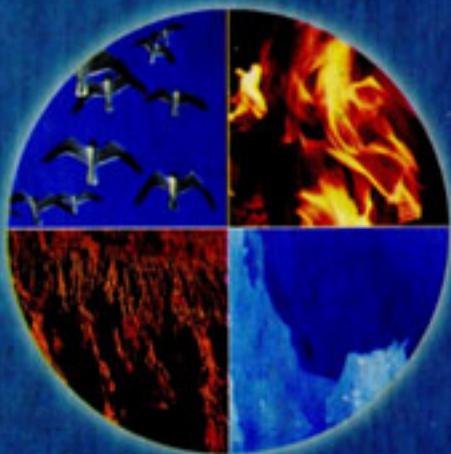


ДЖ. Д.
МАКДУГАЛЛ

Краткая история
планеты Земля

горы, животные, огонь и лед



АМФОРА
э а р и к а !

ДЖ. Д. МАКДУГАЛЛ

**Краткая история
планеты Земля**

горы, животные, огонь и лед



**Санкт-Петербург
АМФРА
2001**

УДК 82/89
ББК 84.7 США
М 15

J. D. Macdougall
A SHORT HISTORY OF PLANET EARTH
mountains, mammals, fire and ice

Перевод с английского В. П. Псарёва

*Печатается с разрешения агентства The Balkin Agency
и Synopsis Literary Agency*

Макдугалл Дж. Д.

М 15 Краткая история планеты Земля: горы, животные, огонь и лед / Пер. с англ. В. Псарёва. — СПб.: Амфора, 2001. — 383 с.

ISBN 5-94278-136-2

ISBN 5-94278-136-2

© J. D. Macdougall, 1996
© В. Псарёв, перевод, 2000
© «Амфора», оформление, 2001

БЛАГОДАРНОСТИ

Эта книга обязана своим появлением многим людям. Особенно я благодарен моим коллегам — сотрудникам, студентам и друзьям, бывшим и нынешним — по Институту океанографии Скриппса, от которых за долгие годы совместной работы я многое узнал. Их присутствие создает в Институте ту атмосферу, в которой наука и учеба идут рука об руку каждый день. Я уверен, что без этого окружения я не смог бы ни приступить к написанию этой книги, ни сохранить мой энтузиазм по отношению к этой работе.

Дома Шейле Макдугалл пришлось вытерпеть немало скучных вечеров и уик-эндов, и без особых жалоб, за что я ей навсегда благодарен. Кристоферу и Кáтерин пришлось на время стать подопытными кроликами, читая и выслушивая мои черновики; все же я услышал от них, что книгу можно читать, и даже кое-что понятно для неспециалиста, и что от нее не сразу клонит в сон.

Ал Левинсон, неизменно поощряя меня, прочел несколько частей рукописи и внес много ценных предложений. Рик Болкин оказал мне большую помощь и не раз поддерживал меня на протяжении всей работы, за что я ему очень благодарен. Гай Тэппер нарисовал или репродуцировал все иллюстрации весьма профессионально и за короткое время, чем внес большой вклад в эту книгу. В издательстве «Уайли» Эмили Луз с энтузиазмом поддержала этот проект, преодолела всяческие барьеры и обеспечила своевременный выход книги. Всем вам — моя благодарность.

Глава 1

КАК ЧИТАЮТ КАМНИ?

В середине семнадцатого века Джеймс Ашер, весьма уважаемый ученый и прелат Англиканской церкви, широко известный в Ирландии и Англии, вычислил, что Земля была сотворена в 4004 году до нашей эры. Он пришел к этому заключению, тщательно изучив и дословно истолковав хронологию родословных Ветхого Завета. Следуя освященной временем традиции таких исследований, другие ученые его времени, — не утруждая себя поиском иных методов определения возраста Земли, — проверили расчеты Ашера. Они признали, что он правильно определил год, но можно было добиться куда большей точности: оказывается, Земля была сотворена в 9 часов пополудни 26 октября 4004 года до н. э.!

До сих пор геологические факультеты некоторых университетов в знак иронического уважения к Ашеру отмечают 26 октября день рождения Земли. Однако на самом деле Земля в миллион раз старше, чем вычислил достопочтенный Ашер. Ее истинный возраст равен четырем с половиной миллиардам лет. Ученые же начали осознавать всю безмерность геологического времени, когда после опубликования трудов Ашера минуло более столетия.

Таким образом, по человеческим меркам наша планета невероятно стара: четыре с половиной миллиарда лет — это такой отрезок времени, по сравнению с которым вся история человечества — лишь краткий миг. Геологические временны́е шкалы столь обширны, что только по

аналогии можно получить некоторое слабое представление о бездне времени, отделяющем нас от возникновения Земли. Одна из таких аналогий представляет историю Земли в виде трехчасового фильма. По этому сценарию мы — как вид, конечно, а не лично вы или я — торжественно появились бы в кадре лишь в последнюю секунду. Эта книга, подобно трехчасовому фильму, представляет собой очень краткое путешествие по истории Земли — от возникновения солнечной системы до наших дней. Ее содержание выстроено в хронологическом порядке с некоторыми отклонениями, необходимыми для лучшего понимания истории Земли. Но читателя следует предупредить, что она лишь касается некоторых из главных фактов. Чтобы овладеть всеми известными подробностями захватывающего прошлого Земли, понадобится по крайней мере несколько человеческих жизней.

Для большинства из нас природный ландшафт кажется более или менее постоянным. Если не брать всякого рода бедствия, такие как извержения вулканов или мощные землетрясения, геологическая панорама ощутимо не меняется на протяжении отдельной человеческой жизни. Но Земля за *свою* историю была свидетелем множества трансформаций. За миллиарды лет своего существования наша планета претерпела не одну глобальную катастрофу, масштабы которой не имеют подобия в рамках человеческого опыта, видела возникновение и исчезновение бесчисленных видов животных и растений, которые более не населяют Землю, наблюдала, как возникают и затем исчезают целые океаны и горные цепи. Откуда же мы знаем о таких вещах? Частично наше понимание опирается на данные лабораторных экспериментов и математическое моделирование геологических процессов или даже на логические рассуждения, но большая часть его является результатом изучения горных пород.

В горных породах записана вся история Земли, в них же находятся ключи к ее прошлому. Их расшифровка не всегда является легким делом, и хотя многое уже известно, еще больше только предстоит открыть. Эта книга имеет целью удовлетворить ваш аппетит к такому знанию, ибо мало что приносит такое удовлетворение, как понимание происхождения нашей природной среды обитания или, может быть, нашего места в этом мире.

Наука о Земле, подобно другим научным дисциплинам, переполнена специальными словами и выражениями. Частично это вызвано тем, что горные породы, минералы, ископаемые остатки животных и растений, формы земного рельефа и т. п. нуждаются в именах, если мы хотим рассуждать о них научным образом. Второй причиной является необходимость учитывать огромную протяженность геологического времени. Геологи разделили историю Земли на определенные временные единицы и дали им названия, которые незнакомы большинству негеологов. Эти имена обычно взяты из названия какой-либо конкретной географической местности, где породы, характерные для конкретного временного периода, особенно широко распространены. В этой книге я старался свести к минимуму геологический жаргон, но незнакомые слова все же будут в ней время от времени появляться, причем некоторые из них довольно часто. В конце книги помещен небольшой словарь терминов. Рисунок 1.1 поможет вам также разобраться в геологической временной шкале. Эта временная шкала является проклятием для студентов подготовительных курсов по геологии, но большинство студентов все же преодолевает себя и заучивает названия эр, периодов и даже более мелких подразделений — после того, как им напомнят, что существуют такие вещи, которые просто заучиваются, — как, например, названия месяцев или результаты игр вашей

