обнаружили еще две большие странности Земли в дополнение к нашей странной Луне. Во-первых, вероятно, все планеты земной группы имеют мантии, поддерживающие тепловую конвекцию, но только на Земле она проявляется в виде тектоники плит, которая вызывает разрушительные землетрясения и извержения вулканов, выносит мантийные горные породы (магму) на поверхность и уносит обратно в мантию поверхностный материал, например воду и (мы еще поговорим об этом) углекислый газ. Насколько нам известно, на других планетах земной группы обмен идет односторонний, они просто извергают магму на поверхность с помощью вулканов. Во-вторых, у Земли есть сильное магнитное поле, которого нет ни у одной другой планеты земной группы, по крайней мере такого же, как у нас (спорное исключение – Меркурий). Наше магнитное поле проходит через верхние слои атмосферы, но, что удивительно, создается в естественном «генераторе» из жидкого железа, находящегося в центре нашей планеты. По внутренней структуре и составу Земля и Венера не слишком отличаются. Даже размеры этих двух планет почти одинаковы. Однако условия на Земле и Венере – их орбитальное расположение относительно Солнца или, возможно, тот факт, что одна из планет-сестер испытала столкновение с объектом, в результате которого образовалась Луна, а другая нет, – складывались совершенно по-разному. Только на Земле появились магнитное поле, тектоника плит, вода в фазе жидкости и

ЖИЗНЬ.



5. Океаны и атмосфера

Жизнь состоит из веществ, которые в основном обнаруживаются в разреженной прослойке газов и водяного пара на поверхности нашей планеты. Мы представляем собой углеродную форму жизни, состоим в основном из воды и очень зависим от растений, которые преобразуют углекислый газ и воду в сахарозу. Но в жизни есть вещи и посерьезнее сахарозы (а может, и нет, зависит от того, насколько вы любите сахар), и вскоре мы рассмотрим это подробнее. А для начала давайте зададимся вопросом, откуда вообще взялась эта оболочка из газа и воды. Судьба атмосфер (и, вероятно, океанов) планет земной группы была предопределена, когда Протосолнце создало планеты внутренней области Солнечной системы слишком горячими, чтобы на них могла конденсироваться жидкость из протосолнечного газового диска (см. главу 3). Внешняя область Солнечной системы, за пределами снеговой линии, сохранила много льда, жидкостей и таких газов, как водород и все, что может быть из него получено (например, вода, метан и аммиак). Внутренняя Солнечная система осталась с кучей «камней» и без каких-либо предпосылок к образованию где-либо существенной атмосферы. Однако в наши дни Венера имеет массивную атмосферу, у Земли она тоже достаточно плотная, а атмосфера Марса хоть и разреженная, но все же существенная (вот, например, Меркурий обладает слишком разреженной атмосферой, чтобы о ней упоминать). Откуда же взялись атмосферы у планет земной группы?

Имелись две точки зрения (хороший способ заменить оборот «шли бурные дебаты») на эту проблему. Одна из теорий, так называемая гипотеза позднего вмешательства, исходит из того, что поверхности Земли и других планет земной группы были подвержены сильным бомбардировкам астероидами, приходящими по эксцентричным орбитам из внешней области Солнечной системы. Эту эпоху (около 4 млрд лет назад) называют поздней тяжелой бомбардировкой (возможно, вызванной миграцией гигантских планет, см. главу 3), и эта бомбардировка должна была начисто смести все атмосферы. Состав существующих сейчас атмосфер и океанов мог образоваться только после этого разрушительного события, в результате которого из внешней области Солнечной системы вместе с астероидами были доставлены летучие (легко испаряющиеся) компоненты, такие как лед, углекислый газ и др. (В главе 3 говорилось о двух больших областях скопления комет в Солнечной системе – поясе Койпера прямо за орбитой Нептуна и расположенном очень далеко облаке Оорта.) Таким образом, внешний слой атмосферы был образован поздно.

Сторонники другой теории утверждают, что атмосфера и океаны

образовались из самой планеты, и эта теория имеет менее привлекательное название – эндогенное происхождение, т. е. атмосфера образовалась на Земле без влияния извне. (Таким образом, теория позднего внешнего вмешательства может быть названа экзогенной.) Как мы уже говорили, вода может содержаться в гидратированных минералах поверхностных горных пород, а углекислый газ – в породах, называемых карбонатами, обычно встречаемых в форме известняка или мела. Большинство мантийных пород также могло присоединять воду и углекислый газ в различные гидратированные или карбонизированные формы, но в очень малых количествах; в большинстве своем эти породы могут поглощать летучие вещества в размере лишь доли процента от своего веса. Тем не менее мантийным породам не нужно было много воды, чтобы образовать океаны нашей планеты. Масса океанов Земли составляет в общей сложности около 0,03 % от всей массы мантии (масса атмосферы ничтожна по сравнению с океанами), и можно было бы спрятать наши океаны в мантии несколько раз, а горные породы даже не стали бы мокрыми (может быть, слегка влажными). Даже слегка увлажненные и карбонизированные породы астероидов и планетезималей, которые сформировали нашу планету, похоронили бы эти компоненты глубоко внутри Земли, поскольку она увеличивалась. Таким образом, мантия могла бы сохранить достаточное количество воды и двуокиси углерода, чтобы в конечном итоге эта вода вышла наружу, образовав океаны и атмосферу.

Но каким образом вода и углекислый газ смогли попасть на поверхность Земли, если они находились глубоко внутри планеты? Во-первых, если океан магмы действительно существовал, что кажется вполне правдоподобным, то при его кристаллизации было бы выделено значительное количество летучих газов, таких как вода и углекислый газ. Можно предположить, что первоначально океан магмы содержал в себе летучие вещества из исходных строительных блоков планет, например хондритов. Если бы весь океан магмы одновременно остыл, летучие вещества остались бы растворенными в конечной твердой мантии в малых концентрациях и при этом были бы широко распространены. Однако океан магмы должен был представлять собой смесь различных компонентов, одни из которых остывали быстрее, чем другие. Жидкие части, которые застывали медленнее, сохраняли все большее количество воды и углекислого газа, так как жидкости растворяют гораздо больше этих летучих веществ, чем кристаллизующиеся вещества. (Хорошим примером того, что жидкости лучше растворяют большинство химических веществ, служит вода – она растворяет соль намного эффективнее льда, даже в

морском льду соли почти нет.) К тому моменту, когда океан магмы окончательно остыл, остатки расплава содержали много летучих веществ. Легкие расплавы поднялись к поверхности, более глубокие и более плотные ушли вниз, сформировав нижний слой океана магмы (этот процесс описывался в главе 4). Так как плавучие жидкости поднимаются к зонам более низкого давления, они начинают хуже растворять летучие вещества и потому высвобождают их (вот почему бутылка газировки шипит, когда вы открываете крышку и давление падает: углекислый газ внезапно становится нерастворимым и создает пузыри). Последние плавучие расплавы в остывшем океане магмы вначале накопили бы, а затем выпустили много воды и углекислого газа, высвобождая их в виде газа на поверхность планеты и, вероятно, делая это довольно быстро (по геологическим меркам).

Весьма вероятно, что благодаря затвердению океана магмы образовалась бóльшая часть первоначальной воды и состоящей из углекислого газа атмосферы, однако мантия продолжала медленно выделять газы и воду даже после того, как затвердела. Даже если бы океана магмы не было, из мантии все равно просочились бы вещества, из которых впоследствии образовалась ранняя атмосфера, просто этот процесс был бы более продолжительным. Мы уже упоминали, что в твердой мантии процессы конвекции протекают медленно и, по мере того как горячие поднимающиеся горные породы приближаются к поверхности и входят в зоны более низкого давления, они плавятся легче (хотя ненамного, возможно, на десятые доли процента). Этот расплав остается на поверхности, образуя кору, почти всегда океаническую. Как отмечалось выше, когда расплав только формируется, он намного лучше твердой породы растворяет летучие вещества, такие как вода и углекислый газ. Таким образом, когда мантия плавится, вода и углекислый газ, растворенные в горных породах, стремительно переходят (если позволите так выразиться) в расплав, который наполняется этими летучими веществами. Поднимаясь к поверхности Земли, расплав входит в зоны более низкого давления и, как откупоренная бутылка газировки, начинает выпускать газ. Именно это заставляет вулканы извергаться – быстрое высвобождение воды и углекислого газа в поднимающейся магме. Застывая на поверхности Земли или вблизи нее, магма уже не может растворять газ, и оставшаяся часть газа высвобождается. Суть в том, что небольшое количество расплава твердой мантии вбирает в себя эти газы и доставляет их на поверхность, это происходит исключительно за счет всевозможных форм вулканизма – от мощных извержений вулканов до мирного выброса

лавы глубоководными центрами спрединга. Что бы ни было причиной – океан магмы и/или вулканизм, не требуется много расплава, чтобы извлечь летучие вещества из гигантской мантии для создания океанов и атмосферы.

Какая же гипотеза происхождения атмосферы верна – эндогенная или экзогенная? В естественных науках редко удается дать четкий однозначный ответ. Лучшим ответом, вероятно, будет то, что вода и другие летучие вещества попадали в атмосферу Земли, вероятно, обоими путями. Но какой путь – эндогенный или экзогенный – имел большее значение? Один из основных аргументов против экзогенной гипотезы (гипотезы позднего вмешательства) состоит в том, что химический состав комет (его можно измерить с помощью телескопов по спектру отраженного от комет света, а иногда и напрямую, с помощью космических аппаратов) отличается от того, что содержат океаны Земли. Наиболее очевидным признаком является соотношение количества дейтерия (тяжелого водорода с одним протоном и одним нейтроном в ядре) и обычного водорода (у которого в ядре только один протон). Это отношение обычно значительно больше на кометах, чем на Земле (т. е. на кометах больше дейтерия). Диапазон этого соотношения для комет, однако, довольно широк и превышает значения Земли не намного, так что это нельзя считать явным аргументом в пользу данной теории. Тем не менее другие подобные соотношения, например между изотопами азота, показывают, что их количество у комет и у Земли очень различается. В то же время химические и изотопные составы метеоритов из пояса астероидов, а именно хондритов, совпадают с земными. Таким образом, изотопные доказательства в целом указывают на то, что океан и атмосфера не «доставлены с запозданием» из космоса, а зародились внутри Земли и попали на поверхность в ходе ее аккреции хондритовыми строительными блоками. Кроме того, гипотеза позднего внешнего вмешательства основана на идее, что тяжелая метеоритная бомбардировка должна была уничтожить атмосферу не раньше чем 4 млрд лет назад (или даже немного позже). Но австралийские цирконы, которые мы упоминали выше, позволяют сделать вывод, что вода в состоянии жидкости уже имела на поверхности Земли более 4 млрд лет назад, несмотря на горячую и враждебную окружающую среду.

Учитывая все имеющиеся на сегодняшний день доказательства, можно сделать вывод, что атмосферы на Земле появлялись в основном путем дегазации, т. е. «просачивались» изнутри нашей каменистой планеты при затвердевании океана магмы, а затем и во время вулканической активности или при обоих процессах сразу. Первичная атмосфера Земли не имела ничего общего с сегодняшней атмосферой: если ее образовал

вулканический газ, она должна была состоять, главным образом, из углекислого газа и воды.

И углекислый газ, и вода являются парниковыми газами: они пропускают видимый свет от Солнца, который согревает землю; тепло от земли исходит в виде инфракрасного излучения, которое поглощается парниковыми газами, как одеяло нагревающими поверхность нашей планеты. При большом количестве углекислого газа и воды в атмосфере Земли могло скопиться много тепла, поэтому было очень жарко – температура поверхности, возможно, превышала 200–300 °С, что весьма отличается от современных 15 °С. Похожая по размеру и химическому составу на Землю, Венера могла бы иметь такой же состав атмосферы, но она расположена немного ближе к Солнцу, на ней намного более сильный парниковый эффект, и ее поверхность была еще горячее. Венера все еще близка к тому состоянию, имея температуру поверхности около 500 °С. Изначально на Земле и на Венере было примерно одинаковое количество углекислого газа в атмосфере и, возможно, воды. В наши дни массивная атмосфера Венеры все еще содержит большую часть того углекислого газа, а давление на ее поверхности в 90 раз больше, чем на Земле. (На Земле, чтобы испытать давление в 90 атм, нужно опуститься на подводной лодке на глубину 1000 м). Вероятно, в атмосфере Земли было почти такое же содержание углекислого газа, эквивалентное по меньшей мере давлению в 60 атм. Однако сейчас на Земле и Венере наблюдаются совершенно разные условия.

Сейчас на поверхности Венеры или в ее атмосфере почти нет воды. Атмосфера этой планеты до сих пор состоит в основном из углекислого газа, а ее поверхность настолько раскалена, что находящиеся на ней горные породы ночью излучают свет. Земля имеет гораздо более разреженную атмосферу с очень небольшим количеством углекислого газа, и, конечно, на Земле достаточно прохладно, чтобы здесь могли быть полные воды океаны и, следовательно, жизнь. Если раньше эти планеты были так похожи, почему они стали такими разными?

Как уже отмечалось, атмосферы Земли и Венеры первоначально были чрезвычайно густыми и состояли из углекислого газа и воды при очень высоких температурах и давлении на поверхности. На Земле, куда попадало чуть меньше солнечного света, температура, вероятно, была достаточно низкой, а давление на поверхности достаточно высоким, чтобы вода здесь имела вид жидкости. При нынешнем давлении на Земле в 1 атм вода закипает при 100 °С; если давление повысить, она закипит при более высокой температуре (по этому принципу работает скороварка). При

давлении в 60 атм вода могла оставаться в состоянии жидкости при температуре на поверхности Земли 200–300 °С (ниже 270 °С, чтобы быть точным). Наличие этой воды в сочетании с изменением поверхности Земли в результате тектоники плит (мы обсудим это подробнее в следующей главе), возможно, было достаточно, чтобы количество углекислого газа стало сокращаться, поскольку он связывался с горными породами. Они постепенно остужали атмосферу, создавая условия для увеличения количества воды. А увеличение количества воды и все более остывающая поверхность планеты в свою очередь способствовали тектонической активности (мы обсуждали это в предыдущей главе), отчего содержание углекислого газа продолжало падать. В итоге лишь малая часть углекислого газа осталась в атмосфере Земли, остальная перешла в состав горных пород.

На Венере, залитой бóльшим количеством солнечного света, вероятно, было слишком жарко, чтобы вода могла выпадать в виде дождя. Вся она оставалась в атмосфере, поддерживая раскаленную температуру. Солнечный ультрафиолет разделил молекулы воды на водород, который улетучился в космос, и высокоактивный кислород, который связался с минералами на поверхности. В атмосфере Венеры осталось ничтожное количество воды. Кроме того, отсутствие воды в фазе жидкости и высокая температура поверхности, вероятно, мешали регулярному подъему из недр планеты новых пород, т. е. препятствовали процессу тектоники плит, который мог бы сократить количество углекислого газа. На Земле нужный баланс смог удерживаться – вода и тектоника плит, содействуя друг другу, уменьшали количество углекислого газа, в итоге создав пригодную для обитания поверхность. На Венере такой «кооперации» между водой и тектоникой не было, и поверхность планеты осталась адски горячей, сухой и бесплодной.

В наши дни атмосфера Земли намного более разреженная, чем во времена, когда она создавалась. Сейчас она почти на 80 % состоит из газообразного азота и почти на 20 % – из кислорода, а также небольшой примеси других газов (оставшегося углекислого газа, совершающей гидрологический цикл воды и инертного аргона, концентрация которого не меняется). Почти весь кислород в атмосфере биологического происхождения. В процессе фотосинтеза двуокись углерода (та ее часть, которая не ушла в горные породы) соединяется с водой. В результате получают органические молекулы (сахар) и кислород (подробнее об этом в главе 7). Азот, вероятно, попал из мантии в атмосферу при извержениях вулканов вместе с водой и углекислым газом. Будучи относительно



инертным (и при температурах, намного превышающих его точку росы), он остался в тех местах, где и был выброшен. До того как массивная атмосфера, состоящая из углекислого газа, была втянута в горные породы (а позднее и в живые организмы), азот был незначительным компонентом атмосферы, но, после того как это произошло, азот стал доминировать, кроме него в атмосфере мало что осталось.

Эволюция атмосферы Марса представляет собой любопытный контраст Земле и Венере. Сейчас атмосфера Марса почти полностью состоит из углекислого газа и примерно в 100 раз более разреженная, чем земная, при среднем давлении у поверхности менее 0,01 от давления земной атмосферы, измеренного на уровне моря. Окажись мы на поверхности Марса без скафандра, мы ощущали бы себя, как в вакууме. К тому же температура поверхности Марса весьма низкая, в среднем 60 °С. Полярные шапки Марса в основном состоят из водяного льда и некоторого количества сухого льда – замерзшей углекислоты. Вероятно, значительное количество льда содержится и в марсианской коре в регионах вечной мерзлоты. Экваториальные области могут получать достаточно тепла, чтобы лед таял, но атмосфера Марса настолько разреженная, что лед в основном сублимируется, т. е. испаряется, не проходя стадию жидкого состояния. Это значит, что в атмосфере Марса есть небольшое количество воды, которая выпадает в виде снега в более высоких широтах. Тем не менее исследования Марса показали, что на Красной планете когда-то было значительное количество воды в жидкой фазе – судя по эрозии поверхности, напоминающей русла рек и древние овраги. В какой-то момент прошлого атмосфера Марса была плотнее и теплее, этого было достаточно, чтобы на планете была вода в виде жидкости.

Имеются и некоторые признаки того, что в далеком прошлом на Марсе была тектоническая активность, возможно, в то время там имелась и жидкая вода. Быть может, Марсу был присущ взаимно поддерживающийся водно-углеродно-тектонический цикл, подобный тому, что наблюдается на Земле сейчас. Но это лишь догадки. В любом случае Марс потерял плотную атмосферу, сейчас его окружает разреженная газовая оболочка.

Одна из наиболее вероятных причин потери Марсом атмосферы – то, что он просто слишком мал, чтобы удерживать теплую атмосферу: молекулы газа легко достигали достаточно высокой скорости, выходили из гравитационного поля Марса, и таким образом атмосфера медленно улетучилась в космос. В то же время атмосфера Марса, вероятно, «сдувалась» солнечным ветром – потоком электрически заряженных частиц (ионов), который «обтекает» планеты. Эти частицы медленно выносят в

космическое пространство атмосферу из ее верхних слоев. Сильное магнитное поле Земли отклоняет солнечный ветер и защищает атмосферу (и нас) от этих частиц и их десорбирующего эффекта. Венера не имеет магнитного поля, поэтому даже сейчас ее атмосфера постепенно улетучивается; но так как она очень плотная, а сама планета обладает достаточной массой, чтобы удерживать молекулы газа, они рассеиваются в космическое пространство довольно медленно. Возможно, Марс некогда имел сильное магнитное поле (данные спутников зафиксировали следы древней тектоники плит – полосовые магнитные аномалии, «замороженные» в коре планеты, так же, как в центрах растекания морского дна Земли). Однако сейчас там тектоники плит нет и, вероятно, не было на протяжении большей части марсианской истории, поэтому атмосфера Красной планеты рассеивалась солнечным ветром. То, что Марс утратил (а может быть, и никогда не имел) тектонику плит и магнитное поле, также лучше всего объясняется его размерами: он слишком мал, чтобы сохранить в недрах изначальное, оставшееся со времен его формирования тепло, и потому конвекция в мантии и ядре Красной планеты стала слишком слабой, чтобы питать и тектонику плит, и магнитное динамо.

Возникновение атмосферы и океанов Земли позволило сформироваться условиям, подходящим для возникновения жизни. Структура и движение океана и атмосферы играют важную роль в жизнепригодности Земли, уже не говоря о том, что они стабилизируют климат (мы обсудим это в следующей главе).