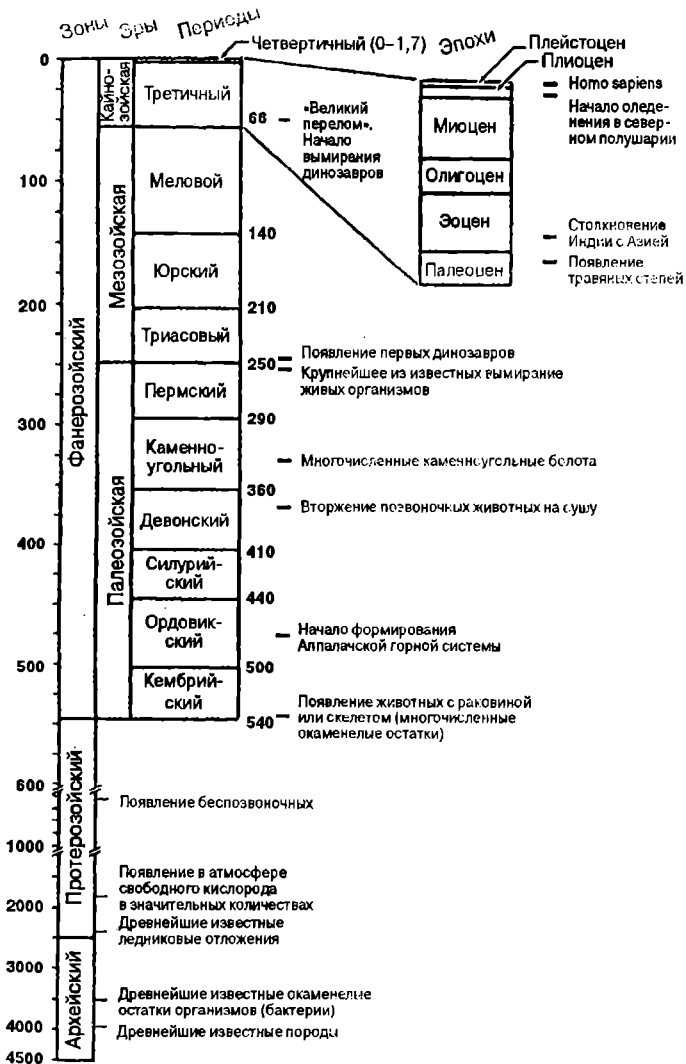


Рис. 1.1. Шкала геологического времени. Значения возраста показаны в миллионах лет от нашего времени, указаны также некоторые важные события истории Земли. Обратите внимание на два изменения на шкале в протерозойской ее части.

любимой футбольной команды. Скоро это знание терминологии становится привычкой.

Границы между эрами, периодами и эпохами геологической временной шкалы первоначально определялись на основе ископаемых остатков животных и растений — составной части летописи, записанной в горных породах. На протяжении истории Земли различные виды и классы живых существ появлялись, расцветали на некоторое время и затем исчезали. Но временами по не совсем еще понятным причинам происходило быстрое и полное исчезновение целых отделов животного и растительного царства. Обычно после таких кризисов наступал быстрый расцвет новых, иногда совершенно непохожих видов. Такие внезапные изменения растительных и животных сообществ отражались в ископаемой летописи. Лишь совсем недавно геологи стали исследовать эти массовые вымирания с точки зрения возможности периодических катастроф, таких как, например, столкновения Земли с кометами или астероидами или драматические изменения климата всей Земли. Тем не менее, хотя интерпретации этих явлений могут меняться, сами записи об этих событиях всегда присутствовали в горных породах и были доступны для всех. Они и составили ту логическую основу, которая позволила первым исследователям Земли определить временные подразделения ее истории. Границы между ними были проведены там, где резко менялся характер ископаемых остатков. Упрощенная версия геологической временной шкалы показана на рис. 1.1. Читая эту книгу, вы, вероятно, не раз обратитесь к ней.

На первых порах связь между временной шкалой и горными породами может показаться не столь уж очевидной. Но картина проясняется, если подумать о том, как возникают осадочные породы, которые прежде всего использовались для определения временной шкалы.

Осадки накапливаются на земной поверхности зерно за зерном, иногда даже атом за атомом, обычно в воде. Осадочный материал является результатом эрозии (то есть размывания и разрушения пород поверхностными водами) и выветривания на суше, после чего составные части пород переносятся водными потоками в озера или моря. Большая часть осадков сначала представляет собой неконсолидированный (рыхлый, незатвердевший) материал наподобие ила или песка, который в результате действия ряда процессов твердеет и превращается в твердую породу. Осадки в процессе своего образования поглощают и сохраняют раковины, скелеты, листья, перья и другие части животных и растений, которые и образуют летопись биологической эволюции. Единичный выход таких пород может представлять собой результат тысяч или даже миллионов лет непрерывных отложений — при этом самые древние пласты всегда располагаются внизу, а самые молодые наверху разреза. Большая часть временной шкалы, приведенной на рис. 1.1, была построена путем сопоставления и обобщения тех частей этой летописи, изученных в самых разных частях света, которые по содержанию ископаемых остатков перекрывают друг друга. Но все же следует признать, что как накопление, так и сохранение ископаемых остатков зависит от капризов природы. Более того, когда понижается уровень моря или поднимаются толщи осадков, начинается эрозия, которая стирает часть геологической летописи. Следовательно, в ней имеется много пробелов. Это обстоятельство было серьезной проблемой для Дарвина, которому пришлось объяснять, почему летопись органических остатков не показывает подробно каждый шаг эволюции. В его знаменитой книге «Происхождение видов» этому вопросу посвящен целый раздел «О неполноте геологической летописи».

Однако, предоставляя нам практически непрерывные страницы исторической летописи, осадочные породы не являются единственным материалом, представляющим интерес для геологов. Изверженные и метаморфические породы также содержат информацию о своем происхождении и истории, хотя и по-другому. В противоположность осадкам, изверженные породы возникают в глубинах Земли в результате плавления и кристаллизуются, приобретая свой нынешний вид, когда расплавленная магма — этим термином геологи обозначают жидкую породу — охлаждается на земной поверхности или вблизи от нее. Знакомые примеры таких пород — розовый гранит, который украшает фасады банков и других зданий, или темноцветный базальт, образующийся из лавы, которая вытекает из вулкана Килауэа на Гавайских островах. Химический состав таких пород содержит ключи к познанию той геологической обстановки, в которой возникли эти породы. Хотя для молодых излившихся пород это и не такая уж потрясающая умы информация, — мы ведь и так знаем, что Килауэа есть один из вулканов посредине Тихого океана, и нам для этого нет необходимости исследовать химический состав его лав, — эта информация является крайне важной для познания древних пород, поскольку она позволяет нам реконструировать физический мир прошлого.

Метаморфические породы совершенно отличны от изверженных. Состоявшие первоначально из осадочного или изверженного материала, они впоследствии значительно изменились — обычно в результате глубокого погружения и нагревания, которые трансформируют их минеральный состав и облик. Само их существование есть признак изменчивости Земли во времени. Метаморфические породы, по которым мы ходим или карабкаемся, особенно над этим не задумываясь, могли возникнуть

в далеком прошлом как зерна в выветренных остатках других пород, будучи затем перенесенными в море у берегов древних континентов, где и отложились слой за слоем. Однако метаморфические минералы, которые они сейчас содержат, являются немymi свидетелями другой, не такой пассивной стадии их истории, когда их погребло на глубину, может быть, двадцать или более километров, — и сильно нагрело. Такое часто происходит на разных этапах процесса горообразования, и мы знаем, что такие метаморфические породы существуют и сейчас в недрах Альп или Гималаев. Но каким образом такие минералы попадают на поверхность Земли? Ответ заключается в том, что даже самые величественные горные хребты являются эфемерными образованиями по стандартам геологического времени. Являясь жертвами медленной, но постоянной эрозии и поднятия, они постепенно разрушаются. Наш глубоко погребенный осадок, являющийся сейчас метаморфической породой, в результате действия этого процесса рано или поздно опять оказывается на поверхности. Такие циклы являются естественной частью процесса геологической истории Земли, и хотя они слишком растянуты во времени, чтобы их можно было наблюдать непосредственно, они оставляют свои записи в геологической летописи.

Не так давно даже геологи не могли понять, почему существуют вулканы в Японии, или почему в центре России тянутся Уральские горы. Теория тектоники плит все это изменила. Неожиданно и геология, подобно большинству других научных дисциплин, нашла опору, благодаря которой многие, казалось бы, разрозненные наблюдения получили свое объяснение. С точки зрения этой теории, земная поверхность состоит из ряда больших жестких плит толщиной около 100 километров, которые медленно движутся относительно друг друга.