Самый нижний слой нашей атмосферы называется тропосферой, здесь, как мы полагаем, формируются погодные условия и ветры. Это слой толщиной в среднем около 10 км (он толще на экваторе и тоньше на полюсах). Атмосфера здесь подвергается тепловой конвекции, весьма напоминающей конвекцию земной мантии. Нагретая лучами Солнца Земля согревает приповерхностный воздух, он поднимается, остывает, а затем опускается где-то в другом месте. Таким образом, в нижней части тропосферы теплее, в верхней – холоднее. Как мы вскоре увидим, конвективное движение в тропосфере – это сложный процесс, в основном он ответственен за движение ветров и погоду.

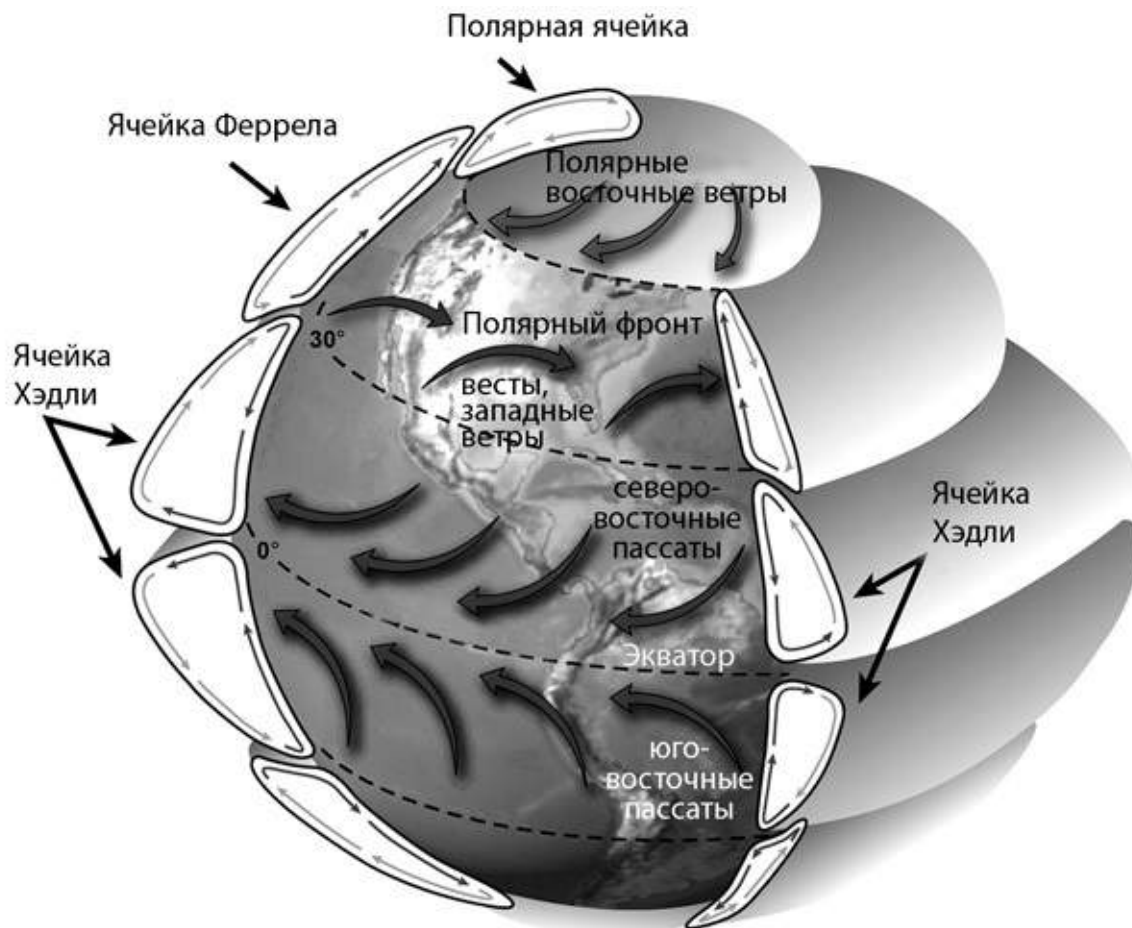
Над тропосферой расположена стратосфера, температура которой возрастает с увеличением высоты. Воздух в ее верхней части теплый, плавучий и неподвижный, он не тонет, поэтому аэрозоли и вулканическая пыль задерживаются там. (Стабильность стратосферы также защищает ее от конвекции, в этой зоне почти нет турбулентности, поэтому самолеты

гражданской авиации совершают полеты именно в нижней стратосфере.) Высокая температура стратосферы обусловлена наличием в ней озона – молекул, состоящих из трех атомов кислорода. И образование (из обычных молекул кислорода, которые имеют два атома), и разрушение стратосферного озона (до кислорода) происходит из-за поглощения определенных видов ультрафиолетового излучения, поступающего от Солнца, в результате стратосфера нагревается. Этот эффект также очень важен, так как защищает жизнь на поверхности Земли от вредного ультрафиолетового излучения. Развитие жизни и выработка кислорода были укрепляющими друг друга процессами, так как благодаря последнему появился защитный озоновый слой. Этот процесс также напоминает, почему потеря озонового слоя приведет к катастрофическим последствиям. Наличие озоновых дыр над полюсами Земли, предсказанное в 1970-х гг. и открытое в 1985 г., заставило международное сообщество регулировать процессы загрязнения воздуха для того, чтобы эти дыры затянулись.

Стратосфера простирается на высоту до 50 км, а то, что выше, является еще более разреженной мезосферой. Мезосфера простирается на высоту до 100 км, хорошо охлаждается излучением и потому холоднее, чем стратосфера. Следом за мезосферой располагается намного более горячая и гораздо более разреженная термосфера (примерно до 600 км), а еще выше – экзосфера (примерно до высоты 10 000 км или даже больше), за границами которой начинается космическое пространство. Верхняя мезосфера, термосфера и нижняя экзосфера, в которых высока концентрация ионизированных атомов, вместе образуют ионосферу, представляющую естественный канал для переноса радиоволн по всему земному шару.

Но давайте вернемся к тропосфере. Конвекция в этом слое приводится в движение солнечным теплом, максимально сильным вблизи экватора в тропиках, где солнечный свет падает на поверхность под прямым углом, и слабым на полюсах, куда солнечный свет почти не попадает. Если бы Земля не вращалась, конвекция представляла бы собой горячий воздух, поднимающийся от нагретой на экваторе поверхности в верхние части тропосферы, а затем переправляющийся к полюсам, где он бы остывал, опускался вниз и возвращался к экватору над поверхностью Земли. Однако наша планета вращается довольно быстро, и воздух, находящийся у поверхности на экваторе, движется по направлению на восток с очень высокой скоростью, проходя окружность Земли за сутки (т. е. 40 000 км за 24 часа, что равно 1700 км/ч). Воздух, находящийся у поверхности планеты у Северного и Южного полюсов, движется медленнее, проходя за 24 часа по меньшей окружности, чем на экваторе. На полюсах же почти полный

штиль, ветер вращается очень медленно и локально. Таким образом, воздух, поднимающийся на экваторе, с высокой скоростью дует в восточном направлении, и, по мере того как он поднимается, а затем перемещается в сторону холодных полюсов, его движение на восток становится все быстрее по отношению к поверхности. Таким образом, в то время как этот теплый поднимающийся воздух пытается переместиться к одному из полюсов, он будет все больше, относительно окружающего его воздуха, отклоняться к востоку, поэтому по существу воздух будет двигаться исключительно в восточном направлении по окружности вдоль заданной широты. В конце концов он теряет тепло и опускается вниз между 30° с.ш. и 30° ю.ш. (Флорида, США до Перта, Австралия). Этот прохладный опускающийся воздух достигает земли и распространяется на север и на юг. Двигающийся у поверхности к экватору ветер отклоняется на запад по отношению к окружающему его воздуху, который, как и сама поверхность Земли у экватора, движется более быстро в восточном направлении. Эти отклоненные к западу воздушные течения образуют пассаты – преобладающие в тропиках ветра. Вся эта циркуляция теплого воздуха, поднимающегося от экватора и циркулирующего между 30° с.ш. и 30° ю. ш., которая затем охлаждается, опускается и уходит обратно к экватору, называется циркуляционной ячейкой Хэдли. С другой стороны, поверхностный воздух, распространяющийся из опускающегося прохладного воздушного течения, находящегося за пределами 30° с.ш. и 30° ю.ш. и уходящего по направлению к полюсам (подобно экваториальному апвеллингу), отклоняется на восток. Это создает западные ветра умеренного пояса, преобладающие на большей части континентальной части США и Европы. (Термины «восточный ветер» и «западный ветер» могут сбить с толку читателя: специалисты так называют ветра, дующие с востока или запада. Соответственно, западные ветра – те, что дуют на восток.)



Циркуляция атмосферы переносит теплый воздух из тропических зон к полюсам, а холодный воздух – в тропики. Однако из-за вращения Земли циркуляция атмосферы делится на три ячейки, вращающиеся в противоположных направлениях в Северном и Южном полушариях. Поток воздуха в нижней части каждой ячейки отклоняется на восток или на запад из-за вращения Земли (и в зависимости от того, направлен ли поток к экватору или в противоположную сторону от него). Эти потоки образуют преобладающие ветра в атмосфере Земли. (С разрешения Барбары Шеберл, Animated Earth LLC.)

Наконец, холодный воздух на полюсах, который движется по направлению к экватору, попадает в ветры, дующие гораздо быстрее в восточном направлении, и этот воздушный поток отклоняется на запад по отношению к этим ветрам. Эти воздушные течения называются полярными восточными ветрами, которые преобладают примерно на 60-м градусе широты в обоих полушариях (например, на Аляске или в Антарктиде). В Северном и Южном полушариях Земли есть три вращающиеся в противоположных направлениях циркуляционные ячейки, которые

охватывают Землю параллельно экватору. Они ответственны за перенос горячего воздуха от экватора к полюсам и прохладного воздуха от полюсов к экватору. В этом процессе они управляют преимущественными ветрами планеты, которые находятся, по сути, в нижней части каждой из этих ячеек. Эти преимущественные ветра в основном определяют метеорологические условия (а также высотные струйные течения, которые находятся в верхней части циркуляционных ячеек, а также между ними). Во времена плаваний под парусами они были чрезвычайно важны для моряков.

Сильные пассаты также перемещают тропические воды океана на запад, прижимая их к западным границам океанических бассейнов и тем самым смещая течения к северу и югу. Это приводит к образованию таких течений, как Гольфстрим, который приносит теплые воды в Северную Атлантику и обеспечивает мягкий климат Новой Англии и Западной Европы. Теплые воды Гольфстрима в конце концов охлаждаются в Северной Атлантике, где из-за сухих и сильных западных ветров вода испаряется, отчего там она более соленая.

Очень холодная и соленая вода становится тяжелой и погружается ко дну. Этот процесс называется термохалинной циркуляцией. Морские течения, движимые и ветрами, и термохалинной конвекцией, в большой степени ответственны за глобальную циркуляцию океанов, так как перемешивают и перемещают водные массы. Весь этот процесс занимает столетия. Это длительное время перемешивания и перемещения необходимо, чтобы океан смог приспособиться к изменениям в атмосферной температуре и концентрации парниковых газов (мы поговорим об этом подробно в следующей главе).

Циркуляционные ячейки атмосферы также определяют перемещение воды по всей планете через атмосферу. Из-за интенсивного нагрева в районе экватора испаряется много воды, благодаря чему формируются восходящие теплые потоки. Эти потоки поднимаются на большие высоты, а затем распространяются по горизонтали на север и юг. Воздух охлаждается, а вода конденсируется, создавая облака и дождь (поэтому в тропиках так влажно и дождливо). К тому времени, как этот воздух достигает своих нисходящих точек примерно на 30° с.ш. и 30° ю.ш., он теряет воду, становится очень сухим и высушивает землю в местности, на которую опускается. Это приводит к образованию аридных зон, таких как пустыни Сонора и Сахара и большинство внутренних районов Австралии, а также районы со средиземноморским климатом, в которых сухие природные зоны соседствуют с морем, например само Средиземноморье и большая часть Калифорнии. Эти зоны различного климата и влажности

сыграли важную роль в развитии сельского хозяйства, повлияв на ход человеческой истории и праистории.

По большей части циркуляция атмосферы Земли (и, следовательно, вод океанов) вызвана относительно быстрым вращением нашей планеты, как это описано выше. Венера вращается очень медленно и при этом в обратную сторону (относительно вращения Земли и большинства планет Солнечной системы). Один оборот Венеры вокруг своей оси занимает 243 суток, даже чуть больше, чем венерианский год (примерно 225 земных суток). Это медленное и странное вращение – одна из многочисленных загадок нашей планеты-сестры. Несмотря на столь вялое вращение, на Венере дуют очень сильные ветры. В верхних приэкваториальных слоях атмосферы они дуют в противоположном вращению планеты направлении (на Земле, в верхней части ячейки Хэдли, ветер дует в направлении вращения). Период вращения Марса почти такой же, как и у Земли (вероятно, это случайность), и даже в его разреженной, в основном состоящей из углекислого газа атмосфере имеется ячейка циркуляции атмосферы, похожая на ячейку Хэдли, т. е. происходит перенос тепла и даже водяного пара от экватора к полюсам. Эта циркуляция также вызывает сильные ветры, что приводит к сильным пылевым бурям, которые иногда закрывают поверхность Марса на несколько месяцев.

Но я слишком долго распространялся о Земле. Было бы просто глупо не упомянуть о замечательных атмосферах Юпитера и Сатурна. Обе планеты имеют в значительной степени схожий химический состав, унаследованный от протосолнечной туманности, состав которой с некоторыми изменениями был идентичен составу Вселенной после Большого взрыва. Значит, Юпитер и Сатурн состоят в основном из водорода, меньшего количества гелия и малой доли тяжелых элементов, образованных в звездах-сверхгигантах. Несмотря на огромные размеры, обе эти планеты вращаются в два с половиной раза быстрее Земли, с периодом оборота около 10 часов (Юпитер чуть быстрее), но по сравнению с Землей получают гораздо меньше тепла от Солнца: на каждый квадратный метр поверхности Юпитер получает в 25 раз меньше солнечной энергии, Сатурн – примерно в 100 раз. Обе гигантские планеты имеют полосы высотных струйных течений и облака, которые, в упрощенном смысле, представляют собой множество циркуляционных ячеек типа ячеек Хэдли. Однако, вероятно, большая часть энергии, приводящей в движение эту циркуляцию, вырабатывается за счет потери планетой ее внутреннего тепла. Полосы ветров, называемые зональными ветрами, очень быстры и на Сатурне, они могут достигать скорости более

1600 км/ч (самые быстрые ветры на Земле, вихри торнадо, не превышают 500 км/ч). На обеих планетах формируются огромные циклоны, они отдаленно напоминают земные, например ураганы и штормы, обрушивающиеся на северо-восток Северной Америки, но гораздо, гораздо больше. На северном полюсе Сатурна действует массивный циклон, а знаменитое Большое Красное Пятно на Юпитере представляет собой ураган, размерами превышающий нашу планету и наблюдаемый уже более 100 лет.

И хотя атмосфера Земли не является самой большой, горячей, холодной, быстрой или медленной, она все равно уникальна для Солнечной системы по одной замечательной причине: ее атмосфера полностью отличается от той атмосферы, которая была в самом начале. Состав атмосфер всех остальных планет почти точно такой же, как и во время их образования – более 4 млрд лет назад. Но Земля «выворачивает себя наизнанку» благодаря тектонике плит, она излила всю свою воду на поверхность, чтобы там смогли образоваться океаны, и потому на Земле смогла развиваться жизнь. Сегодня наша атмосфера ничем не схожа с той, что была изначально. Ни одна известная нам планета не изменила (не развила) свою поверхность и атмосферу так, как это смогла сделать Земля.





6. Климат и пригодность для жизни  
В отличие от других планет Солнечной системы на Земле образовался

умеренный климат, поэтому на ней сохранялась вода в жидком состоянии, а следовательно, и жизнь, по крайней мере такие ее формы, которые нам известны. Первыми живыми организмами, появившимися на Земле, были микроорганизмы, и произошло это за несколько миллиардов лет до того момента, с которого мы, люди, считаем планету пригодной для жизни, не говоря уже гостеприимной. Но даже в наши дни мы нашли на планете микробную жизнь, обитающую в самых неблагоприятных природных условиях – в средах, где температура превышает 100 °С, или в кислотных кратерных озерах. Поэтому определение «пригодности для жизни» имеет довольно широкий диапазон. Мы можем обнаружить микробную жизнь, существующую или существовавшую когда-то на других планетах, условия на которых не хуже самых плохих условий на Земле.

Вода исключительно важна для жизни, поэтому список потенциально пригодных для жизни планет включает в себя Марс и ледяные спутники Юпитера и Сатурна (Европу и Энцеладу соответственно), на которых точно есть вода в жидком состоянии. Как бы то ни было, мы точно знаем, что на нашей планете выработался особенно стабильный и мягкий климат, давший жизни достаточно времени, чтобы она могла стать сложной и многоклеточной.

Разговор об условиях, необходимых для существования жизни на планете, нужно начать с классического понятия «зоны возможной жизни». Эта зона, по сути, является диапазоном орбит в любой планетной системе, где условия на поверхности находящихся в ней планет позволяют существовать воде в жидком состоянии. Другими словами, планета должна быть не так далеко от звезды, чтобы вся вода замерзла (как, вероятно, произошло на Марсе, хотя это становится все более сомнительным), но и не так близко, чтобы вся вода испарилась (как на Венере). Это понятие до сих пор используется астрономами, обнаруживающими планеты в других планетных системах, так как основными характеристиками, которые они устанавливают, по крайней мере пока, являются расстояние от планеты до звезды и (иногда) масса и/или размер планеты.

Орбита в зоне благоприятного обитания – важная часть теорий о вероятности нахождения разумной внеземной жизни. Под «разумной» я понимаю такую жизнь, которая может передавать в космос сигналы (например, радиоволны), несущие систематизированную информацию. Распознают ли внеземные формы жизни в наших радиоволнах признаки того, что они были посланы разумными существами, или нет, еще не известно, но, если мы сами будем искать в космосе сигналы с альфы Центавра (как в «Стартреке» и «Бонанце», любимых фантастических

сериалах моего детства), тогда критерии поиска должны быть очевидны. Вероятность получения нами таких сигналов выражена в известном уравнении Дрейка (в честь американского радиоастронома Франка Дрейка) и равна произведению нескольких вероятностей (например, вероятностей того, что у звезды имеются планеты и по крайней мере одна из них находится в обитаемой зоне жизни, и эта потенциальная форма жизни посылает радиоволны именно тогда, когда мы можем их обнаружить, т. е. не слишком рано и не слишком поздно). Вероятность того, что из звездной системы, где существует жизнь, смогут в нужный момент послать радиоволны и «достучаться» до нас, астрономически мала. Тем не менее только в нашей Галактике миллиарды звезд, которые могли поддерживать жизнь в ходе длительной эволюции (как правило, это небольшие звезды, горящие миллиарды лет). Даже если на малой части из них существует жизнь, способная передавать радиосигналы, тогда таких звезд будут миллионы или по крайней мере десятки или сотни тысяч. В этом случае можно было бы ожидать увидеть хотя бы одно плохое инопланетное телешоу с помощью наших радиотелескопов, но пока этого не произошло. И это приводит нас к известному вопросу, заданному физиком Энрико Ферми: «Ну и где они?» Почему мы не наблюдаем следов внеземной разумной жизни? Либо условия, необходимые для ее формирования куда сложнее, чем мы предполагали, либо инопланетяне сразу же изобрели кабельное телевидение.

Условия для формирования жизни, сложной и технологически продвинутой, вероятно, более сложны и не исчерпываются астрономическим положением и радиусом орбиты. То есть не только солнечный свет определяет условия нашего ровного климата. Например, в Солнечной системе Земля, естественно, расположена внутри орбитальной зоны жизни (особенно учитывая все эмпирические доказательства того, что она действительно населена). Однако, если бы в атмосфере Земли не было водяного пара или углекислого газа, тогда не было бы и парникового эффекта и поверхность нашей планеты, вероятно, замерзла бы, покрывшись снегом и льдом. Возможно, это и происходило в течение нескольких периодов в далеком прошлом (мы обсудим это далее). Даже если некоторое количество жидкой воды сохранилось под ледяным покровом, Земля не получала достаточно солнечной энергии для поддержания жизни (учитывая высокую отражательную способность снега и льда). Если бы жизнь могла получать энергию только из других источников, например вулканизма, то для этого потребовался бы вулканизм в дополнение к нужной орбите. С другой стороны, если весь

первоначальный углекислый газ, эквивалентный давлению в 60 атм, который теперь содержится в земной коре, оказался в атмосфере, парниковый эффект слишком сильно нагрел бы поверхность планеты. Мы упоминали микробов, которые могут успешно выживать при очень высоких и низких температурах, но они не эволюционировали за пределы их микробного состояния. По крайней мере, не на Земле. При экстремальных условиях – слишком высокой или слишком низкой температуре – мы могли бы рассчитывать в лучшем случае лишь на одноклеточную жизнь. Короче говоря, орбита определяет не все. Но тогда каковы они, эти условия жизни? Хороший вопрос.

Гипотеза уникальной Земли, предложенная геологом Питером Уордом и астрономом Дональдом Браунли, – хорошая, хотя и спорная попытка ответить на парадокс Ферми. Она утверждает, что наша планета стала пригодна для жизни благодаря почти невероятному, уникальному стечению обстоятельств, которые позволили возникнуть живым организмам, а следовательно, и людям. Это сочетание благоприятных условий настолько маловероятно, что шансы обнаружить внеземные радиосигналы в ограниченное время наших наблюдений ничтожно малы. Таким образом, ответ на вопрос Ферми заключается в том, что Галактика больше смахивает на пустыню Гоби, чем на Гонконг или Париж.

В соответствии с гипотезой уникальной Земли наша планета отвечает всем необходимым астрономическим условиям, находясь в нужном месте Галактики, т. е. не слишком близко к ее центру со множеством звезд и интенсивным излучением, которое испускает вещество, падающее в сверхмассивную черную дыру. Земля сформировалась в нужное время, чтобы на ней оказались строительные блоки для жизни. Мы находимся в середине орбитальной зоны жизни Солнечной системы, на нашей планете есть вода не только в жидком, но и в газообразном и твердом состоянии (что очень важно для климата; подробнее об этом ниже). В дополнение к благоприятным астрономическим условиям на Земле происходит тектоника плит, стабилизирующая климат. У Земли есть большой спутник, а значит, и приливные зоны, организмы в них должны были выживать и под водой, и на суше, что способствовало выходу жизни на сушу. Также у Земли «правильный» угол наклона оси вращения, что приводит к смене времен года, а это, в свою очередь, увеличивает биологическое разнообразие. В истории Земли происходили массовые вымирания видов, вызванные астероидными бомбардировками планеты и вулканической активностью. Например, Массовое пермское вымирание около 250 млн лет назад, вероятно, было вызвано извержениями вулканов на территории Сибири,

когда огромные потоки лавы высвободили токсичные газы и выжгли множество угольных пластов, что способствовало глобальному потеплению. Образование суперконтинента также приводило к изменению береговой линии и связанных с ней морских экосистем. Каждое массовое вымирание вызывало экологическую перезагрузку, способствуя большему биологическому разнообразию и эволюции.

К сожалению, нам известна только одна такая планета – Земля. У нас слишком мало данных, чтобы определить, является ли сочетание всех этих условий абсолютно необходимым для развития жизнеспособности. Достаточно ли некоторых из этих условий или необходимы они все? У нас только одна планета для сбора данных, поскольку мы не знаем другой планеты земной группы с тектоникой плит, водой в жидком состоянии и большим естественным спутником. Со временем мы узнаем больше, потому что астрономы уже открыли ряд планет земного типа, обращающихся вокруг других звезд. Раньше или позже мы увидим, есть ли на них условия, необходимые для жизни, правда, для того, чтобы увидеть детали, например океаны и тектонику плит, потребуются телескопы с более высоким разрешением и четкостью.

Мы также не знаем, зависят ли друг от друга некоторые уникальные условия: если они независимы, это делает их одновременное наличие маловероятным, если же они связаны, одновременность вполне объяснима. Например, наличие воды в жидком виде и тектоники плит (и таких связанных с ними процессов, как вулканизм и суперконтинентальные циклы) сильно зависят друг от друга, и потому их одновременное существование не может быть просто совпадением. Возможно, на любой планете земного типа, где есть вода в жидком состоянии, есть и тектоника плит – мы этого пока просто не знаем. Точно так же гипотеза уникальной Земли предполагает, что эти условия необходимы для развития живой природы, какой мы ее знаем; в каком-то смысле это лишь «рецепт» для возникновения таких же форм сложной жизни, как на Земле, но не общая теория возникновения сложной жизни вообще. Пока это единственный рецепт, который нам известен. Но мы могли бы узнать рецепты и других форм жизни. Живя на нашей «провинциальной» планете, мы еще слишком мало знаем даже о Солнечной системе и не можем представить себе другие формы жизни.

Независимо от того, существуют ли другие параметры жизнеспособности, мы точно знаем кое-что о жизнеспособности нашей планеты. А поскольку Земля еще долго будет нашим домом, полезно эти вещи изучить и понять. Когда мы говорим о пригодности для жизни, то на

самом деле имеем в виду стабильный климат, который обеспечивает наличие воды в жидком состоянии и устойчивое воспроизводство строительного материала для жизни (питательных веществ), – климат, который не пытается уничтожить нас каждые несколько миллионов лет или около того.

Самый важный ингредиент нашего климата – солнечный свет. В любой момент времени наша планета получает около 170 квадрилл ( $1,7 \times 10^{17}$ ) Вт энергии от Солнца. Если измерять в лампочках яркостью 100 Вт, то Солнце заменяет почти 2 квадрилл лампочек, освещающих одну сторону нашей планеты в любой момент времени, или 13 таких лампочек на каждый квадратный метр поверхности планеты (обычно большинство квартир площадью 25 м<sup>2</sup> освещается двумя такими лампочками). Большая часть этого излучения приходит в качестве видимого света, значительное количество солнечного света приходит в виде ультрафиолетового излучения (чтобы защититься от ультрафиолета, мы носим солнцезащитные очки и наносим на кожу защитный крем, хотя основной ультрафиолет поглощается озоном в стратосфере). Наконец, некоторая часть солнечного света представляет собой инфракрасное излучение, т. е. практически красный свет.

Одни части поверхности Земли поглощают солнечный свет, другие отражают его обратно в космос. Океаны темные и поглощают много света. Континенты светлее и отражают часть света обратно. Лед, например тот, что покрывает большую часть Гренландии и Антарктиды, отражает почти весь падающий на него свет. В целом поверхность Земли поглощает около 70 % солнечного света (отраженные 30 % обеспечивают «пепельный свет Луны») и поэтому нагревается и излучает энергию обратно в виде тепла или, что то же самое, инфракрасного излучения. Если бы у Земли не было атмосферы, поверхность планеты прогрелась бы в среднем лишь до  $-20$  °С, что намного ниже точки замерзания воды (хотя некоторые части земного шара были бы теплее, а другие холоднее). Однако два важных газа земной атмосферы – водяной пар и углекислый газ – поглощают инфракрасное переизлучение (это означает, что инфракрасные фотоны поглощаются возбуждениями колебаний в этих молекулах) и таким образом удерживают тепло, действуя как покрывало. Хотя ни один из этих газов не является главным компонентом нашей атмосферы (где лидируют азот и кислород), именно они обеспечивают мощный парниковый эффект, укрывая Землю «покрывалом», благодаря которому средняя температура на планете составляет примерно 15 °С.

Земной климат очень чувствителен к тому, сколько солнечного света

поглощает и отражает наша планета, а также к тому, сколько парниковых газов содержится в атмосфере. От перепадов этих двух факторов в высокой степени зависят стабильность климата и пригодность нашей планеты для жизни. Излучение Солнца устойчиво возрастает с тех пор, как в нем начались термоядерные реакции. В далеком прошлом солнечный свет был примерно на 30 % слабее, чем сейчас. Но количество солнечного света, которое поглощает Земля, также меняется, потому что ледяные шапки планеты увеличиваются и уменьшаются (что изменяет количество отраженного света), ось вращения Земли, которая проходит через Северный и Южный полюсы, колеблется и прецессирует (об этом явлении мы еще поговорим), орбита Земли тоже меняет наклон, наконец, у самого Солнца есть циклы активности, например 11-летний цикл Швабе.

Изменения количества парниковых газов также очень важны. Водяной пар является наиболее важным парниковым газом с точки зрения его непрозрачности для теплового излучения. Однако количество воды в атмосфере всегда примерно одинаково, так как атмосфера находится в контакте с океанами, всегда насыщена парами воды и не может впитать ее больше. Если атмосфера слишком сухая, она в конечном итоге впитает испарения. Если она слишком влажная, избыток влаги выпадет в виде дождя. По этой причине воздух всегда стремится быть насыщенным, но не слишком влажным и не слишком сухим. Поэтому, если мы вдруг выбросим в атмосферу больше водяного пара, скажем, в результате извержения вулкана, большая часть этого пара выпадет в виде дождя и, с учетом быстрой циркуляции атмосферы, дождь пойдет задолго до того, как пар приведет к повышению температуры, вызванному парниковым эффектом. Насыщение атмосферы водой имеет большое значение для гидрологического цикла испарений и осадков, которые, как мы увидим, определяют работу общего тектонического термостата планеты. Совсем не так обстояло дело с атмосферой Венеры. Возможно, она была такой горячей, что в ней всегда недоставало влаги, венерианская атмосфера могла содержать больше водяного пара, не проливая его в виде дождя. Водяной пар, вошедший в состав атмосферы Венеры (либо при вулканической дегазации, либо от испарения океана, если на Венере когда-то был океан), делал атмосферу более горячей, что заставляло ее испарять еще больше воды, что сделало бы ее еще горячее... И так далее. Это называется необратимым парниковым эффектом.

Метан также является очень мощным парниковым газом, но в настоящее время присутствует в атмосфере в малых количествах (хотя его доля неуклонно растет). Когда жизнь только появилась, а Солнце было

тусклее, метана, возможно, было намного больше. Сейчас срок жизни метана в атмосфере не достигает 10 лет, так как он эффективно реагирует с атмосферным кислородом (а конкретнее, с кислородосодержащими радикалами в стратосфере) и образует более слабые парниковые газы, углекислый газ и воду.

Углекислый газ – более мощный парниковый газ, чем водяной пар, но более слабый, чем метан, однако у него уникальная история распределения в различных частях Земли. В свое время в атмосфере содержалось много углекислого газа, сейчас он в основном содержится в коре и в меньшей степени – в океанах и биосфере (ниже мы поговорим об этом подробнее). Но когда в атмосферу высвобождается даже небольшая часть этого огромного скрытого резервуара углекислого газа, требуется очень много времени, чтобы вытеснить его оттуда. Углекислый газ не выпадает в виде дождя, как вода, и не исчезает быстро в результате реакций, как метан. Самый быстрый и самый эффективный способ избавления от углекислого газа – растворение в океане, но даже это происходит очень медленно (мы обсудим это чуть позже). Поэтому углекислый газ задерживается и накапливается в атмосфере в течение многих столетий или даже больше, оказывая огромное влияние на климат.

Несколько важных естественных механизмов обратной связи на Земле усиливают или сдерживают колебания климата, и некоторые из них связаны с углекислым газом. Если петля обратной связи положительная, она усиливает колебания климата, если отрицательная, она стабилизирует климат. Например, тектоника плит обеспечивает важную отрицательную обратную связь, которая сохраняет климат ровным в течение сотен миллионов лет. Кроме того, тектоника плит действует независимо от погодных условий, времени года или климата, сохраняя свою отрицательную обратную связь независимо от того, что происходит на поверхности. Геофизики вроде меня любят раздражать коллег, занимающихся изучением климата, утверждая, что наиболее важной частью климатологии является тектоника плит. Это могло бы даже быть правдой.

Обратная связь тектоники плит называется тектоническим или геохимическим циклом углерода и имеет несколько переменных составляющих. Во-первых, тектоника плит доставляет на поверхность Земли новое минеральное вещество из коры и мантии. Это происходит благодаря извержению вулканов в срединно-океанических хребтах, где литосферные плиты расходятся, а также благодаря вулканизму и горообразованию в зонах субдукции и коллизии, где плиты погружаются



одна под другую и опускаются в мантию, в результате чего континенты сминаются, сжимаются и образуют горные массивы. Это же происходит в океанических горячих точках, таких как Гавайи, но там поверхность Земли изменяется намного меньше. Попав на поверхность, минеральное вещество вступает в химическую реакцию и с водой, и с углекислым газом – в дождевой воде, в реках, озерах и океанах. Углекислый газ растворяется в воде (особенно хорошо в дождевых каплях из-за большой площади их поверхности), образуя слабую кислоту – угольную, ту же, что содержится в газированных напитках. Она вступает в реакцию с силикатными породами, образуя карбонаты, например известняк и мрамор. Таким образом, с помощью воды углекислый газ выводится из атмосферы, входит в структуру минералов и остается в составе горных пород. Если бы эти реагирующие вещества были оставлены в состоянии покоя, они образовали бы тонкий слой карбонатов, который не позволил бы расположенным более глубоко породам вступать в реакции, и в конце концов процесс впитывания углекислого газа прекратился бы. Однако дождь, снег, реки и ледники смывают вступившие в реакцию вещества в море. Эрозия помогает открыть доступ к новым минералам, доставленным на поверхность благодаря тектонике плит, и они продолжают вступать в реакции с углекислым газом, уменьшая его содержание в атмосфере.

Эрозия сама по себе сделала бы океаническое дно Земли плоским (вернее, сферическим, как бильярдный шар), что защитило бы его от дальнейшей эрозии и замедлило или прекратило дальнейшее выведение углекислого газа (в зависимости от глубины дна, но лучше обойти эту чрезвычайно сложную тему). Однако тектоника плит не только выносит на поверхность свежие породы, но и непрерывно создает вулканы и горы, что позволяет циклу эрозии продолжаться. Разрушенные минералы смываются в реки, озера и в конце концов в океаны и там насыщаются углекислотой, так как воды Земли содержат много растворенного углекислого газа. Карбонизации океана способствует строительство известковых раковин кораллами и планктоном, например фораминиферами и кокколитофоридами, и эта реакция, несомненно, будет продолжаться. Из-за нее большая часть изначальной, в 60 раз более массивной земной атмосферы, состоявшей из углекислого газа, содержится теперь в карбонатах на дне океанов (и на дне древних океанов, образовавшем горы и континенты благодаря тектонике плит). Без этого геологического уменьшения концентрации углекислого газа наша атмосфера была бы похожа на венерианскую.

Однако углекислый газ не может храниться в породах бесконечно. В

частности, в зонах субдукции карбонаты океанского дна погружаются в мантию. Часть углекислого газа из этих пород испаряется при высоких температурах и растворяется в расплаве мантии над погружающимся краем литосферной плиты (плавление происходит из-за воды, которая также испаряется из слэба, как это описано в главе 4), а потом возвращается в атмосферу с вулканическим газом. Некоторые карбонаты выживают на стадии выпаривания и, возможно, погружаются в глубокую мантию. Считается, что мантия способна сохранять большое количество углерода, пусть и не в высоких концентрациях. С учетом ее огромного объема полное количество углерода в мантии, вероятно, значительно больше, чем в земной коре и океанах, хотя это еще остается предметом дискуссий. То, что в мантии Земли много углерода, доказывает его устойчивая форма, скрытая на глубине нескольких сотен километров, – алмазы. Время от времени они быстро поднимаются к поверхности и остаются в застывших магматических породах – магме, которая «застревает» в земной коре. Самые известные такие породы называются кимберлитами – в честь города Кимберли в Южной Африке, где их впервые нашли. Но алмазы явно не способствуют увеличению в атмосфере двуокиси углерода, а вот при извержениях вулканов в срединно-океанических хребтах (и в меньшей степени в горячих точках, вроде Гавайских островов) из мантии просачивается углекислый газ. Так происходит медленное и постоянное проникновение углекислого газа в атмосферу Земли из ее недр. Не весь он затем уходит обратно в результате эрозии и выветривания, и этой медленной подачи углекислого газа в атмосферу достаточно для поддержания парникового эффекта на нашей планете.

Этот геохимический цикл углерода – выведение углекислого газа из атмосферы в результате выветривания и эрозии свежих минералов и возвращение его обратно благодаря вулканизму – предположительно, оказывает значительную отрицательную обратную связь, которая очень важна для этой истории. (Гипотеза о существовании отрицательной обратной связи до сих пор вызывает активные споры. Ее иногда называют моделью Walker World в честь Джеймса Уокера и его коллег. Эта модель похожа на более продвинутую VLAG- модель Роберта Бернера.) Выветривание и эрозия минералов зависят от температуры поверхности во многих отношениях. Во-первых, при высоких температурах испаряется больше воды и, как следствие, выпадает больше осадков в виде дождя или снега, которые, в свою очередь, управляют процессом эрозии. Выпадению осадков также способствует наличие гор, так как ветер несет влажный воздух вдоль их склонов на большую высоту, где конденсируется водяной

пар. Во-вторых, при высоких температурах быстрее происходят карбонизация и выветривание. Когда избыток углекислого газа выбрасывается в атмосферу в результате извержения вулкана, лесного пожара или неконтролируемого сжигания ископаемого топлива (хм, что бы это могло быть?), потепление и парниковый эффект усиливают осадки и эрозию и ускоряют процесс выветривания минералов, выводя углекислый газ из атмосферы. (Это занимает миллионы лет и потому не спасет человечество, если мы не сумеем намного ускорить этот процесс и продолжим наше безрассудное потребление.) Если же уровень углекислого газа резко упадет, как это, возможно, произошло в далеком прошлом, тогда отсутствие парникового эффекта приведет к тому, что температуры снизятся и это ограничит процесс испарения, выпадения осадков, эрозию и выветривание, а затем остановит и выведение углекислого газа. Его уровень не будет снижаться, а вулканизм будет медленно выпускать углекислый газ в атмосферу. Таким образом, тектоника плит не позволяет ни уровню содержания углекислого газа, ни температуре стать слишком высокими или слишком низкими. Тектонический цикл сохраняет климат относительно стабильным в течение сотен миллионов лет. Слово «стабильный» здесь означает, что тектонический цикл препятствует скачкам температуры в десятки градусов Цельсия, однако он не защищает Землю от наступления ледникового периода или установления жаркого климата и исчезновения льдов.

Жизнь, и в частности ее сложные формы, могут развиваться и выживать при умеренных колебаниях климата, но не при катастрофических: например, если из-за резкого усиления парникового эффекта будет высвобождена большая часть углекислого газа, испарится значительная часть воды океанов, а Земля превратится в настоящий ад, вроде венерианского. Тектоника плит эффективно сглаживает сильные колебания климата.

Помимо цикла тектоники плит океаны, атмосфера и ледяной покров имеют и сильную положительную обратную связь, что стимулирует изменения климата. Эти положительные обратные связи усиливают небольшие изменения получаемой солнечной энергии, вызванные слабыми колебаниями активности Солнца, орбиты Земли и ее оси вращения. Это явление называют циклами Миланковича.