В некоторых местах эти плиты раскалываются на части и растут в результате поступления из глубин нового материала вдоль расходящихся границ этого раскола. В других местах эти плиты сталкиваются друг с другом, причем обычно одна из них ныряет под другую и погружается в глубины Земли. В третьих местах гигантские плиты просто скользят своими краями друг по другу, размывая земную кору в этом процессе, как это происходит вдоль разлома Сан-Андреас в Калифорнии. Почти вся геологическая активность сосредоточена вдоль границ плит. Если нанести на карту мира эпицентры всех землетрясений, которые произошли за последнее десятилетие, то места их концентрации четко обрисуют очертания всех тектонических плит. Большая часть вулканической активности Земли также приурочена к границам плит.

Тектоническая карта мира с нанесенными границами плит представляет собой гигантскую мозаику, каждый элемент которой — тектоническая плита, правда, в отличие от обычной мозаики, все составляющие ее кусочки движутся, а их очертания — хоть и медленно, но неуклонно — изменяются. Через пятьдесят миллионов лет на такой карте Лос-Анджелес окажется на острове где-то напротив центральной части Британской Колумбии, а Австралия переползет к островам Индонезии. Нью-Йорк окажется дальше от Лондона, чем сейчас, но ближе к Токио, потому что Атлантический океан расширится за счет Тихого.

Вопреки некоторым распространенным мнениям, тектонические плиты не плавают по поверхности лежащего ниже слоя наподобие льда, плывущего по воде. Напротив, они движутся путем своеобразного пластического течения в своем основании. Внутренность Земли является твердой, но также и горячей, что позволяет ей

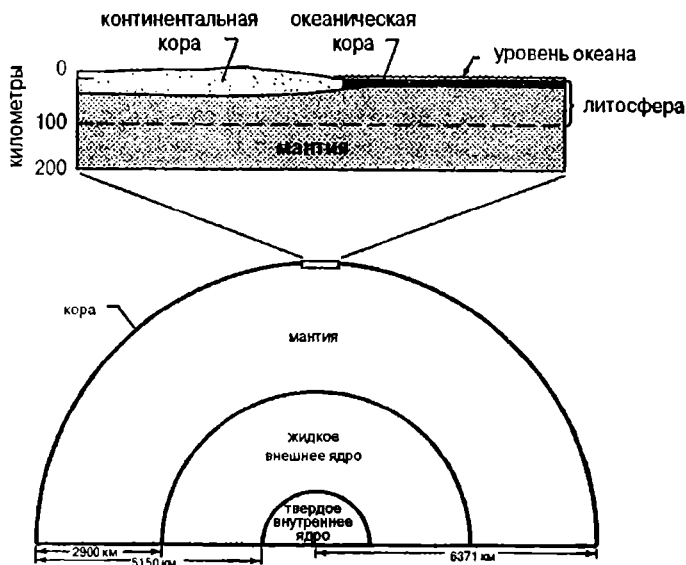


Рис. 1.2. Схематический разрез Земли, показывающий ее слоистое строение. Увеличенный фрагмент внешней оболочки Земли показывает, что континенты и океаническая кора различаются по толщине и что и те и другие представляют собой части литосферы — жесткой внешней кожи Земли, которая образует плиты, изучаемые тектоникой плит.

деформироваться и течь. Такое течение заметно только за длительные промежутки времени, подобно движению ледников. В противоположность лежащим ниже слоям Земли, поверхностные плиты являются холодными и довольно жесткими. Их физические свойства отделяют их от лежащей ниже конвектирующей зоны Земли.

Конвекция во внутренних частях Земли фактически является главным механизмом, посредством которого Земля теряет тепло. Горные породы, образующие оболочку, называемую мантией (рис. 1.2), настолько плохо проводят тепло, что потребовалось бы много миллиардов

лет, чтобы одна только теплопроводность могла перенести тепло из глубин Земли к ее поверхности. Тем не менее процесс конвекции в мантии физически перемещает вещество из глубин к поверхности, а уравнивающий нисходящий поток перемещает более холодное вещество от поверхности вглубь. Вероятно, что эта конвекционная циркуляция, по крайней мере, частично обуславливает движение поверхностных плит.

Хотя внутренность Земли в основном твердая, очень плотная часть земного ядра в самом центре (рис. 1.2), составляющая приблизительно третью часть ее массы, — по-видимому, жидкая. О ядре мы более подробно расскажем ниже, но пока достаточно отметить, что оно состоит в основном из железа и что именно вследствие конвекции его жидкой внешней части Земля имеет магнитное поле. Мы знаем это, хотя никому еще не удалось получить образцы вещества из ядра. Оставив в стороне путешествие к центру Земли, созданное воображением Жюль Верна, следует признать, что никому из людей не удалось еще проникнуть вглубь Земли более, чем на несколько километров, и что даже самые глубокие буровые скважины не достигли еще и 10-километровой глубины. Отметим для контраста, что внешняя граница ядра находится на глубине 2900 км, а радиус ядра от центра его до этой границы составляет приблизительно 6370 километров.

Не имея прямой информации о глубинах Земли, приходится пользоваться данными, которые дают геофизические методы исследования. Несомненно, что самая полезная информация о внутреннем строении Земли получена в результате исследований сейсмических волн, возникающих при землетрясениях и идущих сквозь толщу Земли. Очевидно, что крупные землетрясения освобождают огромные количества энергии, которая распространяется сквозь Землю в виде звуковых (сейсмических) волн.

Их можно записать с помощью чувствительных приборов (сейсмографов) в очень удаленных частях земной поверхности, подобно тому как, ударив молотком по концу стола, мы можем почувствовать вибрации на другом конце. Размах и ширина колебаний, которые чертит перо сейсмографа на движущейся бумаге (или луч света на движущейся фотопленке), являются реакцией прибора па колебания земной коры. Подробности интерпретации записей сейсмических колебаний довольно сложны, и мы не будем их здесь рассматривать. Тем не менее, конечным результатом многолетней работы по записи и интерпретации сигналов от землетрясений на разбросанных по всей поверхности Земли сейсмических станциях является определение средней скорости прохождения сейсмических волн через различные части Земли. Поскольку скорость прохождения сейсмических волн прямо связана с плотностью различных сред, через которые они проходят, геофизики смогли рассчитать плотности различных частей Земли и на их основе сделать выводы о минеральном составе этих частей. Эти данные показали, что Земля имеет слоистое строение (рис. 1.2) и что главные оболочки Земли имеют различные плотности и химический состав. Хотя на рис. 1.2 приведена упрощенная картина строения Земли, видно, что химический состав главных оболочек различен. Это крайне важно для познания ранней истории нашей планеты, поскольку большинство ученых считает, что эти ныне разделенные компоненты в первоначальный период формирования Земли были перемешаны в более или менее однородную массу. Насколько можно судить по имеющимся данным, другие подобные Земле планеты (Меркурий, Венера и Марс) так же, как и Луна, подверглись глобальной химической дифференциации.

В большей части этой книги рассматриваются процессы, происходящие на поверхности или внутри земной коры,

то есть самой верхней из твердых оболочек Земли. Достаточно беглого взгляда на рис. 1.1, чтобы увидеть, что объем земной коры совершенно незначителен по сравнению с другими оболочками планеты. Это только тонкая кожица на поверхности Земли толщиной всего 5–6 километров под океанами и от 30 до 40 километров на континентах. Если бы Землю можно было пропорционально сжать до размеров яблока, то самые толстые части земной коры едва достигли бы в этом масштабе толщины кожицы. Но все равно именно кора содержит месторождения минералов, именно на ней возникла жизнь и именно на ней мы живем. Это наиболее известная нам часть планеты, поскольку ее можно изучать, анализировать и измерять. Она возникла за долгий геологический период в результате плавления внутренних частей Земли и переноса кипящих жидкостей к поверхности.