Сербский астрофизик и геофизик начала XX в. Милутин Миланкович предположил, что изменения параметров орбиты Земли и ее вращения вокруг своей оси могут вызывать ледниковые циклы, которые длятся десятки тысяч лет. Есть три основных эффекта, описываемых этими

циклами. Самый быстрый цикл происходит из-за того, что ось вращения Земли движется, подобно оси теряющего скорость волчка, по расходящейся спирали (так называемое прецессионное движение), описывая полную петлю каждые 26 000 лет. Это меняет времена года таким образом, что через 13 000 лет в Северном полушарии в январе будет лето. Следующий цикл Миланковича описывает, как наклон оси вращения Земли колеблется между вертикальным положением (т. е. перпендикулярным к плоскости Солнечной системы) и наклонным, где наклон немного больше, чем сейчас (в настоящее время ось наклонена не критично), что происходит каждые 40 000 лет. Это влияет на сезонные различия в климате: чем больше угол наклона, тем холоднее будет зима и жарче лето. Наконец, изменяется орбита Земли вокруг Солнца – от круглой к чуть более эллиптической. Это происходит примерно каждые 100 000 лет и меняет приближение Земли к Солнцу. Вместе эти циклы (наряду с асимметрией между Северным и Южным полушариями, которые из-за различного соотношения суши и океанов по-разному поглощают солнечный свет) влияют на то, сколько солнечного света поглощает наша планета каждые 20 000, 40 000 и 100 000 лет. Следы циклов Миланковича были проверены по климатической записи глубоководных отложений.

Колебания количества полученного солнечного света, вызванные циклами Миланковича, очень малы, однако положительные обратные связи в океане и атмосфере усиливают их до такой степени, чтобы вызвать циклы ледниковых периодов (называемых оледенением и межледниковьем) с периодами от десятков тысяч до сотен тысяч лет. Если тектонический цикл смягчает сильные колебания климата, то океаны и ледниковые шапки Земли, наоборот, их «преувеличивают», как плохой актер или журналист, пишущий о науке. (Шучу. Отчасти.)

Одной из важных положительных обратных связей служит способность океанов растворять огромное количество углекислого газа; в океанах его гораздо больше, чем в атмосфере, но гораздо меньше, чем содержится в земной коре в виде карбонатов. При этом теплая морская вода растворяет углекислый газ хуже, чем холодная, что вызывает ряд важных эффектов.

Представьте, что концентрации углекислого газа в океане и атмосфере находятся в равновесии, так что концентрация ни в одной из этих сред не может ни увеличиться, ни уменьшиться за счет другой. Если бы средняя температура поверхности поднялась во время одного из циклов Миланковича, то потепление океана снизило бы его способность растворять углекислый газ, который в результате стал бы поступать в

атмосферу. Это привело бы к потеплению из-за возросшего парникового эффекта, что еще сильнее нагрело бы океан, который испускал бы еще больше углекислого газа, и т. д. Точно так же, если температура поверхности во время ледникового периода становится ниже, охлаждающийся океан впитывает больше углекислого газа, который, в свою очередь, усиливает охлаждение. Реакция океана является положительной обратной связью, которая усиливает колебания климата. Океан реагирует медленно, ведь прежде, чем его поверхностные воды перемешаются с глубинными, пройдет нескольких сотен или тысяч лет (о чем упоминалось в предыдущей главе). Хотя этого достаточно, чтобы успевать реагировать на гораздо более медленные колебания циклов Миланковича.

Говоря об ответной реакции океана на потепление, отметим, как он реагирует на возрастающее количество углекислого газа, поступающего из других источников, например из вулканов или вследствие сжигания биомассы и/или ископаемого топлива. Если бы концентрация углекислого газа в океанах и атмосфере была одинакова, океан растворил бы дополнительный выброс в атмосферу и часть его ушла бы на глубину в основном за счет даунвеллинга в высоких широтах. Но из-за долгой циркуляции океана этот процесс проходит очень медленно, и избыток углекислого газа задерживается в атмосфере на многие столетия. В конце концов он прогрел бы океан, которому стало бы труднее выводить углекислый газ, и тот, в свою очередь, еще дольше накапливался бы в атмосфере. (Биота, а именно растения и деревья, также поглощает углекислый газ в процессе фотосинтеза, но после их гибели и разложения углекислый газ высвобождается. Поглощение избытка углекислого газа организмами может оказать эффект только при условии, что общая биомасса Земли растет или если омертвевшая биомасса хоронится таким образом, что избегает гниения – как в случае с ископаемым топливом. Хотя вырубка лесов и сжигание ископаемого топлива сводит этот эффект на нет.)

Еще одна важная положительная обратная связь видна на примере ледников Арктики и Антарктики. Ледяной покров отражает солнечный свет обратно в космос, ограничивая поглощение солнечной энергии нашей планетой. Если температура повышается, льды тают и отражают меньше света, поверхность Земли нагревается сильнее, отчего тает еще больше льда, и т. д. Если же температура понижается, ледяной покров растет, отражает больше света, температура понижается еще сильнее, а ледники растут и т. д.

Таяние материковых льдов, например ледников, которые покрывают

Гренландию и Антарктиду, также приводит к изменению уровня Мирового океана. Это фиксируется даже сейчас, когда происходит быстрое потепление климата, и может привести к потере низменных островов (например, Мальдивских в Индийском океане). Таяние морского льда, плавающего в океане, не дает такого эффекта: лед и так находится в океане, хотя изменение температуры воды действительно вызывает умеренное изменение уровня океана за счет теплового расширения или сжатия воды. Яркий пример – таяние льдов Гренландии и Антарктики. Если они полностью растают, уровень Мирового океана может подняться на 70 м и затопить большинство прибрежных городов. Таяние льдов также повлияет на климат, воздействуя на вулканическую дегазацию. Освобождение вулканов от ледникового льда уменьшит давление на магму, заставив ее пениться и пузыриться, как в откупоренной бутылке газировки, и вулкан начнет извергаться. Поэтому потепление и таяние ледников приведут к увеличению вулканических выбросов углекислого газа, что, в свою очередь, приведет к потеплению и т. д. (Эта гипотеза, предложенная геофизиками Питером Хайберсом и Чарльзом Ленгмюром, пока остается объектом исследований и дискуссий.)

Положительные обратные связи океана (и содержащегося в нем углекислого газа) и ледников усиливают любое колебание климата в сторону потепления или похолодания. Если в один из циклов Миланковича на Землю попадет немного больше солнечного света и она его поглотит, обратные связи приведут к тому, что климат станет теплее, чем был бы вследствие простого усиления солнечного света. Точно так же, если циклы Миланковича вызывают похолодания, обратные связи способствуют сильным холодам. Эта гиперреакция повторяется в течение многих лет и веков, что усиливает цикл Миланковича, который длится десятки тысяч лет и дольше. Таких колебаний климата достаточно для того, чтобы возникали ледниковые циклы, длящиеся от 20 000 до 100 000 лет, включая последний ледниковый период, который закончился примерно 12 000 лет назад – и ознаменовал рассвет человеческой цивилизации.

Земля знала самые разные климатические условия – от ледниковых периодов до повсеместных тропиков. Я не смогу рассказать про все из них, но основные мы с вами можем рассмотреть. Во-первых, есть доказательства того, что чуть меньше миллиарда лет назад, до появления многоклеточной жизни, Земля по крайней мере однажды была почти полностью покрыта снегом и льдом. Это так называемая гипотеза «Земля-снежок». Перемещенные ледниками той эпохи камни были найдены в тропических широтах, например в Намибии на юго-западе

Африки. Это состояние замерзшей планеты больше не повторялось, возможно, потому, что к тому времени уже появилось правильное (или неправильное, в зависимости от вашей точки зрения) сочетание обратных связей, позволявшее избежать глобального замерзания.

Согласно еще одной гипотезе, раньше вся земная суша составляла один суперконтинент, который геологи называют Родиния. В отличие от другого известного суперконтинента, Пангеи, Родиния занимала место на экваторе и в тропиках. Когда Родиния распалась, в зонах рифта образовалось много лавы и свежих минералов (как, например, происходит в Восточно-Африканской рифтовой зоне в наши дни), а образовавшиеся маленькие континенты остались в зоне влажных тропиков. Влажные тропические побережья получают больше солнечного тепла, чем любая другая зона планеты, на них испаряется больше всего воды и выпадает больше всего осадков. Это привело бы к активной эрозии и выветриванию образовавшихся рифтовых континентов, а значит, к потере атмосферой углекислого газа и, по идее, к похолоданию и уменьшению количества осадков. Но температура в тропиках меняется незначительно. При умеренном похолодании на тропических континентах по-прежнему выпадало бы много осадков. По мере похолодания ледники росли бы, а похолодание усиливалось из-за того, что их лед отражал больше солнечного света. Если континенты расположены в более высоких широтах, как теперь, ледяной покров защищает континенты от эрозии и выветривания, ограничивая потери атмосферного углекислого газа и охлаждение. Если же континенты находятся в тропиках, ледяной покров в основном состоит из морского льда и не защищает их от эрозии и выветривания. Распространение льда и выветривание горных пород продолжалось бы до тех пор, пока огромные ледяные шапки Северного и Южного полушарий не стали отражать так много света, что уже ничто не сдерживало их рост, и тогда они практически соединились бы на экваторе, заковав планету в лед на десятки миллионов лет.

Жизнь сохранилась только в маленьких бассейнах воды на дне океана, а Земля в конце концов оправилась от последствий этого катаклизма благодаря тектонике плит. Глобальный ледяной покров и низкие температуры прекратили эрозию и выветривание горных пород и остановили дальнейшее удаление углекислого газа, однако благодаря вулканизму, продолжавшемуся в зонах субдукции (например, в островодужных системах) и срединно-океанических хребтах, в атмосферу выделялся углекислый газ и восстанавливался былой уровень парниковых газов. Накопление вулканического пепла, вероятно, также способствовало

загрязнению ледяного покрова, что уменьшило его способность отражать солнечный свет. В конце концов поверхность снова прогрелась и планета вышла из замороженного состояния. Последнее тотальное оледенение Земли закончилось примерно 600 млн лет назад, как раз перед возникновением многоклеточных организмов, и, возможно, вызвало расцвет сложных форм жизни – так называемый кембрийский взрыв.

Были в истории Земли и теплые периоды с высокими температурами на всей планете, полным исчезновением ледяного покрова и тропическим климатом даже за полярным кругом, где находят окаменелые останки пальм и доисторических крокодилов. Так было 50–60 млн лет назад, в эпоху, называющуюся эоценом, не так много времени (по геологическим меркам) спустя после падения астероида на полуостров Юкатан и исчезновения динозавров. Эта была эпоха высокого уровня углекислого газа в атмосфере, который, возможно, высвободился во время континентального распада и рифтогенеза, когда лава расплавила богатые карбонатом океанские отложения в районе Баффинова залива в Северной Атлантике. Эоцен также известен резкими потеплениями – термическими максимумами. Экстремальные температурные рекорды были зафиксированы во время палеоцен-эоценового термического максимума. (Конечно, никто не измерял тогда температуру и уровень углекислого газа. Их можно оценить косвенно, поскольку температура влияет на океан и организмы потребляют различное количество изотопов кислорода и углерода, и эти уровни изотопов фиксируются в породах и окаменелостях.)

Возможно, короткий тепловой максимум палеоцена-эоцена был вызван выделением метана со дна океана. Даже сегодня микробная жизнь на дне океанов производит много метана, «замороженного» в частичках льда, называемых клатратами. Если бы потепление, вызванное выделением углекислого газа при вулканической деятельности, т. е. при тепловой обработке отложений, нагрело океаны так, чтобы расплавить клатраты, они выпустили бы метан. Этот мощный парниковый газ привел бы к потеплению, в том числе и океанов, что вызвало бы дальнейшее плавление клатрата и привело к интенсивной положительной обратной парниковой связи. Однако из-за высокого содержания атмосферного кислорода метан распадается, менее чем через 10 лет он превратился бы в более слабые парниковые газы – водяной пар и углекислый газ. Возможно, это объясняет, почему тепловой максимум был таким интенсивным и таким коротким.

В течение последних 50 млн лет Земля постепенно охлаждается. Во время эоцена Австралия и Антарктида были единым континентом, берега которого на севере достигали теплых широт. Океанские течения, огибая это



побережье, несли теплую воду в полярные районы Антарктиды, которая была теплой и свободной ото льда. Затем Австралия отделилась от Антарктиды и двинулась на север в сторону Азии. Антарктические прибрежные течения ограничили прохладными полярными водами, этот феномен наблюдается по сей день и называется Антарктическим циркумполярным течением или течением Западных Ветров. Приток теплой воды к Антарктиде прекратился, это повлекло охлаждение Белого континента. Начавшееся там образование льдов способствовало еще большему охлаждению, а значит, большему накоплению льда и т. д.

Миграция отделившегося Австралийского субконтинента к северу была частью того же тектонического движения плит, которое привело к столкновению Индии с Азией и образованию Гималаев. Возможно, появление этого гигантского горного хребта привело, согласно гипотезе Раймо – Раддимана (в честь американских палеоклиматологов Морины Раймо и Уильяма Раддимана), к обширной эрозии, выветриванию и удалению углекислого газа. Как правило, горные цепи способствуют выпадению осадков, потому что влажный воздух выталкивается вверх по склону гор к более прохладным высотам. Кроме того, от прогретых летом континентов восходят конвективные воздушные потоки, сталкиваясь с влажным воздухом над океанами, они выпадают на континенты дождями и снегом (что называется муссонной циркуляцией). Увеличение количества осадков над недавно образовавшимися Гималаями ускорило процессы эрозии и выветривания и активизировало удаление углекислого газа, усилив общую тенденцию к охлаждению климата.

Тем не менее в течение этих 50 млн лет охлаждения Антарктика успела утратить свой ледовый покров (около 30 млн лет назад) и восстановить его через 15 млн лет – в эпоху, которая называется миоценом. Со времен миоцена Земля обзаводится полярными шапками, а наша климатическая история за последние несколько миллионов лет легче поддается детализации благодаря данным, которые можно измерить: ледяным кернам, годичным кольцам деревьев, пещерным отложениям и т. п. В последние несколько миллионов лет на Земле периодически повторялись короткие ледниковые периоды или оледенения продолжительностью от десятков тысяч до сотен тысяч лет, что хорошо согласуется с описанными выше циклами Миланковича.

Последнее крупное оледенение – плейстоцен – началось приблизительно 2,6 млн лет назад и закончилось на заре цивилизации около 12 000 лет назад (этот период включал короткие периоды потеплений). Но даже во время появления людей около 7 млн лет назад (к

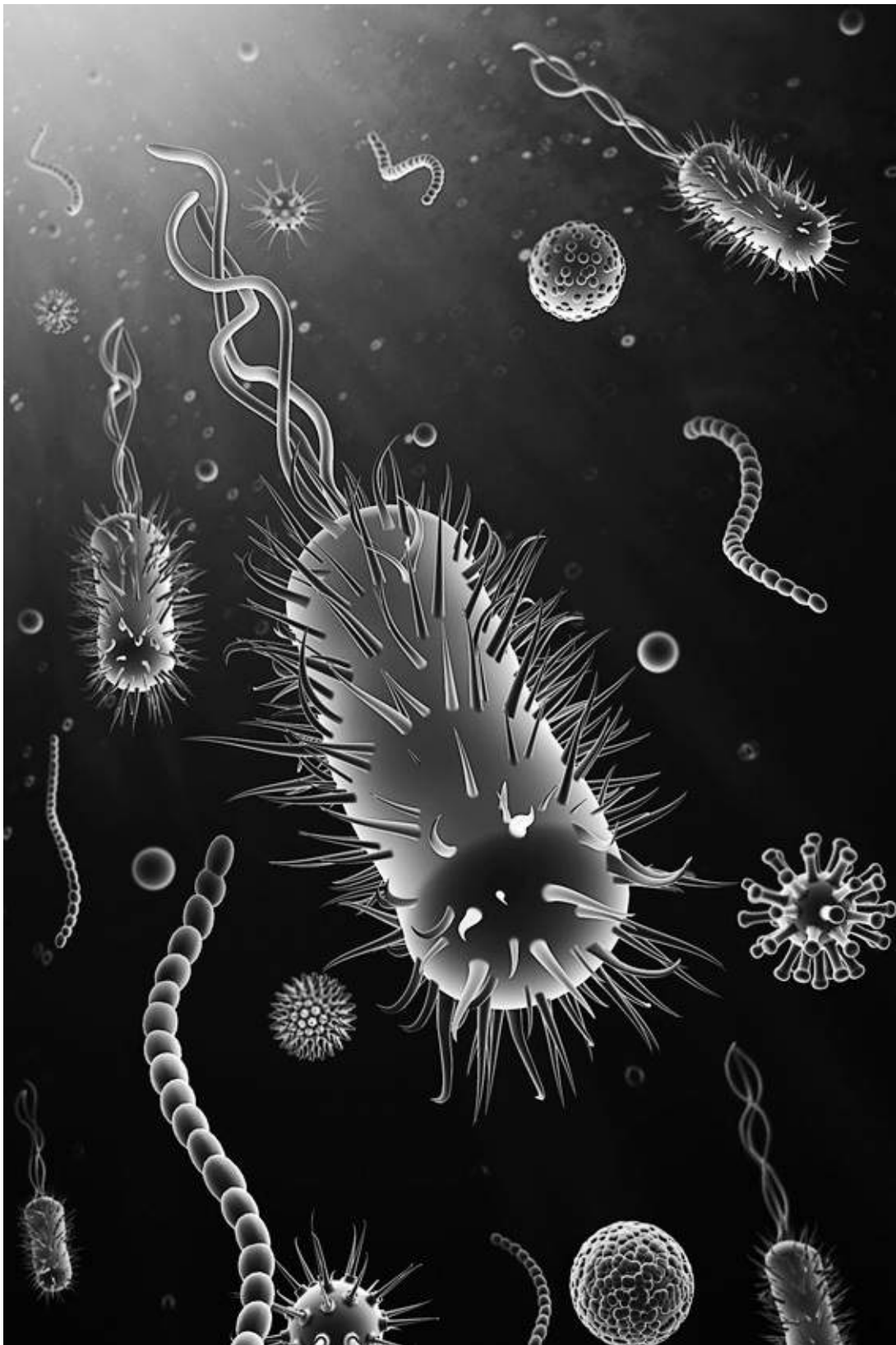
чему мы вернемся позже) на Земле доминировала стойкая тенденция к охлаждению, по существу, длился ледниковый период, и на протяжении всего существования человечества у планеты имелись ледяные шапки. Мы – творения ледникового периода, не приспособленные жить в условиях эоцена и подобных теплых эпох. Потому потеря льдов Антарктиды и Гренландии стала бы для нас катастрофой, и дело не только в резком повышении уровня океана: мы оказались бы на такой Земле, которую наш вид никогда не знал и вообще не должен был населять.

Причины стабильного климата и жизнепригодности, как и механизмы изменения климата, – важные и сложные темы для человечества. Мы столкнулись с кризисным изменением климата, вызванным деятельностью людей. Парниковое потепление, вызванное антропогенными выбросами углекислого газа из-за сжигания ископаемого топлива, уже заметно. Оно было аргументированно предсказано более 100 лет назад шведским лауреатом Нобелевской премии Сванте Аррениусом. То, что концентрация углекислого газа в атмосфере Земли растет неестественными темпами, было доказано американским геохимиком Чарльзом Килингом на материале, собранном за 60 лет измерений у вершины гавайского вулкана Мауна-Лоа. Специалисты по-прежнему обсуждают детали потепления климата в ответ на выброс углекислого газа в атмосферу нашей планеты, но то, что на Земле точно станет значительно теплее, сомнений не вызывает.