Граница между земной корой и лежащей ниже оболочкой — мантией — отмечается резким возрастанием скорости сейсмических волн, отражающим переход к более плотным породам глубин Земли. Породы мантии богаче железом и магнием по сравнению с корой и беднее более легкими элементами, такими как алюминий. Это установлено как на основании сейсмических исследований, так и по реальным образцам пород. Но как же можно получить образцы пород из мантии, если даже самые глубокие буровые скважины не проникают сквозь всю земную кору? Оказалось, что природа нам помогла — есть несколько мест на Земле, где вулканические лавы, образовавшиеся в мантии, захватили с собой обломки таких пород и вынесли их на поверхность. Благодаря этому в числе прочего мы (по крайней мере некоторые из нас) можем носить украшения из бриллиантов. Бриллианты — это одна из форм углерода, являющегося также главной составной частью каменного угля — не очень

популярного материала для украшений. Тем не менее при высоких давлениях, существующих в мантии, обычный каменный уголь превращается в алмазы, из которых изготавливают и бриллианты. Необходимое для этого давление начинается на глубинах порядка 200 километров; алмазы Южной Африки, да и других месторождений, были вынесены на поверхность вулканическими магмами, которые образовались по меньшей мере на такой глубине. Конечно, тот факт, что алмазы находят в горных породах, происходящих из мантии, отнюдь не означает, что внутренность Земли состоит из алмазов, — сами алмазы в породах, происходящих из мантии, встречаются редко, но именно твердые обломки пород, в которых изредка находят алмазы, дают нам ключи к выяснению состава мантии.

Рис. 1.2 показывает, что тектонические плиты, составляющие земную поверхность, включают как кору, так и материал мантии. Их основание не отмечено сменой типов пород, скорее, оно представляет собой физическую границу, ниже которой скорость сейсмических волн резко снижается. Считается, что эта граница соответствует той глубине, на которой породы мантии ближе всего к своей точке плавления и, в силу возросшей температуры и высокого давления, ведут себя пластически, позволяя верхней жесткой плите медленно перемещаться по нижней конвектирующей мантии. Жесткая внешняя часть Земли, состоящая из плит, изучаемых тектоникой плит, получила в науке название «литосфера» — от греческого слова «литос», означающего камень или горную породу.

Масса мантии составляет около двух третей всей массы Земли. Эта оболочка Земли подразделяется на основании некоторых тонкостей распределения скоростей сейсмических волн на две части — внутреннюю и внешнюю. Внутри нее располагается ядро Земли, которое

включает остающуюся треть общей массы Земли и состоит, как уже указывалось, в основном из железа. На границе между ядром и мантией отмечается резкий скачок скорости распространения сейсмических волн, отражающей смену вещественного состава от пород мантии к металлу ядра. Некоторые типы волн не распространяются через жидкие среды. Установлено, что они не проходят через внешнюю часть ядра, указывая тем самым на его жидкое состояние. Однако внутренняя часть ядра является твердой.

Никто не знает в подробностях, как образовалась наша Земля. Тем не менее, исходя из того, что нам уже известно, и экстраполируя эти данные на прошлое, можно построить вполне приемлемый сценарий развития событий. Мы знаем, что Вселенная гораздо старше Земли и что большая часть атомов, ныне составляющих воздух, которым мы дышим, камни (или асфальт), по которым мы ходим, как и все остальное на Земле, были когда-то ядрами элементов в глубинах звезд. Некоторые из самых тяжелых элементов, такие как золото, свинец или уран, образовались во время грандиозных взрывов сверхновых звезд, которыми заканчивалась их эволюция; при этом в межзвездное пространство выбрасывалась огромная масса вещества. Мы знаем, что в конце концов вещество, слагающее сейчас Землю, станет частью большого газопылевого облака, весьма похожего на те, которые астрономы наблюдают в других частях нашей галактики.

По пока еще не ясным причинам это облако около 4,5 миллиардов лет назад начало сжиматься. По мере сжатия центральные его части уплотнялись и разогревались, подобно тому, как разогревается сжатый воздух в велосипедном насосе. В самом центре этого сжимающегося облака, где температура и давления были максимальны, начались ядерные реакции, которые и сейчас

поддерживают жизнь Солнца. Солнце, ближайшая к нам звезда, содержит около 99,9 процента всего вещества солнечной системы; планеты и астероиды являются остатками первоначального облака. По крайней мере в самом центре солнечной системы, где находится наша Земля, температура при образовании Солнца была столь высока, что любые ранее существовавшие зерна, вероятно, целиком испарились и большая часть этих остатков первоначального облака находилась в газовой форме. По мере охлаждения этого раскаленного облака газ начал конденсироваться, образуя твердые зерна минералов, которые, слипаясь, постепенно образовали более крупные тела. Одни тела росли быстро, поглощая все, что встречалось им на пути во время их путешествия по орбите вокруг первоначального Солнца, другие разрушались во время грандиозных столкновений крупных обломков. Процесс разрастания (аккреции) Земли за счет захвата пыли и обломков из окружающего пространства в начальный период происходил очень бурно, и непрерывный дождь падающих тел должен был привести к ее значительному нагреванию. Хотя первоначальная смесь веществ могла быть довольно однородной в большом масштабе, разогрев Земли вследствие гравитационного сжатия и бомбардировки ее обломками приводили к расплавлению, и возникавшие жидкости отделялись от оставшихся твердыми частей смеси под воздействием силы тяжести. В частности, железо, которое плавится при несколько меньшей температуре, чем многие другие вещества Земли, должно было выплавиться раньше и в силу своей большей плотности быстро погрузиться в глубину земли, образовав там ядро.

Крупномасштабная химическая дифференциация Земли на металлическое ядро и перекрывающую его каменную оболочку — мантию — должна была произойти в самом

начале существования нашей планеты. Что касается возникновения земной коры, то это уже другая история. Мы знаем, что и она тоже образовалась в результате плавления, но в этом случае расплавленные материалы, в отличие от расплавленного железа, обладали меньшей плотностью, чем породы окружающей мантии, и поднимались к поверхности. Этот процесс всё еще продолжается и в наше время. Лавы, изливающиеся в наши дни из вулканов, являются результатом процессов плавления, происходящих в мантии и, застывая, они образуют новый материал земной коры. Земная кора, в частности континентальная кора, выросла на протяжении истории Земли, хотя ученые спорят, был ли ее рост непрерывным или эпизодическим, а также изменялась ли его скорость во времени.

Геология — древняя наука. В примитивной форме ею занимались первобытные люди, когда искали месторождения таких пород, как кремень или обсидиан, из которых потом изготавливали (путем отщепления) орудия с острыми краями, необходимые для охоты или вскапывания земли и разделки туш животных. Поиски месторождений негорючих и горючих полезных ископаемых, дающих материалы и энергию, необходимые для функционирования современного общества, по-прежнему являются важнейшей задачей для геологов. Не менее важным, независимо от возможности немедленного практического применения, является познание процессов, происходящих в Земле. В конце концов, геология окружает нас каждый день и на каждом шагу, хотя, вероятно, нелегко распознать этот факт, живя в сердце большого города. Но посетив Великий каньон или Йосемитскую долину, вы приобретете совершенно новый опыт, особенно если хотя бы немного познакомитесь с геологией. Увидеть, что красота Йосемитской долины с ее водо-

падами, низвергающимися крутыми каскадами, это плод работы возвышающихся над нею ледников, изрезавших породы горной цепи Сьерра-Невада во время недавнего оледенения, или понять, что моря наступают и отступают, потому что много миллионов лет назад отложили слои осадочных пород, ныне обнаженные в стенах Большого Каньона, — все это большинство людей будут переживать снова и снова.

Чтобы прийти к современному пониманию строения Земли и ее истории, геологам пришлось побывать историками, детективами, исследователями-первопроходцами, инженерами и, в первую очередь, пытливыми наблюдателями. А в наши дни им все больше приходится быть биологами, физиками, химиками и математиками, потому что изучение Земли охватывает все эти области знания. Поиск ответов на вопросы, которые поднимают науки о Земле, буквально не дает камням покоя.

Глава 2

ПЕРВЫЕ ДНИ

Ветхий завет сообщает, что Земля была сотворена за семь дней. Большинство геологов полагает, что даже Бог не смог бы выполнить такую задачу за столь короткое время. Тем не менее, это событие должно было произойти довольно быстро (в геологическом смысле). А насколько быстро — это очень важно, поскольку куски вещества, которые скапливались и слипались в комья, образуя Землю, несли с собой кинетическую энергию, и по мере того как эти обломки сталкивались с разрастающейся Землей, их кинетическая энергия превращалась в теплоту. Количество теплоты, накапливавшееся в недрах быстро растущей Земли, вместо того, чтобы излучаться с поверхности в космическое пространство, и определяло, насколько горячей была Земля в конце первоначального периода ее образования за счет захвата вещества первоначального газо-пылевого скопления. Чем быстрее протекал этот процесс, тем больше тепла сохранялось и накапливалось в новообразованной Земле и тем горячее становилась она. Без сомнения, первоначальная Земля была очень горячей, хотя об этом этапе ее истории у нас очень мало информации. Была ли внешняя часть Земли полностью расплавлена? Был ли на Земле магматический океан, аналогичный океану, который, по мнению многих геологов, существовал на Луне? Была ли когда-либо вся Земля в расплавленном состоянии?

Все эти точки зрения имеют своих сторонников, но нет никаких определенных и однозначных данных, которые свидетельствовали бы в пользу какой-либо из них. К несчастью, по неизбежно, по мере нашего углубления в прошлое Земли геологические факты и ключи к истории Земли становятся все более скудными и их все труднее интерпретировать. В самом начале, как уже было отмечено в предыдущей главе, и Земля, и другие планеты нашей солнечной системы образовались из кусков и обломков, вращавшихся вокруг первоначального Солнца. Земля разрасталась, захватывая все вещество, находившееся вокруг, пока не достигла за несколько миллионов лет — не более десяти — приблизительно своего нынешнего размера. Хотя мы и не знаем точно, как быстро она стала такой, как сейчас, у нас все же есть данные о характере вещества, из которого она образовалась. Эту информацию мы получаем на основе изучения метеоритов.

МЕТЕОРИТЫ И ЗЕМЛЯ

Метеориты — гораздо более обычное явление, чем вам, возможно, кажется. Количество образцов в какой-нибудь частной или общественной коллекции достигает нередко нескольких тысяч и постоянно возрастает. Большинство «падающих звезд», прорезающих ночное небо в ясную погоду, представляет собой крошечные метеориты, нагретые до температуры белого каления в результате трения о воздух, которые полностью сгорают в атмосфере, не долетая до поверхности Земли. Лишь немногие из них достигают поверхности. Каждый год на континенты падают десятки тысяч метеоритов, вероятно более 100 000, и еще большее количество падает в океаны. Большая часть их имеет очень маленькие размеры, и они

никогда не распознаются как метеорные частицы. Те, которые были найдены и собраны, имеют размеры от горошины до более редких кусков величиной с футбольный мяч, а иногда и гораздо крупнее. С ростом населения Земли все большая доля упавших метеоритов немедленно распознается и подбирается. Некоторые из них иногда попадают даже в автомобили или дома.

В последние годы одним из наиболее богатых источников метеоритов для научного изучения стала Антарктида. Метеориты, падающие на ее снежный покров, сразу же погружаются в снег и лед, но со временем они выносятся к океану ледниками, медленно движущимися от полюса. При падении метеориты уходят глубоко под землю, но местами, там, где медленно ползущий лед встречает погребенные под ним горные хребты, эти скопления метеоритов выносятся вверх. В таких местах холодные сухие ветры Антарктиды быстро сдувают лед, оставляя на месте метеориты, которые он несет с собой. Под воздействием этого процесса в таких местах нередко концентрируются метеориты, падавшие на Землю на протяжении тысяч лет, и поскольку в этом море снега и льда мало других выходов горных пород, эти скопления метеоритов легко заметить. В наше время геологи нескольких стран ежегодно совершают экспедиции в Антарктиду в течение южного лета на поиски таких скоплений метеоритов с помощью автомобилей-снегоходов и вертолетов.

В былые времена метеоритам иногда приписывались особые свойства, поскольку они падали с неба и, как считалось, могли быть посланы богами. Ближе к нашему времени ученые поняли, что метеориты подобно Розеттскому камню несут ценную информацию о древнейшей истории Солнечной системы. Хотя существуют многие разновидности метеоритов, некоторые, по-видимому,

существенно не изменились со времени их образования 4,5 миллиарда лет тому назад, то есть со времени образования Земли. По существу, они, вероятно, очень близки к тому первичному материалу, из скоплений которого образовалась Земля. В следующий раз придя в музей естественной истории или геологический музей, уделите немного времени и метеоритам. Хотя они могут показаться вам очень похожими на обычные камни, они отнюдь не являются таковыми. В отличие от обычных пород метеориты — это удивительные посланцы из прошлого, которые могут многое рассказать нам о том времени, когда формировалась наша Солнечная система.

Наиболее древние метеориты называются хондритами. Они считаются обломками астероидов, пояс которых располагается между Марсом и Юпитером. Состоят они в основном из минералов, обычных для земных пород, но содержат также металлическое железо, которое на земной поверхности как природный материал встречается очень редко. Как мы узнали в предыдущей главе, железо плавится при гораздо более низкой температуре, чем многие обычные минералы. Большая часть металлического железа, принесенного на Землю в процессе ее первоначального роста из захваченных обломков и пыли, расплавилась и опустилась в центр планеты, образовав там металлическое ядро.

Поскольку Земля состоит из химически различающихся оболочек — таких как ядро, мантия и кора, — и поскольку мы можем собрать пробы для анализа только из самой верхней оболочки, определение общего химического состава нашей планеты казалось трудной задачей. Однако и хондриты можно проанализировать в лаборатории. Если они действительно представляют собой тот материал, который, накапливаясь, образовал Землю, тогда просто анализируя их, мы могли бы определить

химический состав Земли в целом — поистине удивительная перспектива! Но можно ли считать, что они характеризуют средний состав того вещества Солнечной системы, из которого первоначально образовалась Земля? Имеются веские доводы в пользу того, что это так. Это факты, полученные в результате исследований Солнца, поскольку оно содержит почти всю массу солнечной системы и тем самым, — можно сказать, по определению, — средний состав Солнца соответствует среднему составу всей Солнечной системы. Путем спектрального анализа света, излучаемого Солнцем, ученые получили много информации о его химическом составе. За исключением небольшого числа элементов, находящихся обычно в газообразном состоянии, относительные количества большинства элементов в хондритах почти точно соответствуют их среднему содержанию на Солнце, что является хорошим свидетельством в пользу того, что вещество хондритов не подвергалось существенному химическому фракционированию. Таким образом, сопоставляя информацию, полученную в результате изучения метеоритов, со знанием о средней плотности различных оболочек Земли, выведенным на основе сейсмических исследований, оказалось возможным не только оценить общий химический состав Земли, но даже определить средний состав тех оболочек, образцы пород которых никогда не отбирались, — таких, как глубокие слои мантии и ядро.

КАКОВ ВОЗРАСТ НАШЕЙ ПЛАНЕТЫ?

Выше уже было упомянуто, что возраст Земли несколько миллиардов лет. Это современное представление. Убеждение Джеймса Ашера, теолога, который на основании Библии вычислил, что Земля была сотворена

в 4004 году до н. э., продержалось вплоть до девятнадцатого века. Некоторые и сегодня игнорируют неопровержимые научные доказательства и уверяют, что библейские легенды излагают истинную историю сотворения и дальнейшего развития Земли.

Ныне принятый наукой возраст Земли в 4,5 миллиардов лет был установлен только в середине 1950-х годов. Точное определение возраста Земли является весьма специфической научной задачей, но в сущности оно исходит из того факта, что естественно встречающиеся радиоактивные изотопы распадаются с постоянной скоростью. Если эта скорость для конкретного изотопа твердо установлена, то можно сосчитать количество продуктов его распада, которое накопилось в образце горной породы со времени ее образования, на основании чего можно вычислить возраст породы. Радиоактивный распад и его использование для датирования образцов горных пород будут более подробно рассмотрены в главе 6, но все же стоит отметить, что в обычных горных породах имеется несколько изотопов, которые можно использовать для датирования. Изотопы одного элемента имеют одинаковые химические свойства, но слегка отличающееся строение ядер. Не все изотопы радиоактивны, но лишь те, которые со временем распадаются, образуя изотопы совершенно другого элемента. Из элементов с радиоактивными изотопами более других известны уран и торий. В процессе радиоактивного распада они превращаются в изотопы свинца. Таким образом, часть свинца, существующего сейчас на Земле и даже в Солнечной системе, не существовала изначально, при формировании, а возникла в течение геологического времени в результате постепенного распада тория и урана.