Что стало причиной драматических изменений – выбросы углекислого газа или же климат изменился бы в любом случае, независимо от деятельности человека? Климат Земли менялся сам по себе, но, как правило, при изменении концентрации углекислого газа. Климат резко реагировал, когда большие и стабильные объемы углерода внезапно сжигались или высвобождались в результате вулканической деятельности. Нет никакой разумной причины полагать, что климат Земли отреагировал бы по-другому, если бы мы выпустили большое количество углекислого газа из другого огромного источника. Размышлять, имеет ли значение наша деятельность при таком количестве естественных причин изменений климата, – все равно что спрашивать, повлияет ли игра в русскую рулетку во время артобстрела на ваши шансы выжить. Если цель – не умереть, ответ один: не играйте в русскую рулетку.

Вопрос антропогенного влияния на климат – это вопрос не о спасении планеты, а о нашем спасении, о сохранении узкой обитаемой зоны, которая подходит для нас (и некоторых других созданий), появившихся на Земле в ледниковом периоде. Как бы усердно ни ухудшали мы свое положение, с самой планетой все будет в порядке еще несколько миллиардов лет, рано

или поздно тектоника плит удалит весь созданный нами углекислый газ, и все вернется на свои места. То, что мы не можем ждать так долго, – это наша проблема, а не проблема Земли.



## 7. Жизнь

Происхождение жизни, то, как она появилась, до сих пор остается

святым Граалем науки, одним из главных вопросов, на которые ученые пока не знают ответа. Возникновение жизни из неорганической, неживой материи вполне логично, хоть и не так поэтично, называется абиогенезом.

Но прежде необходимо дать определение самому понятию жизни, поскольку надо понимать, что мы ищем. (Признаки жизни могут быть интуитивно понятны, однако говорить «узнаю, когда увижу» не слишком научно.) В самом простом смысле жизнь – это химическая реакция, которая прямо или опосредованно потребляет вещество и энергию из окружающей среды, чтобы расширять, распространять и воспроизводить себя. Такая реакция называется автокаталитической, потому что ее облегчают или даже ускоряют продукты реакции. Например, при фотосинтезе растения используют энергию солнечного света, чтобы соединить воду и углекислый газ для производства длинных цепочек молекул углеводов, которые составляют большую часть массы растения (в виде целлюлозы), что затем обеспечивает еще больше фотосинтеза. В отличие от растений аэробные, дышащие кислородом клетки и такие животные, как мы, поедают эти растения (или другие организмы, которые поедают эти растения) и используют их материю, содержащую солнечную энергию, чтобы создать больше клеток, которые будут поедать больше растений. Воспроизводя и размножая себя, жизнь активно распространяется в поисках источников материи и энергии.

Некоторые свойства жизни присущи химическим реакциям неживой материи, например горению. Как и аэробная жизнь, огонь потребляет материю и энергию и в ходе реакции горения, обратной фотосинтезу, образует воду и углекислый газ. Как и жизнь, огонь распространяется, потребляя топливо (например, дерево и траву), и катализирует себя, нагревая топливо, пока оно не воспламенится.

Тем не менее два других определения жизни отличают ее от огня. Во-первых, реакция жизни не только потребляет материю, но и создает сложные молекулы, образующие «матрицу», с помощью которой катализируется больше таких же молекул, т. е. идет их воспроизводство. При этом не только ускоряются реакции, но и наследуется информация, полученная от предшествующих молекул. (Для сравнения: огонь не дублирует сложные молекулы, а создает простые – воду и углекислый газ.) Во-вторых, жизнь развивается благодаря естественному отбору: если окружающая среда становится непригодной для поддержания химической реакции, существует вероятность, что жизнь сумеет к этому приспособиться (если изменение не произошло слишком быстро). Основано это на копировании предшествующих несовершенных

организмов. Если новые поколения организмов выживают, значит, они чем-то отличаются от своих прародителей, не являются их клонами. В этом суть дарвиновского естественного отбора: группа организмов или особей обладает достаточным внутренним разнообразием, в результате чего некоторые особи оказываются лучше приспособленными к неблагоприятным изменениям окружающей среды и выживают, а неприспособленные вымирают. Огонь не приводит к приспособлению, если окружающая среда слишком холодная или слишком влажная, он просто гаснет, не происходит отбора, в результате которого одни пожары приспособляются к холодной или влажной среде, а другие прекращают свое существование. Коротко говоря, жизнь – самоподдерживающаяся энергоемкая химическая реакция, чьи продукты – молекулы – катализируют или воспроизводят сами себя, и при этом они обладают достаточным разнообразием, чтобы эволюционировать путем естественного отбора, если окружающая среда станет непригодной (достаточно медленными темпами). Ну, получилось не совсем коротко.

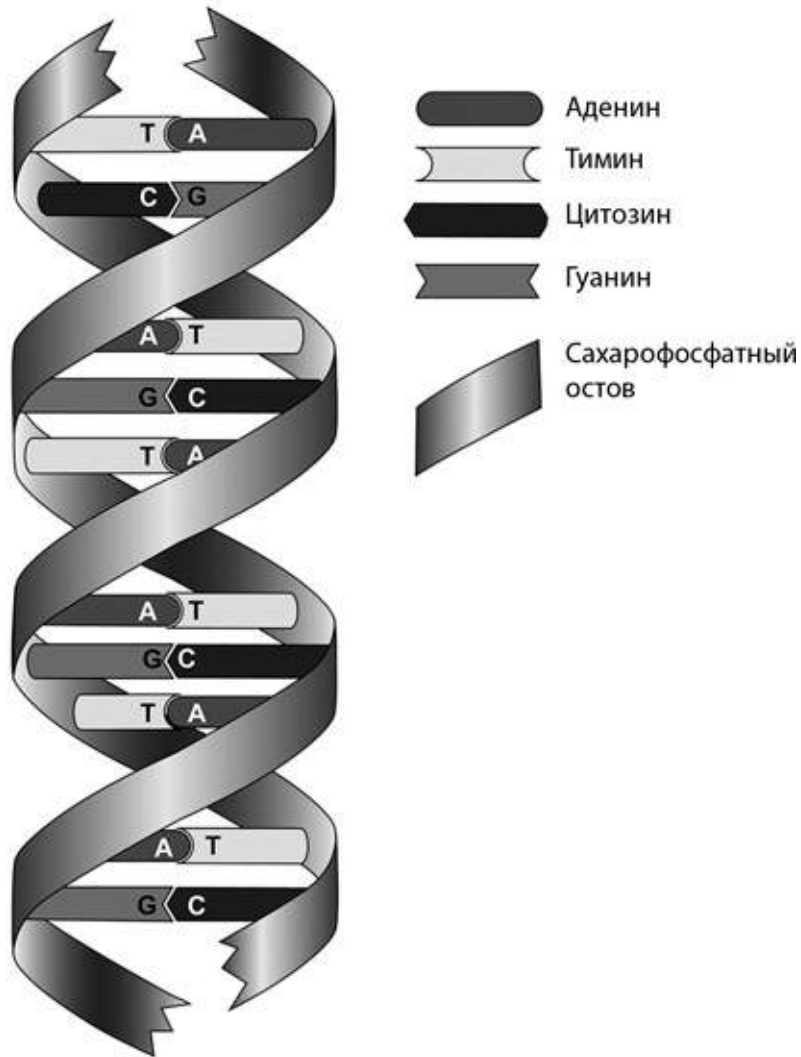
Вся жизнь на нашей планете имеет клеточную природу, потому что химические реакции, поддерживающие жизнь, происходят внутри капсулы – клетки. Капсула окружена полужидкой мембраной, которая позволяет проникать внутрь питательным веществам и источникам энергии и защищает поддерживающие жизнь реакции от рассеяния или уничтожения (скажем, океанскими волнами). Возможно, самые ранние из таких капсул использовали для защиты пузырьки внутри лавовых пород вроде пемзы. Некоторые неклеточные формы жизни, такие как вирусы, представляют собой «свободно плавающий» генетический материал в защитной оболочке. Они обладают некоторыми признаками жизни, например подвержены действию естественного отбора, однако вирус может воспроизвести себя, лишь взломав клеточный механизм другого организма. Таким образом, являются ли вирусы живыми или нет – вопрос все еще не решенный.

Древнейшие известные ископаемые живые существа – это одноклеточные микроорганизмы (вроде бактерий) возрастом около 3,5 млрд лет. Возможно, жизнь на нашей планете существовала и раньше, но более древние ископаемые находки пока вызывают споры исследователей. Несмотря на большое разнообразие живых существ в настоящее время, основные компоненты для создания жизни практически не изменились почти за 4 млрд лет и для построения основных биологических структур нужно лишь несколько химических элементов.

Важнейшими элементами для возникновения жизни являются водород,

углерод и кислород. Живые организмы неизменно получают их из источников воды и углекислого газа в атмосфере. Вода и углекислый газ необходимы не только для производства углеводов, которые служат материалом для построения тела растений и аэробным источником энергии; молекулы углеводов составляют и компонент генетического материала, РНК (рибонуклеиновой кислоты) и ДНК (дезоксирибонуклеиновой кислоты) – матриц, на которых происходит самовоспроизводство биологических молекул. Когда углеводы «восстанавливаются» путем удаления кислорода (в общем случае восстановление означает приобретение электронов, как правило, тех, которые кислород связывал в оксидном соединении), от них остаются углеводороды в виде жирных кислот, которые входят в состав липидов в клеточных мембранах и жировых клетках, где жиры хранятся как энергетический запас. Углерод и кислород также активно используются в других важных молекулах, о чем мы поговорим чуть ниже.

Следующим по важности элементом является азот, в основном в форме амидного иона, имеющего один атом азота, два атома водорода и свободный электрон с отрицательным зарядом, который используется, чтобы соединиться с другими атомами (или группами атомов), для создания аминов. Амиды получаются из аммиака – молекулы, состоящей из одного атома азота и трех атомов водорода, – путем отсечения одного атома водорода. Амиды соединяются с другой молекулой, состоящей из углерода, кислорода и водорода (это не углеводы, а карбоксильные соединения), и тогда образуются аминокислоты, которые служат основными строительными блоками для белков. Белки имеют огромное значение, потому что их функции чрезвычайно разнообразны, мы встречаем их везде – от ферментов до мышц. Ферменты ускоряют химические реакции, т. е. выступают в роли катализатора, например при расщеплении молекул пищи. Благодаря «скорости» они поддерживают биологическую активность. Кроме того, под действием электрического или химического стимула белки сворачиваются и скручиваются в различные формы, что делает возможным движение: например, биение жгутиков позволяет бактерии плавать, да и наши мышцы сокращаются благодаря белкам. А двигаться полезно: это помогает искать пищу и источники энергии.



Молекула ДНК состоит из последовательно расположенных нуклеотидов, каждый из которых представляет собой сочетание сахарофосфатного остова, прикрепленного к одному из азотистых (нуклеотидных) оснований – аденину, цитозину, гуанину или тимину. Таким образом, ДНК предстает в форме винтовой лестницы, в которой нуклеотидные основания образуют «перекладины», а сахарофосфаты соединяются вместе, образуя рядки этой лестницы. Эти нуклеотидные основания образуют последовательности, сохраняющие генетическую информацию и инструкции для работы клетки, а также связываются с соседями на другой стороне лестницы по определенным правилам (как указано на диаграмме), что позволяет ДНК в точности воспроизводить себя после расщепления. (С разрешения Барбары Шеберл, Animated Earth LLC.)

Азот также соединяется с углеродом, кислородом и водородом, образуя соединения, называемые нуклеотидами, которые служат важнейшими компонентами нуклеиновых кислот ДНК и РНК. К нуклеотидам относятся



аденин, цитозин, гуанин (все они входят и в ДНК, и в РНК), тимин (только в ДНК) и урацил (только в РНК): в схемах их обозначают как азотистые основания А, С, G, Т и/или U, и они служат перекладинами на винтовых лестницах ДНК и РНК (РНК выглядит как половина лестницы, разрезанной вдоль).

Наконец, у нас есть фосфор, который проявляется только в связи с кислородом в качестве фосфата (атом фосфора связан с четырьмя атомами кислорода). Фосфаты связываются с сахаром и другими азотистыми основаниями, образуя нуклеотиды, которые связываются вместе, чтобы создать одинарную или двойную спираль РНК и ДНК. В частности, сахар и фосфатные компоненты каждого нуклеотида соединяются, подобно позвонкам (т. е. атом сахара конца одного нуклеотида связан с атомом фосфата конца следующего), образуя рибозный (у РНК) или дезоксирибозный (у ДНК) «позвоночник» или «лестничные пролеты», в то время как азотистые основания выглядят как «перекладины» лестницы. Нуклеотиды также входят в состав молекул, которые хранят и переносят энергию, например аденозинтрифосфата (АТФ), который служит «золотой валютой» энергии в клеточной деятельности, поскольку содержит три фосфата, которые активно вступают в реакции. Вдобавок фосфаты и азот в сочетании с жирными кислотами образуют фосфолипиды в клеточных мембранах.

В ДНК и РНК нуклеотидные основания (или просто основания) химически связаны друг с другом, но лишь определенными взаимодополняющими способами. Например, нуклеотид А связывается только с Т, а С – только с G, чтобы заполнить обе стороны от лестницы ДНК; таким образом, полная ступень ДНК будет состоять из А на одной стороне лестницы и Т – на другой стороне и т. д. Во время клеточного деления ДНК расщепляется продольно, и основания, торчащие, словно «обломанные перекладины» на каждой половине лестницы, соединяются со своими основаниями-«партнерами», которые свободно плавают в клеточном бульоне и таким образом воссоздают другую сторону каждой лестницы – так ДНК воспроизводит себя. Именно эта особенность позволяет ДНК создавать копии самой себя, дублируя свои молекулы и тем самым создавая основную особенность жизни (или, по крайней мере, той жизни, которую мы знаем). ДНК также несет генетическую информацию о самовоспроизводстве и функционировании клеточных механизмов, эта информация закодирована или записана в последовательности пар оснований «лестничных перекладин» ДНК. Помимо самовоспроизводства ДНК может разделять и копировать фрагменты своих расщепленных цепей

в РНК (снова путем сопоставления азотистых оснований), которые затем получают различные задания, например распределяют аминокислоты в особые белки для выполнения различных задач.

Жизнь полностью состоит из четырех основных классов химических соединений (помимо воды) – углеводов, жирных кислот, аминокислот и нуклеотидов, а они, в свою очередь, состоят всего лишь из пяти элементов – водорода, углерода, кислорода, азота и фосфора. Из них лишь бóльшая часть водорода образовалась в результате Большого взрыва, а остальные четыре элемента сформировались внутри звезд. Есть и другие элементы, которые в намного меньших количествах встречаются у разных живых организмов: например, железо в нашей крови транспортирует кислород, который используется для преобразования сахара для наших энергетических потребностей. Эти четыре класса соединений, состоящих из пяти элементов, – то, что объединяет все живые организмы. Чтобы жизнь, которую мы знаем на Земле, образовалась «с нуля», необходимы все эти строительные блоки.

Одной из самых известных попыток создать строительные блоки жизни из неживой материи стал ряд экспериментов, проведенных в 1950-х гг. студентом Чикагского университета Стэнли Миллером и его выдающимся наставником Гарольдом Юри (получившим в 1934 г. Нобелевскую премию по химии за открытие дейтерия). Миллер создал смесь, которая, как считается, повторяла примитивную атмосферу Земли, содержащую водород и его соединения – воду, метан и аммиак. Затем Миллер подверг этот химический бульон воздействию высоких температур (в основном с помощью водяного пара) и вдобавок подавал в колбу электрические разряды. В результате через несколько дней в колбе образовывалось несколько аминокислот. Однако, строго говоря, созданная в ходе этого эксперимента атмосфера была более характерна не для Земли, а для протосолнечной туманности. Подобные условия можно было бы обнаружить во внешней Солнечной системе, на Юпитере, Сатурне и на некоторых их спутниках. Скорее всего, такая атмосфера возникла и была вынесена из внутренней части Солнечной системы при ее формировании. Также в первоначальной атмосфере Земли, вероятно, преобладали углекислый газ и вода – продукты вулканической дегазации, а в эксперименте Миллера – Юри ничего подобного нет. И все же этот эксперимент впервые показал, что простые реакции нескольких соединений могут привести к созданию по крайней мере одного из основных строительных блоков жизни. Это открыло дорогу множеству экспериментов, проведенных в последующие десятилетия и стремившихся

получить строительные блоки жизни путем имитации первичного бульона в примитивных атмосферных и океанических условиях. Кстати, аминокислоты могли формироваться даже в открытом космосе; несколько аминокислот (не все из них аналогичны земным) были обнаружены на Мурчисонском метеорите, углеродистом хондрите, прилетевшем из пояса астероидов. Метеориты занесли на Землю аминокислоты или нет – нам неизвестно, но это и не важно: если аминокислоты могут образовываться в самых разных средах, там могут возникать и другие строительные блоки жизни.

Вскоре после эксперимента Миллера – Юри испанский биохимик Хуан Оро смог сформировать нуклеотидные основания, которые, как вы помните, служат «перекладинами» в лестничной структуре ДНК и РНК, а также аминокислоты. До недавнего времени не удавалось сформировать полные нуклеотиды, которые соединяются, чтобы образовать полные молекулы РНК и ДНК, однако в последнее десятилетие был достигнут значительный прогресс в синтезе строительных блоков жизни (включая липиды, аминокислоты и нуклеотиды) из соединений, которые, предположительно, существовали на ранней Земле. Особенно удачными были исследования химика из Кембриджского университета Джона Д. Сазерленда. Простейшие возможные клетки состоят из цепочки ДНК, заключенной вместе с питательным бульоном внутри жирных кислот, липидного пузыря или мембраны, образуя оболочку клетки. Недавние эксперименты группы биохимика Джека Шостака из Гарвардского университета показали, что некоторые липиды могут создавать пузырьки в нуклеиновых кислотах, позволяя образоваться чему-то вроде протоклетки. Таким образом, исследователи сделали большой шаг вперед к «спонтанному» абиотическому образованию клеток после экспериментов Миллера – Юри.

Когда и где жизнь возникла на нашей планете? Хотя самым древним ископаемым микроорганизмам около 3,5 млрд лет, у них, вероятно, были некие клетки-предшественники, из которых после миллионов лет проб и ошибок возникли эти организмы. Возможно даже, что основой биологического воспроизводства ранней жизни была не ДНК, а более простая молекула РНК. В современных клетках РНК играет роль «мальчика на посылках» у ДНК, например, она создает специфические белки. Однако американские биохимики Сидни Олтмен и Томас Чек показали, что РНК может катализировать химические реакции или воспроизводить себя. Это открытие принесло им Нобелевскую премию и оказало мощную поддержку идее под названием «гипотеза мира РНК», согласно которой примитивная

жизнь была основана на простом методе воспроизводства, характерном для РНК и предшествовавшем более сложному методу воспроизводства ДНК, который в наши дни характерен для клеточной жизни.

Чарльз Дарвин, как и Миллер и Юри, полагал, что жизнь возникла на поверхности Земли, в водоемах с первичным бульоном, где были основные ингредиенты для самозарождения, и поддерживалась за счет энергии Солнца с помощью фотосинтеза (на самом деле первой достоверно известной формой жизни были фотосинтезные бактерии). Но если жизнь формировалась таким образом ранее чем 3,5 млрд лет назад, это было бы просто чертовски трудно. В то время поверхность Земли представляла собой чрезвычайно враждебную среду, где, вероятно, было очень жарко из-за того, что атмосфера была полна углекислого газа. На Земле все еще происходила очень активная вулканическая деятельность, и, скорее всего, к ней добавлялись массивные удары астероидов, особенно в период поздней тяжелой бомбардировки (от 4,2 млрд до 3,8 млрд лет назад). Таким образом, поверхность, вероятно, не была пригодна для формирования первых хрупких форм жизни.