Поскольку каждый из изотопов тория и урана, распадаясь, превращается в свинец с определенной скоростью,

образцы, содержащие эти элементы, содержат каждый несколько независимых, как бы встроенных в породу, геологических «часов», которые можно использовать независимо друг от друга для определения геологического возраста породы. Из этого также следует, что соотношение изотопов свинца в каждой конкретной породе, как правило, совершенно индивидуально и отражает как возраст, так и соотношение содержания урана и тория. В 1950-х годах Клэр Паттерсон из Калифорнийского технологического института в Пасадене обнаружила, что как метеориты, так и образцы горных пород Земли имеют одинаковые соотношения содержаний изотопов свинца. Используя тщательно отобранные образцы, точно соответствующие, насколько это возможно, среднему содержанию изотопов свинца в Земле, и серию образцов из хондритовых метеоритов, Паттерсон открыла систематическое соотношение, указывающее, что все эти тела — и Земля, и различные хондриты — должны были образоваться из общего изначального материала в промежутке от 4,5 до 4,6 миллиарда лет назад.

Результаты, полученные Клэр Паттерсон, представляют собой одно из важнейших открытий в анналах геологии. Они не только установили надежные цифры для возраста Земли, но и связали происхождение нашей планеты с образованием вещества Солнечной системы в целом. Один из ее предшественников, выдающийся шотландский геолог восемнадцатого столетия Джеймс Хаттон сказал как-то об истории Земли, что он не нашел «никаких следов ее начала и никакой перспективы ее конца». Однако несмотря на эту лирическую прозу Хаттона, работа Клэр Паттерсон твердо установила дату начала этой истории. И хотя после 1950-х годов были достигнуты большие технические успехи в изучавшейся Паттерсон области изотопных

измерений, ее главные выводы остались непоколебимы.

Цифра 4,5 миллиарда лет легко запоминается. И студенты и профессора геологии быстро привыкли к ней. И все же это — огромное число, слишком большое, чтобы понять его, исходя из человеческого опыта. Если написать его со всеми нулями, тогда это число, может быть, несколько легче представить себе: 4 500 000 000 лет. Четыре с половиной миллиарда пенни составили бы стопку высотой около 6,5 тысячи километров, что несколько превышает расстояние от поверхности Земли до ее центра.

ПЕРВЫЕ 600 МИЛЛИОНОВ ЛЕТ

Хотя мы знаем, когда возникла Земля, следующая глава ее истории, в сущности, пуста. Ибо почти 600 миллионов лет после возникновения нашей планеты в ее летописи отсутствуют записи, соответственно представленные образцами горных пород. Древнейшие из обнаруженных пород найдены в Северо-Западных территориях Канады. На основе анализа содержащихся в них изотопов свинца было установлено, что их возраст несколько превышает 3,9 миллиарда лет. Эти породы подверглись сильному метаморфизму, и поэтому трудно сказать что-либо определенное об их происхождении. Но тем не менее они не так уж сильно отличаются от многих других континентальных пород гораздо более молодого возраста. Таким образом, мы знаем, что уже 3,9 миллиарда лет назад существовали по меньшей мере какие-то фрагменты континентальной коры.

Вопрос о том, когда образовались первые континенты, давно вызывал острый интерес у геологов, поскольку

очевидно, что для роста и эволюции земной коры потребовалось определенное геологическое время. Кажется вероятным, что до возникновения пород, имеющих возраст 3,9 миллиарда лет, должны были существовать какие-то небольшие континенты. Данные, которые приводят нас к этому заключению, редки, и найти их почти так же трудно, как пресловутую иголку в стоге сена. Но где следует искать такого рода данные? Ответ на этот вопрос представляет собой хороший пример того, как часто приходится работать геологам, используя настоящее как окно в прошлое. Мы знаем, что в наше время продукты эрозии накапливаются на краях континентов. Имеются веские основания ожидать, что и в прошлом ситуация не отличалась от нынешней. Даже самые древние материки должны были иметь берега и пляжи. Вполне вероятно, что если бы часть этих древнейших осадков сохранилась до нашего времени, они вполне могли содержать зерна минералов, происходящие из еще более древних эродированных континентов.

И вот, в поисках минеральных зерен, особенно устойчивых к разрушению при выветривании и переносе, геологам пришлось просеять немало образцов древнейших известных нам песчаников, которые, вероятно, откладывались вдоль береговых линий древних материков. Во время одного из таких поисков в Западной Австралии был случайно обнаружен прослой песчаника возрастом в 3,6 миллиарда лет. Некоторые из зерен в этой породе оказались старше самого песчаника и, по-видимому, пережили много циклов эрозии, отложения, уплотнения в твердую породу, поднятия и повторной эрозии. Уильям Компстон с коллегами из Австралийского Национального университета в Канберре обнаружили, что несколько зерен устойчивого к выветриванию минерала циркона из этих древних песчаников имеют возраст от 4,1 до почти 4,3 миллиарда лет.

Кристаллики циркона являются обычными компонентами многих изверженных пород. Зачерпните горсть пляжного песка или почвы, и вполне может оказаться, что вы держите в ладони несколько зерен циркона, поскольку выветривание и эрозия, разрушившие их материнские породы, очень слабо воздействуют на инертные кристаллы циркона. Из-за своей твердости и устойчивости к разрушению большие прозрачные кристаллы этого минерала часто используются в качестве драгоценных камней. Но самыми полезными для геологов оказываются крошечные зерна циркона, которые переносятся на большие расстояния в водных потоках или даже ветром. Они-то и являются тем следом, с помощью которого можно проследить и найти тот самый исходный источник происхождения осадочного материала, в котором эти зерна сейчас находятся.

Как следует из названия этого минерала, зерна циркона богаты элементом цирконием. К счастью, в них также содержатся значительные количества урана, и как мы уже видели, в результате радиоактивного распада урана образуются изотопы свинца, содержание которых можно измерить, и по этим данным определить возраст зерен. Современные методы измерений столь чувствительны, что даже того ничтожного количества свинца, которое содержится в единственном мельчайшем зерне циркона, оказывается достаточно для точного определения содержания урана и изотопов свинца и тем самым — возраста зерна. Таким вот образом были датированы зерна циркона, извлеченные из австралийского песчаника.

Поскольку эти древние цирконы являются единичными зернами, а не фрагментами породы, трудно судить о тех типах горных пород, из которых эти зерна были удалены эрозией. Однако циркон является обычным компонентом многих континентальных пород — например,

гранита — но практически отсутствует в таких повсеместно распространенных породах, как базальты океанского дна. Отсюда следует, что эти зерна происходят из континентальных пород. Если это действительно так, то существование континентов отодвигается назад во времени до почти 4,3 миллиарда лет — то есть всего несколько сот миллионов после образования Земли. Но эти первоначальные участки земной коры должны были значительно отличаться от тех континентов, которые мы знаем сегодня, и, конечно же, они должны были иметь гораздо меньшие размеры.

Даже если земная кора начала формироваться очень рано, существует несколько возможных причин, почему ничего не сохранилось от первых приблизительно 600 миллионов лет существования нашей планеты. Одна из них заключается в том, что на протяжении большей части этого периода Земля подвергалась мощной бомбардировке из космического пространства, пока она собирала своей силой тяжести остаточное вещество, уцелевшее после образования первоначального тела Земли. Второй причиной было то обстоятельство, что, как мы уже отметили, первоначальная Земля была очень горячей. Мощные конвекционные потоки, существовавшие в горячей Земле, просто уничтожили бы большую часть первоначальной коры. Хотя значительная часть этого тепла была следствием самого процесса разрастания Земли за счет бомбардировки падавшими на нее обломками, часть его поступала также из глубины Земли, будучи следствием важнейшего события ранней истории планеты — образования коры.

По мере разогревания образующейся планеты металлическое ядро, содержащееся внутри нее, начало плавиться, в нем стали возникать поначалу небольшие залежи расплавленного железа, в конце концов достигшие значительных размеров. Будучи гораздо более плотными,

чем окружающее их вещество, они погружались внутрь Земли. Этому процессу способствовало то обстоятельство, что окружающие эти залежи минералы, хотя и не были в расплавленном состоянии, имели все же высокую температуру и могли пластически течь. По различным оценкам сфера километрового радиуса, состоявшая из расплавленного железа, мигрировавшего к центру юной Земли, могла образоваться менее чем за миллион лет.

Этот процесс расплавления, собирания в залежи и погружения железа, который вел к образованию металлического ядра Земли, произошел на очень ранней стадии, — вероятно, во время или немного после главной фазы аккреции — разрастания Земли из слипающихся обломков, захваченных исходным скоплением благодаря силе тяжести. Это значит, что в течение первых, самое большее, нескольких десятков миллионов лет существования Земля представляла собой уже химически дифференцированную планету, состоящую из металлов в центре и неметаллических горных пород во внешней части. Эту главную химическую перестройку планеты из первоначально более однородного состояния называют иногда железной катастрофой, поскольку некоторые анализы указывают на то, что это был очень быстрый, почти взрывной процесс, сопровождавшийся освобождением большого количества энергии, может быть, достаточного даже для расплавления всей Земли. В одном опубликованном описании этого события было высказано предположение, что большая часть того металла, который сейчас составляет ядро планеты, сосредоточилась на ее поверхности, образовав кольцо или оболочку расплавленного материала вокруг более холодной центральной части новообразованной Земли. По мере того как гигантские «капли» расплавленного металла из этой оболочки начали опускаться, просачиваясь к центру планеты, изменение распределения

масс внутри вращающейся планеты вызвало в ней появление мощных напряжений, которые раскалывали все еще твердые внутренние части и перемешивали их с расплавленным железом. Является ли это описание точной картиной происходившего тогда процесса, неизвестно. Но независимо от способа, с помощью которого железо и другие металлы проложили себе путь к центру Земли, этот процесс сопровождался освобождением огромной энергии, что привело к еще большему нагреванию Земли.

Таким образом, в эти первые дни истории развитие Земли протекало весьма хаотичным образом, с широким проявлением вулканизма и, может быть, появлением моря из расплавленных пород на ее поверхности. Первоначально на Земле не было никакой атмосферы. Однако такие химические соединения, как вода и углекислота, а также различные летучие элементы были принесены на Землю в химически связанном виде падающим на нее материалом и постепенно выделялись в горячих глубинах Земли в виде вулканических газов, образуя первоначальную атмосферу. До завершения процесса образования Земли путем накопления падающего вещества на ее поверхность непрерывно низвергался град больших и малых обломков. Даже через несколько сот миллионов лет после образования планеты поверхность ее для путешественников из будущего показалась бы очень пезнакомой и негостеприимной. К этому времени на ней уже была, вероятно, жидкая вода, но не было никаких видимых признаков жизни — ни растений, ни животных, а атмосфера была непригодной для дыхания, поскольку в ней отсутствовал кислород. Не было и крупных материков, подобных нынешним, и хотя было много вулканов, горные цепи вроде Скалистых гор или Альп еще не существовали.

Не исключено, что в этот ранний период своей истории Земля периодически подвергалась сильным оледес-

нениям, и тогда большую часть ее поверхности покрывали замерзшие моря. Такая возможность вытекает из того факта, что Солнце, если оно следовало нормальному пути эволюции звезд его размера, было в первую половину своей жизни значительно менее горячим и его энергетический поток был гораздо слабее, чем сегодня. Несмотря на энергию, выделяющуюся от вулканов и столкновений с метеоритами, в конечном итоге именно поток энергии, излучаемой Солнцем, определяет температуру земной поверхности. После этапа первоначального нагрева, который, вероятно, продолжался несколько сот миллионов лет, поверхность Земли должна была остыть, причем — в силу слабости энергетического потока, идущего от Солнца, — температура земной поверхности могла оказаться достаточно низкой, чтобы существовавшие тогда океаны замерзли. Некоторые ученые даже отмечают, что как только наша Земля оказалась покрытой слоем снега и льда, которые хорошо отражают обратно в космос падающую на них энергию, ее могло отражаться столько, что покров льда и снега на Земле мог и не оттаивать вовсе, даже при более горячем солнце. Этот аргумент, а также тот факт, что на сегодняшней Земле на большей части ее поверхности тепло и уютно, используется для доказательства того, что подобного древнего глубокого оледенения никогда не было. Однако существуют и другие способы расплавить лед, как мы увидим в следующей главе.

АРХЕЙСКАЯ ЭРА

Первым крупным подразделением геологического времени является архейская эра (рис. 1.1). Этот очень длинный отрезок времени от момента образования Земли до приблизительно 2,5 миллиарда лет назад занимает

около 44 процентов всей истории нашей планеты. Конечно, геологическая временная шкала является всего лишь конструкцией ученых, и в течение архея, вероятно, произошло много событий, которые — будь они нам известны — могли бы дать основание для дальнейших подразделений. Но несмотря на ее длительность, мы знаем очень мало об архейской истории. Отчасти это связано с тем, что лишь малая часть современной поверхности Земли сложена породами архейского возраста. Мы уже видели, что не сохранилось никаких пород, относящихся к первым 600 миллионам лет архея.

Хотя (а может быть, и потому, что) архейские породы встречаются редко, они стали предметом интенсивного изучения. Мы знаем, например, что они встречаются, хотя и в небольших количествах, на всех крупных континентах. Иногда они располагаются около центра континента и всегда окружены более молодыми породами. Такая конфигурация дает ключ к пониманию того, как росли континенты. Имеются данные абсолютного возраста пород, показывающие, что в течение архея происходило эпизодическое разрастание континентов, но это только предварительный вывод, поскольку сами архейские породы занимают малую часть континентов и их сохранность, возможно, носит избирательный характер. В архейских осадках были обнаружены и первые ископаемые остатки древних одноклеточных бактерий. В последние годы тщательные исследования показали, что они встречаются гораздо чаще, чем когда-то думали, но все же они по-прежнему весьма редки. Тем не менее, они показывают, что к середине архея жизнь уже вполне установилась.

На основании изучения австралийских цирконов мы узнали, что уже 4,2–4,3 миллиарда лет назад существовали небольшие материки. На протяжении всего геологи-

ческого времени, начиная с архея и до сегодняшнего времени, континентальная кора образовывалась в результате расплавления пород в глубинах Земли и переноса расплавленного материала на ее поверхность. Однако даже в наше время континентальная часть земной коры составляет очень малую долю Земли как целого, как это видно из рис. 1.2, и ее химический состав очень резко отличается от состава остальных частей планеты. Некоторые другие планеты Солнечной системы тоже имеют кору, но материки, какими мы их знаем, по-видимому, являются уникальной особенностью Земли. Из этого следует, что вряд ли можно ожидать наличия на других планетах большого количества (или вообще наличия) тех разнообразных месторождений полезных ископаемых, которые встречаются на континентах Земли и снабжают нас большей частью тех материалов, которые необходимы для современной цивилизации. Почему же материки не могут существовать на других планетах? Ответ, вероятно, связан с наличием на Земле жидкой воды.

Подобно соли, добавленной в лед, вода, входящая в состав горных пород, понижает температуру их плавления. Она также влияет и на состав магмы, возникающей при расплавлении пород. На Земле движение слагающих кору тектонических плит обуславливает поступление воды в горячие глубины Земли, вызывая расплавление горных пород. Богатая водой океаническая кора затягивается в мантию вдоль длинных океанических рвов; с погружением, по мере увеличения температуры, эта вода вытесняется из пород. В результате этого процесса возникло так называемое Огненное кольцо, протянувшееся вокруг Тихого океана: все вулканы западного побережья Соединенных Штатов (штат Вашингтон), Чили, Аляски и Японии, а также Камчатки сосредоточены в тех регионах, где плиты дна Тихого океана, сталкиваясь с плитами окружающих

континентов, пыряют под них, погружаясь внутрь Земли и обуславливая этим освобождение воды и плавление пород. Возникающие при этом расплавы имеют меньшую плотность, чем окружающие их породы, вследствие чего они поднимаются к поверхности, прибавляя к материкам новый материал из глубин Земли. Хотя геологи ведут споры относительно времени, когда начался процесс формирования и движения тектонических плит, наличие признаков существования архейской континентальной коры указывает на то, что уже очень рано в истории Земли вода поступала с поверхности в глубины планеты и процесс этот, по-видимому, не слишком отличается от того, как это происходит сегодня.