В конце 1970-х гг. геолог из Орегонского университета Джек Корлисс и его коллеги с помощью исследовательского глубоководного аппарата «Алвин» обнаружили, что гидротермальные источники и расселины срединного-океанического хребта в районе Галапагосских островов, в месте, где расходятся две самые большие литосферные плиты, заселены живыми организмами – и это на дне океана, вдали от солнечного света. Здесь в воды океана под давлением извергаются из недр потоки геотермальной воды. Хотя ее температура выше температуры кипения воды на уровне моря, она не кипит, так как давление на таких глубинах очень высокое. Циркулирующая по вулканическим хребтам вода этих жерл-источников («черных курильщиков») насыщена минералами и содержит растворенные вулканические газы – углекислый газ, водород, сероводород. В этих сверхгорячих гидротермальных потоках были обнаружены напоминающие бактерий микроорганизмы, названные археями. Они термофильные, т. е. обитают в горячей воде. Возле источников существуют экосистемы крупных организмов, таких как трубчатые черви. Они питаются веществами, поглощенными археями, и бактериями, обитающими в этой неприветливой среде. Например, черви погонофоры получают энергию и питательные вещества из бактерий, которые, в свою очередь, питаются путем хемосинтеза (а не фотосинтеза, учитывая недостаток солнечного света), при котором сероводород из подводных источников используется для создания органического углерода

путем его выделения из молекул углекислого газа. Это открытие показало, что жизнь может процветать вдали от нашего любимого источника энергии, Солнца, за счет тепла и химических веществ, поступающих из недр. Можно предположить, что примитивная жизнь могла сформироваться на дне океана, в защищенном от враждебной среды месте и выжить за счет надежного источника энергии – мантии Земли. Также возможно, что жизнь могла бы возникнуть на планетах, расположенных слишком далеко от своей звезды (например, на спутнике Юпитера Европе), вулканическая энергия которых способна поддерживать воду в жидком состоянии.

Археи, впервые обнаруженные у гидротермальных жерл, а затем и в других, довольно неожиданных земных средах, вроде горячих источников, кратерных озер, солончаков, полярных льдов и даже в наших с вами внутренностях, были сначала отнесены к бактериям, поскольку, как и бактерии, они состояли из нескольких простых цепочек ДНК в липидном пузырьке. Однако впоследствии у архей и бактерий было обнаружено больше различий, чем сходства: в их РНК, в использовании энергии (метаболизме), химии их клеточной стенки, а также в жгутиках, которые они используют для плавания. И бактерии, и археи являются прокариотами – у них простая клеточная структура, они редко составляют клеточные колонии и никогда не образуют многоклеточной жизни.

Наличие жизни на поверхности Земли зависит от фотосинтеза. Его возникновение было самой значимой биологической революцией на планете, уступая, возможно, лишь самому факту появления жизни. Фотосинтез является (прямо или косвенно) основой питания почти всей жизни на Земле, к тому же он коренным образом изменил атмосферу. Принцип работы фотосинтеза все еще активно изучается, и, хотя я постараюсь максимально упростить описание этого явления, это реакция весьма сложная и состоящая из нескольких этапов. Обычно фотоны солнечного света улавливаются клеткой с помощью белков, содержащих пигменты, такие как хлорофилл, а затем энергия фотонов используется для расщепления молекулы воды и отделения электрона, в результате чего остается ядро водорода (протон) и кислород, который выделяется как побочный продукт. Высвобожденный электрон – это, прежде всего, носитель энергии, который используется для синтеза переносчиков энергии в клетке, например АТФ. Часть накопленной энергии используется для ассимиляции атмосферного углекислого газа, чтобы заменить в нем один атом кислорода на два атома водорода и получить конечный продукт – сахар (и еще больше кислорода). Производство сахара превращает углекислый газ в органические вещества, позволяя им захватывать больше

электронов, не делаясь с «жадным» до электронов кислородом. Чем больше кислорода удалено таким образом, тем более восстановленным становится углерод (подробнее об этом позже) и тем больше энергии заключено в его электронных связях.

Одной из первых заметных доминирующих форм, обитавших на поверхности, были фотосинтезирующие бактерии, весьма похожие на цианобактерии, которые часто неправильно называют сине-зелеными водорослями. Эти бактерии образуют цианобактериальные маты – слоистые покровы микробов. Открытые воздействию Солнца, они постепенно затвердевали и кальцинировались, и в итоге формировались строматолиты – старейшие достоверно известные окаменелости. Обладая способностью к фотосинтезу, эти микробы превращают углекислый газ и воду в сахар и выпускают свободный кислород в качестве побочного продукта. Кислород химически очень активен, он стремится присоединить «чужие» электроны и, как правило, связывается практически с любым доступным элементом, за исключением еще более химически активных, «жадных до электронов», например хлора или фтора. Для многих форм жизни кислород является едким и ядовитым, это можно сравнить с воздействием хлора, одного из первых ядовитых газов, использовавшихся во время Первой мировой войны.

Поначалу фотосинтезированный побочный кислород не накапливался в атмосфере, а связывался с железом и другими элементами, а также с богатыми железом минералами на поверхности Земли и в океане, образуя окись железа – основу ржавчины. В течение примерно 2 млрд лет все доступное железо было окислено, оставив множество древних геологических отложений оксида железа (так называемые полосчатые железистые формации, которые образовали используемые сейчас месторождения железной руды). После этого, исчерпав минералы и металлы для реакций, кислород стал накапливаться в атмосфере до той концентрации, которую мы наблюдаем сейчас, – около 20 % от массы атмосферы.

Стабилизацию концентрации кислорода можно объяснить тем, что он достиг равновесия со всеми полученными органическими материалами (сахарами, жирами, метаном и т. д.), которые вступают в реакцию с кислородом, чтобы в конце концов вновь образовать углекислый газ и воду. В химии это означает, что реакция достигла стационарного состояния, т. е. производство кислорода в процессе фотосинтеза уравновешено его потреблением в ходе обратной реакции. Как уже отмечалось ранее, один из способов осуществить такую обратную фотосинтезу реакцию и достичь

этого баланса – горение, когда накопленная солнечная энергия испускается в виде тепла и света. Другой способ заключается в жизнедеятельности аэробных организмов (например, людей), потребляющих сахара и жиры, которые вступают в реакцию с кислородом, используют высвобожденную солнечную энергию и выделяют углекислый газ и воду. Предки аэробных организмов были похожи на бактерии и эволюционировали таким образом, что могли в качестве запасного варианта использовать кислород для потребления собственных сахарных источников энергии, когда им не хватало солнечной энергии. Этот навык пригодился им позже (подробнее об этом ниже). В конце концов баланс между фотосинтезом и аэробным потреблением привел к тому, что уровень кислорода стал постоянным.

Количество атмосферного кислорода огромно – 20 % от массы атмосферы Земли, или примерно 1 квадрилл т (10<sup>18</sup> кг). Следовательно, существует огромный резервуар органического вещества, который дополняет весь этот свободный кислород. Это другой продукт реакции фотосинтеза, а именно сахар, хотя обычно его называют органическим углеродом. (Углерод, путем выветривания вошедший в горные породы в виде карбонатов, называют неорганическим углеродом.) Большая часть этого органического вещества изолирована от атмосферы, иначе оно в конце концов вступило бы в реакцию со свободным кислородом. На Земле органический углерод легко укрыть, например, на дне океанов или под осадочными породами, которые беспрестанно производятся эрозией постоянно образующихся вулканов и гор. Этого накопленного органического углерода сегодня в несколько тысяч раз больше (в единицах массы углерода), чем в биосфере, которая сама по себе является относительно крошечной системой, непрерывно производящей и потребляющей кислород.

Заслуживает упоминания то, как аэробные организмы используют сахар, чтобы получить энергию в процессе дыхания. Когда сахар (или углеводород) просто сгорает при взаимодействии с кислородом, запас органического углерода из обладающих запасом энергии электронов, возникших в результате фотосинтеза, захватывается кислородом и переходит на более низкий уровень энергии в кислородной атомной структуре или «валентном электронном слое», высвобождая энергию в виде тепла и света. Если же сахар используется аэробным организмом, реакции метаболизма приводят к тому, что электроны органического углерода медленно просачиваются назад к «жадному до электронов» кислороду и создают электрическое напряжение. Его энергия используется для создания АТФ, что поддерживает механизмы жизнедеятельности

клетки. Часть накопленной энергии сахара выделяется в виде тепла, что позволяет теплокровным существам оставаться теплыми. И при сгорании сахара, и при его аэробном потреблении, как только к кислороду присоединяется электрон, он уходит с побочным углекислым газом и водой.

Как отмечалось в главе 5, азот составляет большую часть оставшихся 80 % массы атмосферы, представляющей собой резервуар биологических строительных блоков. При этом азот относительно инертен, не так легко вступает в химические реакции. Требуется долгая работа бактерий и архей в океанах и почве, чтобы образовался, например, аммиак, который более крупные организмы, например растения, используют для создания аминокислот. Напрямую мы атмосферный азот не используем. (Хотя производство удобрений, обеспечивающих необходимые для населения Земли урожаи, стало возможным благодаря процессу синтетического связывания атмосферного азота. Открывший его более 100 лет назад немецкий ученый Фриц Габер был удостоен Нобелевской премии по химии.)

На протяжении первых миллиардов лет существования биосферы Земли в ней по большей части преобладали простые одноклеточные прокариоты – бактерии и археи. Сложные клетки, из которых состоят животные, растения и такие сложные одноклеточные организмы, как грибы, амёбы и инфузории, возникли около 2 млрд лет назад. Они называются эукариотическими и сильно отличаются от прокариотических клеток. Типичная эукариотическая клетка имеет мембрану, поддерживаемую цитоскелетом, а ее ядро удерживает в себе ДНК, не позволяя ей свободно плавать, и имеет так называемые органеллы – компоненты клетки, необходимые для ее существования. Помимо этого клетки эукариоты могут изменять свою форму и имеют мембраны, чтобы поглощать и есть другие организмы. Но как же эукариоты возникли?

Происхождение эукариот обычно объясняют теорией симбиогенеза, предполагающей, что вначале объединились две прокариоты. Возможно, одна из них поглотила другую или же вторглась в нее: различия здесь практически нет. Это могли быть археи, «поглощающие» бактерий, или наоборот. По мере того как это происходило, выработались комбинации симбиотического обмена. Аэробные бактерии, способные удалять кислород, потребляя его и используя вместе с сахаром для производства энергии, были бы полезными партнерами для архей, для которых кислород является ядовитым. Фотосинтезирующие бактерии внутри крупных клеток могли бы генерировать сахар для их хозяина. Симбиотические комбинации



такого рода могли дать большое эволюционное преимущество в условиях насыщающейся кислородом атмосферы, и поэтому эукариоты смогли выжить.

Считается, что органеллы, компоненты клетки, необходимые для ее существования, сформировались в результате симбиотического партнерства. Доказательством служит то, что наши «человеческие» клетки содержат органеллы, весьма похожие на бактерии, – у них даже есть собственные маленькие цепочки ДНК. Эти органеллы называются митохондриями, и заняты они преобразованием большей части энергии внутри наших клеток. Растения также имеют выглядящие как бактерии органеллы – хлоропласты, благодаря которым осуществляется фотосинтез. В любом случае симбиотические отношения хорошо подходят для использования возрастающего уровня кислорода на планете вместе со всеми сахарами и липидами, накопленными фотосинтезирующими бактериями. Сахара и жиры – гораздо более эффективные и мобильные источники энергии, чем солнечный свет, улавливая который организмы проводили весь день неподвижно. Теперь мы можем не только запасать сахар и жиры для питания, но и использовать их в качестве топлива для автомобилей и самолетов, увеличивая свою мобильность.

Эукариотическая клетка – это, по сути, комбинация нескольких предковых клеток. Поэтому естественно, что сами эукариоты крупнее прокариот и могут достигать гораздо большего размера. Размер эукариот не ограничен, потому что их органеллы распределены по всей клетке, так что по мере увеличения клетки пропорционально увеличивается и количество органелл. Прокариоты, как полагают, почти не изменили свой размер (или форму) за почти 4 млрд лет в первую очередь потому, что большинство их клеточных структур находятся на внешней клеточной мембране в виде трубочек и насосов для перекачивания химических веществ, в то время как их внутренняя часть представляет собой просто химический бульон и свободно плавающую ДНК. По мере увеличения клетки вся нагрузка по обслуживанию дополнительного объема падает на мембрану и ее структуры; если радиус прокариотической клетки увеличивается вдвое, то площадь ее поверхности растёт в четыре раза, а объём – в восемь раз. В итоге поверхность клетки будет не в состоянии угнаться за объёмом, и поэтому рост прокариотам попросту невыгоден.

Большее разнообразие эукариот также объясняется отличиями в воспроизводстве. Прокариоты обычно совершают деление клеток (митоз), клонируя себя. Неудивительно, что они почти не изменились. Простые одноклеточные эукариоты совершают не просто деление клетки – они еще

разделяют и перетасовывают собственную ядерную ДНК, а потом соединяют ее часть с ДНК партнера посредством мейоза и полового размножения. Преимущество этих перетасовок и обмена в том, что они повышают разнообразие, а также уменьшают вероятность летальных генетических ошибок, вызванных повреждением фрагментов ДНК: поврежденные фрагменты теряются при перетасовке, зато сохраняются при простом клонировании. Разнообразие и контроль возникновения генетических ошибок стали эволюционным преимуществом, что привело к их закреплению.

Возникновение многоклеточных животных и растений, по всей видимости, началось с формирования колоний одноклеточных. В колонии все клетки идентичны, а в многоклеточном организме есть клетки специализированные, которые выполняют различные роли (как клетки наших мышц, мозга, костей, глаз). Прокариоты могут образовывать лишь простые нитевидные колонии и цианобактериальные маты; одноклеточные эукариоты могут создавать колонии различных структур, например вольвокс (подвижные шарообразные колонии водорослей, о которых шла речь в главе 1) или слизевик. Переход от колонии к многоклеточному организму, вероятно, был довольно простым, учитывая разнообразие путей адаптации и эволюции эукариот. Например, клетки на поверхности колонии отвечают за поглощение энергии и питательных веществ из окружающей среды, в то время как клетки внутреннего слоя транспортируют питательные вещества и воду внутрь колонии, образуя таким образом подобие кровеносной системы. Различие в среде внутри колонии стимулирует эволюцию ее клеток в сторону специализации. В итоге клетки, обеспечивающие, например, движение колонии или восприятие хищников и добычи, могут в определенных обстоятельствах стать эволюционным преимуществом.

Однако на возникновение многоклеточных организмов на Земле ушло очень много времени. Еще 640 млн лет назад в биосфере по-прежнему доминировали одноклеточные организмы. Примерно с 640 млн по 540 млн лет назад существовали формы жизни, имеющие ветвящуюся и трубчатую структуру (эта эпоха называется эдиакарской), но эти организмы вымерли. Около 540 млн лет назад начался расцвет многоклеточных – появилось огромное число причудливых морских существ, большинство из которых, вероятно, вы приняли бы за страшных скорпионов, многоножек и крабов.

Это событие было названо кембрийским взрывом. После него в палеонтологической летописи появляются ископаемые останки, поскольку многие живые существа обзавелись твердыми раковинами и скелетами,

которые сохраняются в целом виде. Конечно, мы остаемся в неведении о более ранних мягкотелых ископаемых существах, однако уже в наши дни современная палеонтология способна обнаружить присутствие жизни по следам биологического и генетического материала, оставленного в горных породах давно исчезнувшими беспозвоночными. Кроме того, осадочные отложения, образованные до кембрийского взрыва (сохранившиеся в виде горных пород), несут мало следов деятельности роющих животных (этот эффект называется биотурбацией), а после кембрийского взрыва такие следы широко распространяются в донных отложениях.

Появление существ, имеющих раковину, чьи твердые части состоят из карбонатных пород, могло произойти из-за вулканогенного накопления углекислого газа в атмосфере, что вывело нашу планету из состояния «Земля-снежок» (описанного в главе 6). Например, избыток углекислого газа, растворяясь в океанской воде и вымываясь по действием эрозии, мог обеспечить наличие материала для построения раковин. Таким образом, кембрийский взрыв могло запустить окончание ледникового периода «Земли-снежка». За последние 400 млн лет растения и животные колонизировали сушу и продолжали эволюционировать и увеличивать многообразие, заполняя все возможные ниши и закоулки. И все же фанероза – время, прошедшее с кембрийского взрыва до наших дней, – составляет лишь около 10 % от всей истории Земли. Большую часть своей биологической истории Земля была заселена только микроорганизмами.

За время долгой истории жизни на Земле много солнечной энергии было накоплено в виде сахара, жиров и других органических веществ. В то же время в атмосфере накопилось огромное количество кислорода. Как уже отмечалось, большая часть органических веществ была скрыта от кислорода под отложениями и на дне океана. И лишь незначительная часть этого органического вещества, находившаяся глубоко под поверхностью Земли, образовала под воздействием высоких температур и давления различные виды ископаемого топлива. В сущности, это был процесс медленного «плавления» молекул сахара – удаления кислорода и восстановления углерода (возвращения ему электронов, отобранных кислородом). Морские органические отложения, подверженные этому процессу, могли стать источником нефтегазовых углеводородов (молекул водорода и углерода, но без кислорода); некоторые из их запасов могли затем выйти наверх благодаря тектонике плит или оказаться у земной поверхности, когда понизился уровень моря и они оказались на суше, например в западной части нынешних Соединенных Штатов – от Техаса до Вайоминга, где во времена динозавров плескалось море. Отложения

органического вещества на суше, например деревья и болота, могли бы при благоприятных условиях превратиться в уголь – относительно чистый углерод (в болотах образуется еще и торф – промежуточный продукт превращения в уголь). Нефть, газ и уголь (торф) составляют наши запасы ископаемого топлива, бóльшая их часть, около 85 % по массе углерода, приходится на уголь. Большинство его запасов было образовано около 300 млн лет назад – в геологический период, вполне заслуженно названный каменноугольным. Он продолжался, по геологическим меркам, недолго после того, как растения захватили сушу.

В общей сложности около 4 трлн т углерода связано в виде ископаемого топлива, что вдвое больше, чем масса углерода всей сегодняшней биосферы (считая живую и мертвую биомассу). Однако из всего органического вещества, синтезированного под действием атмосферного кислорода, бóльшая его часть, т. е. около 15 квадрилн т углерода, что примерно в 4000 раз больше, чем в ископаемом топливе, находится в коре, не трансформировавшись в ископаемое топливо, причем залегает так, что извлечь или использовать его слишком трудно. Эти органические полимеры обычно называют керогеном. Сам по себе кероген служит одним из основных резервуаров углерода Земли, но осознайте его размеры: он на четверть больше резервуара неорганического углерода, хранящегося в виде карбонатов на дне океанов и на континентах! Карбонаты и кероген вместе уже поглотили почти весь изначальный углекислый газ Земли, который когда-то был в атмосфере, и таким образом они помогают нашему климату не стать похожим на климат Венеры. Запасы керогена настолько огромны, что, когда лишь незначительная его часть попадает в подходящие условия температуры и давления, он вновь становится гигантским источником ископаемого топлива.

В конце концов, формы углерода и углеводорода в ископаемом топливе служат даже лучшим источником энергии, чем сахара, поскольку они лишены кислорода, и, следовательно, все их вещество может вступать в реакцию с кислородом. В некотором смысле ископаемые виды топлива представляют собой не только сбереженную солнечную энергию, захваченную благодаря фотосинтезу, но и геотермальную энергию, затраченную на восстановление сахаров до бескислородного состояния. Даже без учета докембрийской биомассы за сотни миллионов лет на Земле накопились триллионы тонн энергии, доступной для потребления. Наличие этого дешевого, концентрированного и транспортабельного источника накопленной энергии изменило человеческую цивилизацию и породило бесчисленное количество технологических и социальных достижений. Но

получается, что крайняя полезность этого ресурса вынуждает нас сжигать его поразительными темпами. За несколько десятилетий человечество израсходовало углерод, накопленный за миллионы и миллионы лет, и этот процесс стал оказывать влияние на климат и благоприятную для жизни окружающую среду, т. е. среду, пригодную для человека.



## 8. Человек и цивилизации

Эволюция человека началась через сотни миллионов лет после

возникновения многоклеточных организмов. Мне не удастся уделить в этой книге достойного внимания всем формам жизни, возникшим в промежутке между появлением многоклеточных и человека, в частности всеобщим любимцам динозаврам. Однако вкратце отмечу, что наши предки-млекопитающие жили еще во времена динозавров. Они были маленькими, похожими на грызунов существами и занимали экологические ниши, не занятые доминировавшими видами – динозаврами (например, ведя ночной образ жизни и обитая под землей). Примерно 65 млн лет назад, после падения астероида на полуостров Юкатан и вымирания динозавров, млекопитающие смогли занять больше ниш, выросли в размерах и стали значительно более разнообразными. Самое крупное млекопитающее, известное как индрикотерий или балухитерий («зверь из Белуджистана»), обитало более 20 млн лет назад в Центральной Азии. Это был древний безрогий родственник носорога, однако намного крупнее современных носорогов и с длинной шеей, напоминавший брахиозавра или нынешнего жирафа.

Некоторые более мелкие млекопитающие, которые жили в одно время с динозаврами, уже давно заняли особую нишу на деревьях, служивших убежищем от крупных животных. В кронах деревьев и навесах тропических лесов были уникальные источники питания – листья, фрукты и насекомые. Похожая на грызуна тупайя, вероятно, была общим предком всех приматов, которые впервые возникли примерно в то время, когда вымерли динозавры, а может, и раньше. Первые приматы отличались цепкими пальцами рук и ног, уникальным элементом скелета глазниц и склонностью к питанию фруктами. Типичные приматы эволюционировали и обитали в Африке, Восточной Азии, Северной и Южной Америке до тех пор, пока около 30 млн лет назад от хвостатых обезьян (бабуин, лемур, макака-резус и т. д.) не обособились обезьяны бесхвостые.

Среди бесхвостых обезьян около 18 млн лет назад разделились предки гоминид и более мелких обезьян (гиббоновые). От общего ствола в семействе гоминид сначала отделился род (род – надвидовой ранг группы организмов) орангутана, затем гориллы и, наконец, шимпанзе и человека, которые разделились около 7 млн лет назад. Этими четырьмя родами представлены ныне живущие человекообразные обезьяны, и в каждом из них, кроме человека, имеется два вида (например, род шимпанзе включает в себя два вида – обыкновенный шимпанзе и карликовый шимпанзе бонобо), из людей же остался только один вид – *Homo sapiens*, человек разумный, т. е. мы с вами.

Гоминиды или большие человекообразные обезьяны проводят гораздо

меньше времени на деревьях по сравнению с их предками. Как следует из названия, они крупнее и в целом разумнее, по крайней мере с нашей точки зрения. Отказ от древесного образа жизни позволил им высвободить руки и пальцы, в результате приматы обрели способность по-новому вести себя в окружающей среде (например, добывать пищу с помощью палки), что дало им эволюционные преимущества. Тем не менее ни один из этих гоминид не мог подняться на вершину пищевой цепи, это удалось только людям.

Благодаря чему же продолжалось эволюционное развитие и видообразование приматов в течение нескольких десятков миллионов лет? Напомним, что в последние 50 млн лет на Земле неуклонно холодает, но, несмотря на общую тенденцию к похолоданию, в промежутке от 30 млн до 15 млн лет назад произошло потепление, появились экваториальные леса в Африке и Азии – подходящая среда для обитателей деревьев. 15 млн лет назад тенденция к похолоданию и засухе возобновилась, что должно было уменьшить площади древесной среды обитания.

Движение литосферных плит также внесло свою лепту в изменение окружающей среды. Дрейф континентов привел к изменению направлений океанских течений и образованию Гималаев (вспомните главу 6), задав общую тенденцию к охлаждению протяженностью в 50 млн лет. Примерно 30 млн лет назад Африканский континент сблизился с Евразией, сузив расположенные между ними древние моря Тетис и Паратетис. Это привело к исчезновению прибрежных тропических экосистем и их смене засушливыми континентальными экосистемами. Тогда же начала открываться Восточно-Африканская рифтовая долина (и рифт Красного моря), что привело к подъему суши, так как более горячая кора и мантия всплывали на поверхность. Восточная Африка и ныне подвержена рифтогенезу (разрыву коры), что приведет к распаду континента и формированию нового моря через несколько десятков миллионов лет. Подъем суши мог стать причиной похолодания и засухи, однако на большей части Африканского рифта были разнообразные формы рельефа и окружающей среды – от рифтовых долин до конусных вулканов, вроде горы Килиманджаро, а значит, большое разнообразие экологических ниш.

В конце концов похолодание и изменение рельефа вызвало переход от тропических лесов к саваннам на большей части территории Африки – родины почти всех новых видов гоминид за последние 15 млн лет. Эти изменения вынудили наших предков слезть с деревьев на землю, где они могли использовать свои большие пальцы не только для того, чтобы цепляться за ветви. И хотя эти процессы происходили в Африке, исчезновение моря Тетис между Африкой и Евразией привело к появлению



сухопутных мостов и распространению африканских млекопитающих, включая гоминид, в Азии.

Расхождение предков шимпанзе и человека произошло около 7 млн лет назад. Это видно по ископаемым останкам старейшего из известных наших предков – чадского сахелантропа, найденного в Республике Чад (Африка). Отделение людей или рода Номо (человек является единственным сохранившимся видом этого рода) было ознаменовано устойчивым прямохождением, т. е. хождением на двух ногах. Другие гоминиды тоже могут ходить на двух ногах, но не делают этого постоянно. Стоять на двух ногах на самом деле довольно странно, это неустойчивое положение: без постоянного поддержания баланса с помощью пальцев ног и ступней мы упали бы. Четвероногие гораздо устойчивее нас. Да и бег на двух ногах обычно медленнее бега на четырех, при котором весь торс в дополнение к ногам может участвовать в большом шаге. В чем же тогда преимущество ходьбы на двух ногах?

Есть множество гипотез о переходе к прямохождению. Во-первых, возможность нести пищу не только во рту, но и в руках – это явное эволюционное преимущество. На первый взгляд кажется преимуществом и возможность стоя доставать плоды и листья с ветвей, но, если обезьяны не научились лазать по деревьям, это преимущество не играет никакой роли. Стойка на двух ногах обеспечивает лучший обзор, позволяя заметить хищников и добычу (обезьян, у которых не было острых когтей и клыков, хищники, вероятно, беспокоили больше), причем делать это можно не только стоя неподвижно (так поступают медведи и сурикаты), но и на ходу – и это еще одно преимущество двуногих. Наконец, встав на ноги, гоминиды выглядели крупнее, а это дает преимущества в самозащите, при установлении господства в иерархии стаи и при спаривании, поэтому различные животные, в том числе и наши двоюродные братья-гориллы, в нужный момент поднимаются на ноги.

Вертикальное положение тела способствует терморегуляции. Нам проще охладиться во время бега, чем четвероногим, потому что увеличивается воздействие воздуха, который помогает поту испариться и отвести тепло. Даже стоя мы больше открыты ветрам, которые тем слабее, чем ближе к земле. Способ, с помощью которого люди охлаждаются, довольно необычный, хотя другие приматы (а также лошади) тоже выделяют пот для терморегуляции. Потая, мы выделяем воду, она испаряется, а энергия, забираемая в результате превращения жидкости в газ, огромна, поэтому потоотделение эффективно. К примеру, собаки и кошки регулируют теплообмен с атмосферой, вдыхая более прохладный

воздух и выдыхая нагретый. Однако воздух не может нести столько тепла, сколько водяной пар, и это одна из причин, почему кошки и в меньшей степени собаки в беге на длинные дистанции не могут соревноваться с людьми и тем более с лошадьми. У современных людей пот более водянистый, он легче испаряется с голой кожи, чем содержащий жир пот других млекопитающих. Это может быть одной из причин, по которой мы утратили волосяной покров наших предков, – чтобы адаптироваться к более жаркому климату. Тем не менее пот лучше всего выделяется в теплом и сухом климате. Если воздух горячий и насыщенный влагой, пот не покинет кожу, не испарится (так как насыщенный водой воздух не может принять еще больше водяного пара), поэтому люди не слишком хорошо чувствуют себя в зонах повышенной влажности (многие из нас предпочитают сухой теплый климат влажному теплему). Может показаться, что я застрял на теме потоотделения, но этот древний физиологический механизм наглядно показывает, что люди являются существами ледникового периода. 50 млн (и даже 30 млн) лет назад, когда на Земле царил влажный тропический климат и земной шар был полностью свободен ото льда и снега, наша терморегуляция работала бы плохо, она подходит для холодного и сухого климата. Если человеческая деятельность приведет к восстановлению глобального тропического климата, это будет не слишком хорошо для нас, с нашей зависимостью от потоотделения. Это может показаться малозначащей проблемой по сравнению, скажем, с инфекционными заболеваниями (которые также могут распространиться вместе с глобальным потеплением), но на самом деле из всех погодных катаклизмов на Земле главный убийца – жара, а не ураганы и не разрушительные смерчи.

По какой бы причине ни возникло прямохождение, оно освободило нашим предкам руки, в которых они могли держать орудия, чтобы изменять окружающую среду, защищаться от хищников и добывать пищу, охотясь или раскапывая землю. Свободные руки дают эволюционное преимущество. Около 2,5 млн лет назад произошло значительное увеличение объема человеческого мозга. Есть гипотеза, что мозг стал больше в результате мутации, которая ослабила мощные челюстные мышцы, прикрепленные к большому сагиттальному гребню в верхней части черепа у большинства человекообразных обезьян; это позволило черепу развиваться до большего размера. Примерно тогда же обладатель большего, чем у предшественников, мозга *Homo habilis*, человек умелый, начал использовать каменные орудия. Это был огромный технологический шаг вперед на охоте и при раскапывании земли, а когда каменными

орудиями резали и измельчали пищу, это компенсировало слабость челюстей.

Использование огня человеком прямоходящим, *Homo erectus*, могло начаться около 2 млн лет назад, хотя ископаемые доказательства – пепел костров и обгоревшие кости в Африке и Евразии – позволяют достоверно говорить о том, что освоение огня происходило на протяжении последнего миллиона лет. Приручение огня было огромным технологическим прорывом. Во-первых, люди теперь могли носить с собой источник тепла и расселяться в более холодных регионах. Во-вторых, они могли готовить на огне пищу, благодаря чему стало гораздо проще употреблять многие волокнистые белки и жесткие молекулы растительной целлюлозы, которые трудно разжевать и переварить. Огонь убивает микробов и паразитов в продуктах. Приготовление пищи на огне предоставило эволюционное преимущество благодаря естественному отбору. Те из древних людей, которые предпочитали сырое мясо, быстрее гибли от болезней либо из-за того, что не могли съесть достаточное количество пищи. В результате их гены были утрачены человечеством. И конечно же, огонь является предвестником гораздо более поздних технологических достижений, таких как выжигание пахотных земель, изготовление керамики, кузнечное дело и, наконец, источники энергии для машин.

Приручение огня, пожалуй, стало последним крупным технологическим прорывом – вплоть до подъема сельского хозяйства, произошедшего сотни тысяч лет спустя. Тогда на Земле помимо *Homo erectus*, исчезнувшего по крайней мере 50 000 лет назад (а возможно, и раньше), жили появившиеся примерно 200 000 лет назад неандертальцы и *Homo sapiens*, люди разумные (т. е. современный человек, такой же, как мы с вами). Неандертальцы, использовавшие огонь для выживания в более холодном климате, успели расселиться в основном по Европе и Западной Азии, но около 30 000 лет назад или раньше они вымерли. Возможно, неандертальцы и человек прямоходящий исчезли из-за конкуренции с человеком разумным, а возможно, были ассимилированы им (современные люди унаследовали небольшую часть генов неандертальцев). Примерно в то же время от рук людей вымерло множество других гигантских млекопитающих – и мы по-прежнему преуспеваем в этом деле. Такие технологические достижения, как применение орудий труда и использование огня, стали уникальным эволюционным шагом – они позволили приспособиться к меняющимся условиям окружающей среды без существенных эволюционных изменений в физиологии человека путем естественного отбора. (Конечно, естественный отбор по-прежнему

действует, но в менее явном виде: благодаря этому механизму, к примеру, в коже изменяется уровень выработки меланина – темного пигмента – в зависимости от степени воздействия солнца.) Огонь позволил человеку распространить свой ареал на более суровые климатические зоны, не обзаводясь пышным мехом или способностью накапливать гораздо большее количество жира. В какой-то степени благодаря этим технологическим достижениям люди впервые сумели «обойти» естественный отбор. Хотя настоящие успехи здесь принесло возникновение современной медицины.

На фоне тенденции к похолоданию климата в последние 15 млн лет чередовались более короткие ледниковые и межледниковые (более теплые) периоды. Последний длинный ледниковый период, плейстоцен, начался примерно 2,6 млн лет назад и завершился приблизительно 12 000 лет назад, хотя и во время плейстоцена были межледниковья по несколько тысяч лет. В плейстоцене северные ледники простирались далеко на юг Северной Америки и Евразии – в частности, до штата Нью-Йорк. В ту эпоху человек прямоходящий, неандертальцы и человек разумный какое-то время существовали одновременно, используя для выживания доступные им технологии. Из-за скопления ледовых покровов на суше уровень моря также был ниже, что позволяло людям перебираться с континента на континент – в Северную Америку по Берингову перешейку или на Британские острова из континентальной Европы. К концу ледникового периода выжил и расселился по большинству континентов только человек разумный.

Потепление, начавшееся примерно 12 000 лет назад и достигшее своего пика примерно 5000 лет спустя, совпало с подъемом сельского хозяйства. Более теплый климат создает лучшие условия для роста растений не только из-за более высоких температур, но и за счет усиления гидрологического (испарение и осадки) цикла, который обеспечивает поступление свежей воды, а также круговорот и доступность химических элементов, входящих в строительные блоки жизни. К тому времени, когда климат стал более теплым, люди уже владели основными технологиями одомашнивания растений и животных, освоили приемы растениеводства и хранения пищи. Например, огонь, который был приручен в условиях холода, можно было использовать для выжигания леса и выращивания урожая на новых участках. Острые каменные орудия подходили для обрабатывания почвы. (Металлы начали обрабатывать только в бронзовом веке, около 5000 лет назад.) Основными культурами для большинства древних обществ были зерновые: разные виды пшеницы, впервые

одомашненной на Ближнем Востоке, рис в Восточной Азии, маис (кукуруза) в Северной и Южной Америке. Оседлые земледельческие общества были заинтересованы в расширении земель, поскольку рост населения в них не был ограничен, как у охотников-собирателей и скотоводов, кочевой образ жизни которых не давал возможности прокормить большие сообщества. Сельское хозяйство способствовало развитию территориализма и, следовательно, военной защите территорий. Легко понять, что дисбаланс между сообществами земледельцев и охотников-собирателей, возможные столкновения из-за территорий не могли закончиться хорошо для охотников-собирателей.

Развитие сельского хозяйства могло стать причиной древнего антропогенного воздействия на климат (гипотеза, выдвинутая геологом и палеоклиматологом Уильямом Раддиманом). И началось это воздействие задолго до того, как человек начал сжигать ископаемое топливо. При вырубке и выжигании лесов для освобождения места под посевы (для чего с учетом примитивных технологий, видимо, требовались большие площади на душу населения, чем сегодня) в атмосферу выделялся углекислый газ, который не поглощался в полном объеме редкими полями зерновых культур. Даже выращивание риса в Азии, которое достигло пика около 7000 лет назад, могло привести к увеличению выбросов сильного парникового газа метана (рисовые поля – это болота, а болотный газ в основном состоит из метана). Потепление в период между 12 000 и 8000 лет назад должно было быть коротким межледниковым периодом, после чего Земля вступила бы в очередной ледниковый период. Однако выброс сельскохозяйственных парниковых газов отложил наступление похолодания на тысячи лет, а сжигание ископаемого топлива во время индустриальной эпохи продолжило эту тенденцию с удвоенной силой.

Сельскохозяйственные общества доминировали, в них возникали иерархии работников, включая ремесленников, и правителей. Потребность в расширении инфраструктуры и организации управления и защиты ресурсов (от ирригации и контроля источников воды до зернохранилищ) вела к появлению военно-политических структур. Для ведения счетов, коммуникации и торговли требовалась письменность. Устная и письменная фиксация исторических событий и технических знаний могла обеспечить эволюционное преимущество, ведь это была информация, которая, выходя за рамки жизни одного человека, помогала избежать ошибок, сделанных предыдущими поколениями, например во время голода или наводнения. Вкупе все эти события привели к возникновению цивилизации и письменной истории, то и другое, вероятно, появилось 7000 лет назад в

Шумере на юге Месопотамии (территория современного Ирака).

Климатическим событием, которое могло вызвать подъем цивилизации Междуречья и переселение представителей различных культур в Западную и Центральную Евразию, было затопление Черного моря, произошедшее также около 7000 лет назад. Таяние Евразийского ледового щита в конце плейстоцена, вероятно, способствовало заполнению Средиземного моря, а потепление вызывало медленное испарение Черного моря. Его воды были пресными, а на побережье жило большое количество людей разных культур. Уровень Черного моря был ниже уровня Средиземного моря на 140 м, и впоследствии за счет этой разницы на месте Босфора образовался канал. Через него средиземноморские воды стали поступать в Черное море, делая его соленым. Для полного затопления потребовалось бы около трех лет, но берега Черного моря были пологими, и вода затопляла их относительно быстро – спасти сельскохозяйственные угодья было бесполезно. Это могло вытеснить с привычных мест причерноморские общества, которые стали расселяться во всех направлениях – от Ближнего Востока до Центральной Азии и Западной Европы. Так индоевропейцы, семитские племена и даже представители убейдской культуры оказались в Месопотамии, где затем возникли первые шумерские поселения. Опыт этого катастрофического наводнения пережили различные народы, и это объясняет широкое распространение легенд о потопе, описанном в Библии, в сказании об Утнапиштиме (Зиусудре) в эпосе о Гильгамеше, в греческом мифе о Девкалионе.

Не могу не изложить одну захватывающую и спорную идею, которая особенно интересна геофизику – автору сей книги. Эту идею отстаивает Джаред Даймонд, и лучше всего она изложена в его знаменитой книге «Ружья, микробы и сталь». Даймонд задается вопросом, почему колониальная экспансия в современной истории была односторонней. Европейцы колонизировали другие континенты и покорили или уничтожили (зачастую занеся болезни) другие культуры по всему земному шару. Согласно гипотезе Даймонда, все дело в расположении континентов. (Разве я могу противиться идее о том, что тектоника плит, помимо всего остального, приводила в движение еще и колесо земной истории?)

К тому времени, когда люди распространились более или менее повсеместно, главную роль в различиях культур на каждом континенте, согласно теории Даймонда, стали играть не различия между людьми, а положение материков. Культуры Евразии – от Восточной Азии до Европы – имели обширную территорию, по которой они могли распространиться на восток или запад, оставаясь примерно в тех же климатических зонах.

Расселение в пределах одной климатической зоны облегчает перемещение не только людей, но и выращиваемых растений и домашних животных, ведь благоприятные для них условия сохраняются. Однако такое расселение возможно только по достаточно большой территории, где различия зон и их микроклимата будут небольшими. Климатическая зона должна быть более или менее одинакова на протяжении сотен и тысяч, а не десятков километров, в пределах которых горная пустыня может смениться влажной речной долиной.

Тектоническое строение и ландшафты Евразии обеспечивают ее жителям гораздо больше территории для расселения и диверсификации сельскохозяйственных популяций и их технологий. Почти все остальные континенты ориентированы с севера на юг, что ограничивало миграцию на восток или запад вдоль одной климатической зоны, а движение на север или юг «выдергивало» бы сельскохозяйственные культуры и скот из привычной им среды. Это ограничивало расширение сельскохозяйственного производства, в таких условиях более выгодными могли быть охота и собирательство.

Обширная экспансия людей в Евразии позволила приручить больше видов животных, чем на других континентах, а это привело к выработке иммунитета к большему количеству разных заболеваний. Когда представители евразийских культур вышли за пределы своего континента, они несли с собой не только оружие и военные технологии, созданные за столетия территориальной экспансии, но и заболевания, от которых у людей на других континентах не было защиты и иммунитета. Вот почему малочисленные экспедиции европейцев смогли победить целые империи: испанец Франсиско Писарро завоевал государство инков в Перу, имея в «авангарде» пандемию натуральной оспы, занесенной испанскими поселенцами на Карибские острова.

Я не собираюсь говорить о последних 7000 лет истории человечества – они описаны подробно. Стоит отметить, что эти 7000 лет, о которых так много написано, составляют лишь половину одной миллионной периода, охваченного в этой книге и длящегося 14 млрд лет. Напомню аналогию, которую я привел в самом начале моего обзора: если бы история Вселенной была ускорена так, чтобы вы смогли просмотреть ее за одни сутки, то история человека заняла бы 0,04 секунды – мгновение, необходимое, чтобы моргнуть. А если бы мы распределили слова в этой книге пропорционально продолжительности времени, описанному в каждой главе, то история человечества уместилась бы в последний знак препинания.

Но за этот невероятно короткий промежуток времени стремительный

прогресс человека и его беспрецедентная способность изменять окружающую среду привели к тому, что он стал сильнее любого хищника, если не брать в расчет форму жизни, которая процветает на Земле почти 4 млрд лет, – бактерии. Не встречая серьезного конкурента, вид *Homo sapiens* распространился по планете, а ее население выросло даже быстрее, чем по экспоненте. В течение последних двух столетий мы научились использовать ископаемые источники энергии, которые были скрыты под поверхностью Земли сотни миллионов лет. Огромное количество дешевой энергии позволило осуществить резкий технологический скачок, плоды которого человечество (некоторые части больше, некоторые меньше) пожинает сегодня: транспорт, глобальная связь, производство продуктов питания, медицина.

Отрицательные стороны этого обилия дешевой энергии (ущерб окружающей среде и необычное изменение климата), по-видимому, все еще не так значительны, чтобы перевесить огромные достоинства и потенциал, и все может идти по-прежнему еще какое-то время, прежде чем мы изменим наши привычки. В то же время технологии и медицина (особенно в развитых странах) защитили нас от работавшего миллиарды лет естественного отбора. Это означает, что, если дела пойдут хуже и мы исчерпаем ресурсы для поддержки этой защиты, огромное количество нашего возросшего населения станет настоящим раем для микробов, которые терпеливо ждали своего часа (прошу прощения за такую прямолинейность в стиле Курта Воннегута). Но расточительное использование ресурсов – это в основном то, что лучше всего делают организмы, не имеющие конкурентов. Бактерии в чашке Петри потребляют пищу и энергию, пока не поглотят все и не погибнут, – вот и все.

Мне бы хотелось думать, что мы отличаемся от бактерий в чашке Петри. Из всего созданного людьми, хорошего и плохого, выделяется то, что мы разработали способы накопления знаний, на базе которых мы можем получить еще больше знаний. Обладая языком, историей и наукой, мы стали первыми организмами на нашей планете (а может, и вообще везде), которые могут сделать обоснованное предположение о том, что произойдет дальше, за пределами нашего собственного ближайшего будущего. У нас есть способность и потенциал действовать превентивно, а не «по факту» или, что еще хуже, когда уже слишком поздно. Вскоре, при жизни этого или следующего поколения, мы узнаем, способны ли использовать все наши знания для выживания грядущих поколений. Если мы это сделаем, это будет уникальное событие в истории жизни, а возможно, и всей Вселенной.



Для дополнительного чтения

Как я уже упоминал в предисловии, уникальность этой книги – в ее краткости и, возможно, в позиции автора. Существуют более объемные работы, которые, пусть и не полностью, но более подробно описывают темы, изложенные на этих страницах. Вот три замечательные книги, с которыми вы можете продолжить изучение затронутых мной тем:

Jastrow, Robert, and Michael Rampino. *Origins of Life in the Universe*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.

Langmuir, Charles H., and Wally Broecker. *How to Build a Habitable Planet*. Rev. and expanded ed. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2012.

MacDougall, J. D. *A Short History of Planet Earth: Mountains, Mammals, Fire and Ice*. Hoboken, NJ: Wiley & Sons, 1998.

Читатели (особенно мои коллеги-ученые) могут заметить, что я не привожу все возможные источники информации и открытий, в противном случае список ссылок будет больше, чем сама книга (и мне пришлось бы изменить ее название, а моему издателю оно по какой-то причине нравится). Информацию о наиболее известных темах и исторических личностях, упомянутых в книге, легко найти в специальных и научно-популярных изданиях. Для расширения общих знаний я предлагаю свой список книг. Чтобы познакомить читателей с новыми и наиболее сложными темами и результатами исследований, я постарался выделить оригинальных авторов и привести более специализированную литературу (также представленную ниже). Таким образом, для каждой главы я привожу и список литературы для общего чтения, и специальную литературу.

#### 1. Вселенная и галактики

##### Общая литература

Peebles, P. J. E., D. N. Schramm, E. L. Turner, and R. G. Kron. "Evolution of the Universe." *Scientific American*, October 1994, 50–57.

Singh, Simon. *The Big Bang: The Origin of the Universe*. New York: HarperCollins, 2005.

Trefil, James. *The Moment of Creation*. New York: Macmillan, 1983.

Turner, Michael. "Origin of the Universe." *Scientific American*, September 2009, 36–43.

##### Специальная литература

Bromm, Volker, and Naoki Yoshida. "The First Galaxies." *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 49 (2011): 373–407.

Frieman, J. A., M. S. Turner, and D. Huterer. "Dark Energy and the Accelerating Universe." *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 46 (2008): 385–432.

Greene, Brian. "How the Higgs Boson Was Found." *Smithsonian Magazine*, July 2013.

<http://www.smithsonianmag.com/science-nature/how-the-higgs-boson-was-1>

Guth, A. H., and P. J. Steinhardt. "The Inflationary Universe." *Scientific American*, May 1984, 116–28.

Spergel, David N. "The Dark Side of Cosmology: Dark Matter and Dark Energy." *Science* 347, no. 6226 (2015): 1100–1102.

2. Звезды и элементы

Общая литература

Kirshner, Robert P. "The Earth's Elements." *Scientific American*, October 19, 1994, 58–65.

Lang, Kenneth R. *The Life and Death of Stars*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

Young, Erick T. "Cloudy with a Chance of Stars." *Scientific American*, February 21, 2010, 34–41

Специальная литература

Kaufmann, William J., III. *Black Holes and Warped Spacetime*. New York: W. H. Freeman, 1979.

Truran, J. W. "Nucleosynthesis." *Annual Review of Nuclear and Particle Science* 34, no. 1 (1984): 53–97.

3. Солнечная система и планеты

Общая литература

Elkins-Tanton, Linda T. *The Solar System*. 6 vols. New York: Facts on File, 2010.

Lin, Douglas N. C. "Genesis of Planets." *Scientific American*, May 2008, 50–59.

Lissauer, Jack J. "Planet Formation." *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 31 (1993): 129–74.

Wetherill, George. "Formation of the Earth." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 18 (1990): 205–56.

Специальная литература

Armitage, Phillip J. *Astrophysics of Planet Formation*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

Canup, Robin M. "Dynamics of Lunar Formation." *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 42 (2004): 441–75. doi: 10.1146/annurev.astro.41.082201.113457.

Chiang, E., and A. N. Youdin. "Forming Planetesimals in Solar and Extrasolar Nebulae." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 38 (2008): 493–522.

Gomes, R., H. F. Levison, K. Tsiganis, and A. Morbidelli. "Origin of the Cataclysmic

Late Heavy Bombardment Period of the Terrestrial Planets." *Nature* 435 (2005): 466–69.

Levison, H. F., A. Morbidelli, R. Gomes, and D. Backman. "Planet Migration in Planetesimal Disks." In *Protostars and Planets V*, ed. B. Reipurth, D. Jewitt, and K. Keil, 669–84. Tucson: University of Arizona Press, 2007

4. Континенты и строение Земли

Общая литература

Brown, G. C., and A. E. Mussett. *The Inaccessible Earth*. London: Chapman & Hall, 1993.

Condie, Kent C. *Plate Tectonics and Crustal Evolution*. Oxford: Pergamon, 1993. "Our Ever Changing Earth." Special issue, *Scientific American* 15, no. 2 (2005).

Schubert, G., D. Turcotte, and P. Olson. *Mantle Convection in the Earth and Planets*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

Stevenson, D. J., ed. *Treatise on Geophysics*. Vol. 9 of *Evolution of the Earth*, 2nd ed., ed. G. Schubert. New York: Elsevier, 2015.

Vogel, Showna. *Naked Earth: The New Geophysics*. New York: Plume, 1996.

Специальная литература

Bercovici, D. "Mantle Convection." In *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, ed. H. K. Gupta, 832–851. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2011.

Elkins-Tanton, L. T. "Magma Oceans in the Inner Solar System." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 40 (2012): 113–39.

England, P., P. Molnar, and F. Richter. "John Perry's Neglected Critique of Kelvin's Age for the Earth: A Missed Opportunity in Geodynamics." *GSA Today* 17, no. 1 (2007): 4–9.

Glatzmaier, Gary A., and Peter Olson. "Probing the Geodynamo." *Scientific American*, April 2005, 50–57.

Stacey, F. D. "Kelvin's Age of the Earth Paradox Revisited." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 105, no. B6 (2000): 13155–58.

5. Океаны и атмосфера

Общая литература

Allègre, Claude J., and Stephen H. Schneider. "The Evolution of the Earth." *Scientific American*, October 1994, 66–75.

Holland, H. D. *The Chemical Evolution of the Atmosphere and Oceans*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1984.

Kasting, J. F. "The Origins of Water on Earth." In *"New Light on the Solar*

System," special issue, *Scientific American* 13, no. 3 (2003): 28–33.

Специальная литература

Elkins-Tanton, L. T. "Formation of Early Water Oceans on Rocky Planets." *Astrophysics and Space Science* 302, no. 2 (2011): 359. doi: 10.1007/s10509-010-0535-3.

Valley, John W. "A Cool Early Earth?" *Scientific American*, October 2005, 58–65.

6. Климат и пригодность для жизни

Общая литература

Bender, Michael L. *Paleoclimate*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2013.

Falkowski, P., R. J. Scholes, E. Boyle, J. Canadell, D. Canfield, J. Elser, N. Gruber, K. Hibbard, P. Höglberg, S. Linder, F. T. Mackenzie, B. Moore III, T. Pedersen, Y. Rosenthal, S. Seitzinger, V. Smetacek, and W. Steffen. "The Global Carbon Cycle: A Test of Our Knowledge of Earth as a System." *Science* 290 (2000): 291–96.

Gonzalez, G., D. Brownlee, and P. D. Ward. "Refuges for Life in a Hostile Universe." *Scientific American*, October 2001, 60–67.

Kasting, J. F., and D. Catling. "Evolution of a Habitable Planet." *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 41 (2003): 429–63.

Ward, P. D., and D. Brownlee. *Rare Earth: Why Complex Life Is Uncommon in the Universe*. New York: Copernicus (Springer-Verlag), 2000.

Специальная литература

Berner, Robert A. *The Phanerozoic Carbon Cycle*. Oxford: Oxford University Press, 2004.

Berner, R. A., A. C. Lasaga, and R. M. Garrels. "The Carbonate-Silicate Geochemical Cycle and Its Effect on Atmospheric Carbon Dioxide over the Past 100 Million Years." *American Journal of Science* 283, no. 7 (1983): 641–83.

Hoffman, Paul F., and Daniel P. Schrag. "Snowball Earth." *Scientific American*, January 2000, 68–75.

Huybers, P., and C. Langmuir. "Feedback Between Deglaciation, Volcanism, and Atmospheric CO<sub>2</sub>." *Earth and Planetary Science Letters* 286, nos. 3–4 (2009): 479–91.

Raymo, M. E., and W. F. Ruddiman. "Tectonic Forcing of Late Cenozoic Climate." *Nature* 359, no. 6391 (1992): 117–22.

Walker, J., P. Hayes, and J. Kasting. "A Negative Feedback Mechanism for the Long-Term Stabilization of Earth's Surface Temperature." *Journal of Geophysical Research* 86 (1981): 9776–82.

7. Жизнь

#### Общая литература

Clark, W. R. *Sex and the Origins of Death*. Oxford: Oxford University Press, 1996.

Hazen, R. M. *The Story of Earth*. New York: Viking, 2012.

Lane, N. *Life Ascending: The Ten Great Inventions of Evolution*. New York: Norton, 2009.

Orgel, L. "The Origin of Life on the Earth." *Scientific American*, October 1994, 76–83.

Ricardo, A., and J. W. Szostak. "Origin of Life on Earth." *Scientific American*, September 2009, 54–61.

Ward, P. D., and D. Brownlee. *Rare Earth: Why Complex Life Is Uncommon in the Universe*. New York: Copernicus (Springer-Verlag), 2000.

#### Специальная литература

Corliss, J. B., J. Dymond, L. I. Gordon, J. M. Edmond, R. P. von Herzen, R. D. Ballard, K. Green, D. Williams, A. Bainbridge, K. Crane, and T. H. van An-del. "Submarine Thermal Springs on the Galápagos Rift." *Science* 203, no. 4385 (1979): 1073–83.

Doolittle, W. F. "Uprooting the Tree of Life." *Scientific American*, February 2000, 90–95.

Falkowski, P., R. J. Scholes, E. Boyle, J. Canadell, D. Canfield, J. Elser, N. Gruber, K. Hibbard, P. Högberg, S. Linder, F. T. Mackenzie, B. Moore III, T. Pedersen, Y. Rosenthal, S. Seitzinger, V. Smetacek, and W. Steffen. "The Global Carbon Cycle: A Test of Our Knowledge of Earth as a System." *Science* 290 (2000): 291–96.

Mansy, S. S., J. P. Schrum, M. Krishnamurthy, S. Tobe, D. A. Treco, and J. W. Szostak. "Template-Directed Synthesis of a Genetic Polymer in a Model Proto-cell." *Nature* 454, no. 7200 (2008): 122–25.

Patel, B. H., C. Percivalle, D. J. Ritson, C. D. Duffy, and J. D. Sutherland. "Common Origins of RNA, Protein and Lipid Precursors in a Cyanosulfidic Protometabolism." *Nature Chemistry* 7, no. 4 (2015): 301–7.

Powner, M. W., B. Gerland, and J. D. Sutherland. "Synthesis of Activated Pyrimidine Ribonucleotides in Prebiotically Plausible Conditions." *Nature* 459, no. 7244 (2009): 239–42.

#### 8. Человек и цивилизации

##### Общая литература

Behrensmeyer, K. "The Geological Context of Human Evolution." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 10 (1982): 39–60.

Jurmain, R., L. Kilgore, W. Trevathan, and R. L. Ciochon. *Introduction to Physical Anthropology*. 14th ed. Belmont, CA: Wadsworth, 2013.

Silcox, M. T. "Primate Origins and the Plesiadapiforms." *Nature Education Knowledge* 5, no. 3 (2014): 1–6.

Tattersall, I. "Once We Were Not Alone." *Scientific American*, January 2000, 56–62.

Wong, K. "An Ancestor to Call Our Own." In special issue on evolution, *Scientific American*, April 2006, 49–56.

Специальная литература

Behrensmeyer, K. "Climate Change and Human Evolution." *Science* 311 (2006), 476.

deMenocal, P. B. "Climate Shocks." *Scientific American*, September 2014, 48–53.

Diamond, J. *Guns, Germs and Steel*. New York: Norton, 1999.

Fagan, B. *The Long Summer: How Climate Changed Civilization*. New York: Basic Books (Perseus), 2004.

Jablonski, Nina G. "The Naked Truth." *Scientific American*, February 2010, 42–49.

Ruddiman, W. F. "How Did Humans First Alter Global Climate?" *Scientific American*, March 2005, 46–53.

Ryan, W., and W. Pitman. *Noah's Flood: The New Scientific Discoveries about the Event That Changed History*. New York: Simon & Schuster, 2000.

Sherwood, S. C., and M. Huber. "An Adaptability Limit to Climate Change Due to Heat Stress." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, no. 21 (2010): 9552–55.

Stedman, H. H., B. W. Kozyak, A. Nelson, D. M. Thesier, L. T. Su, D. W. Low, C. R. Bridges, J. B. Shrager, N. Minugh-Purvis, and M. A. Mitchel. "Myosin Gene Mutation Correlates with Anatomical Changes in the Human Lineage." *Nature* 428, no. 6981 (2004): 415–18.

Wood, B. "Welcome to the Family." *Scientific American*, September 2014, 43–47.

Благодарности

Эта книга не появилась бы, если бы не группа студентов Йельского университета, которые в 2008 г. убедили меня (вопреки моему здравому смыслу) прочитать курс «обо всем понемногу», и не их многочисленные преемники, которые претерпели последствия этой затеи. Не буду называть их всех. Вы сами себя знаете. Правда, спасибо вам. Это было очень здорово, и я, безусловно, узнал много нового (даже если вы – нет).

Я многим обязан моим друзьям и коллегам: наши многолетние научные дискуссии, безусловно, возбудили во мне любопытство к темам, затронутым в этой книге. Особую признательность я должен выразить

небольшой группе моих коллег, которые написали рецензию на эту книгу, официально или неофициально. Питер Дрисколл и Кортни Уоррен любезно предоставили мне обширные рецензии, многочисленные замечания и, прежде всего, познакомили меня с мнениями специалистов, области интересов которых находятся вне зоны моей научной компетенции – от астрономии до биологии и антропологии. Мой старый друг, доктор наук Джерри Шуберт, дал мне некоторые советы, любезно прочитав несколько глав, и не только похвалил меня, но и оставил свойственные ему откровенные комментарии (чем напомнил мне годы обучения в магистратуре). Полезные замечания сделал и анонимный рецензент. Но особенно я обязан Норману Слипу, который предоставил подробнейшую рецензию в два этапа. Я был взволнован его участием, ведь Норман – это ходячая энциклопедия, один из самых ярких и прозорливых умов из тех, что я знаю.

Также должен сказать большое спасибо (и принести извинения за приступы плохого настроения) моему редактору Джо Каламие, чьи научные познания, энтузиазм, терпение и неизменное чувство юмора позволили мне довести дело до конца.

С особым трепетом я хотел бы поблагодарить моих дочерей Сару и Ханну, и не только за энтузиазм по поводу книги, но и за их подробные отзывы. Они обе ученые, как и я (бывает и такое), и мне пригодился их опыт, а они наконец-то расквитались со мной за язвительную и безжалостную критику их работ на протяжении долгих лет. Ничто так не вдохновляет на откровенность, как месть (особенно если потом можно отлично посмеяться).

И наконец, я благодарю свою прекрасную жену Джули (кто бы мог подумать – она тоже ученая!) за то, что она много раз перечитала эту рукопись, за ее поддержку и, прежде всего, за ее бесконечное терпение и вообще за все. Еще раз скажу: *Sine te non sum* .