Архейская эра закончилась 2,5 миллиарда лет назад. Ее граница с протерозойской эрой (или протерозоем) является единственной границей на рис. 1.1, которая определена главным образом не на основании изменений в наборе ископаемых остатков организмов, которые сохранились в породах. Хотя жизнь на Земле к этому времени уже вполне утвердилась, архейские бактерии еще не имели легко окаменевавших скелетов или раковин, и остатки их встречаются не так уж часто. Кроме того, они развивались не так уж быстро и поэтому не оставили особенно отчетливых временных вех. Ископаемые остатки организмов наиболее полезны в качестве указателей геологического времени только начиная с кембрийского периода, когда начался расцвет разнообразных организмов с твердым телом. В результате этого возраст границы между археем и протерозоем, то есть 2,5 миллиарда лет, является в определенном смысле просто удобным числом. Верно, что оно основывается на общем представлении, как результат многих лет исследований, что некоторые изменения или события в геологической летописи произошли приблизительно в это время — например,

изменения химического состава образовавшихся тогда пород и, насколько это можно установить, особенности тех немногих ископаемых остатков, которые можно распознать. Но в отличие от всех остальных разграничительных линий на геологической временной шкале нет в мире такого места, где вы могли бы положить свою ладонь и заявить, что здесь проходит эта конкретная граница.

Древнейшие архейские породы, которые можно распознать как осадки, имеют возраст около 3,8 миллиарда лет. Они встречаются в Западной Гренландии и подтверждают, что в это время уже существовали океаны и материки, а эрозия и отложение осадков происходили почти так же, как и в наше время. Но даже 800 миллионов лет после своего рождения Земля, точнее поверхность ее континентов, все еще оставалась пустынной, а в атмосфере отсутствовал кислород. Несмотря на это и на то, что признаки жизни в породах того времени имеют косвенный характер, жизнь в форме микробов или одноклеточных организмов, вероятно, уже имелась. Когда именно зародилась на планете жизнь и как она могла развиваться — это темы следующей главы.

Глава 3

ЧУДО ЖИЗНИ

«Чудо жизни» — таково название книги палеонтолога Стивена Джея Гулда из Гарвардского университета об эволюции жизни на Земле. Вдохновила его на это название классическая кинокартина «Это чудесная жизнь», и до чего же это название подходит к книге! В своей книге Гулд описывает удивительное разнообразие жизни, которое возникло в результате того, что теперь принято называть Кембрийским взрывом, и следует тем хаотическим путям, по которым она развивалась. Внезапно окаменевшие остатки живых существ в осадочных горных породах, весьма редкие до этого момента, расцветают великим изобилием видов. Некоторые из них были столь странными, что поражают воображение и по сей день. Как они двигались? Что ели? Несколько таких удивительных существ показано на рис. 7.3. Но несмотря на Великий Кембрийский взрыв, жизнь на Земле зародилась намного раньше, вероятно, более, чем за два миллиарда лет до этого. Именно к этим самым первым смутным ее проявлениям, относящимся иногда даже к раннему архею, мы сначала и обратимся.

В САМОМ НАЧАЛЕ

Философы и мыслители тысячи лет размышляют о том, как началась жизнь. Некоторые из них считают, что жизнь существует вечно и не имела начала. Аристотель,

оказывавший огромное влияние на развитие мысли в течение двух тысячелетий, считал, что некоторые формы жизни, а может быть и все, возникли самопроизвольно. Эта мысль, которую разделял не только он, основывалась на наблюдении: на плодородной почве после дождя внезапно появлялись растения, а в гниющем мясе материализовались личинки мух. В 1920-х годах русский биохимик Александр Опарин предложил и разработал идею, согласно которой жизнь возникла в теплой водной среде на поверхности ранней Земли, окруженной атмосферой, состоявшей главным образом из метана — природного газа, который согревает наши дома и питает наши кухонные плиты. Как считал Опарин, первые моря были богаты простыми органическими молекулами, которые реагировали друг с другом, образуя более сложные молекулы, что в конце концов привело к возникновению белков и жизни. Почти тридцать лет после того, как Опарин опубликовал свои идеи, Стэнли Миллер, бывший тогда аспирантом в Университете города Чикаго, и нобелевский лауреат Харолд Юри показали, что аминокислоты — строительные блоки необходимых для жизни белков — могли образоваться в условиях, которые, как полагают, преобладали на ранних этапах развития Земли. Миллер провел элегантный эксперимент. Он пропускал электрические разряды сквозь смесь метана, водорода, аммиака и водяного пара, и когда он проанализировал эту смесь, то оказалось, что в ней присутствуют аминокислоты. Электрические разряды в его опыте играли роль молний, газовая смесь служила разумно обоснованной моделью первоначальной атмосферы. Аминокислоты не могут воспроизводить себя и поэтому сами по себе не являются живыми. Тем не менее, этот эксперимент долгое время считался своего рода вехой на пути познания процесса, представлявшего собой один из важнейших этапов

развития жизни на Земле, а именно естественного синтеза аминокислот. И все же, как мы увидим ниже, в настоящее время представляется вероятным, что эксперименты Миллера—Юри едва ли могут быть непосредственно приложимы к событиям, происходившим в начале архея.

Одной из проблем, тормозивших понимание происхождения жизни, является то, что нам почти ничего определенно не известно об обстановке возникновения жизни. Можно делать только правдоподобные оценки. Например, на протяжении довольно долгого периода после своего образования, продолжительностью, вероятно, около нескольких сот миллионов лет, поверхность Земли должна была быть гораздо горячее, чем в наши дни. Продолжавшиеся удары метеоритов, больших и малых, приносили дополнительную тепловую энергию, а в самый ранний период истории Земли падение более крупных тел могло пробивать еще охлаждающуюся тонкую кору и выводить на поверхность лежащий ниже расплавленный материал. При прорывах лавы на поверхность в атмосферу поступали большие количества вулканических газов, создавая так называемый парниковый эффект в гораздо большей степени, чем в результате человеческой деятельности. Вполне возможно, что атмосфера Земли была в те времена во много раз плотнее, чем теперь, и что моря и океаны были горячими. Некоторые ученые даже предполагают, что по причине высокого атмосферного давления температура морей и океанов превышала температуру кипения воды при современном атмосферном давлении — настоящая кастрюля-скороварка. Но жизнь — та, которую мы знаем, — весьма чувствительна к температуре окружающей среды, и нам неизвестны современные организмы, которые могли бы существовать при температуре намного выше 100 градусов Цельсия. Невероятно, чтобы

жизнь утвердилась на планете до того, как температура поверхности не снизилась до этого уровня или даже ниже.

Хотя нам неизвестен точный состав ранней земной атмосферы, в последнее время достигнут немалый прогресс в этом направлении, вполне позволяющий сказать с некоторой определенностью, что богатый метаном состав, который предполагал Опарин, и метано-аммиачно-водородная смесь, которая была использована Миллером в его экспериментах, являются, вероятно, не очень реалистичными моделями. На основании изучения наших ближайших соседей, Марса и Венеры, а также с учетом данных, полученных в результате изучения осадочных пород Земли, ученые полагают, что первоначальная атмосфера Земли была богата углекислотой, а не метаном. Как на Марсе, так и на Венере CO_2 является, по-видимому, преобладающим газом в составе их атмосфер. На Земле он является второстепенной составной частью. Но огромное количество его, погребенное в составе осадочных пород земной коры, достаточно для того, чтобы в случае его освобождения и поступления в атмосферу состав ее сравнялся бы с составом ближайших к нам планет. Каким же образом CO_2 оказался связанным в земной коре? Ответ заключается в том, что геологи называют углеродным циклом. В результате ряда химических реакций углекислота переходит из атмосферы в океаны в растворенной форме. В морской воде она соединяется с кальцием и осаждается в виде окиси кальция, главной составной части известняков, которая забивает водопроводные трубы и образует накипь в чайниках. На протяжении геологического времени в известняки было превращено такое количество углекислоты, что сейчас ее количество в известняках более, чем в 100 000 раз превышает ее общее количество в атмосфере. Значительное количество углекислоты было также извлечено из атмосферы растениями

в процессе фотосинтеза, преобразовано в органическое вещество и в конце концов погребено и превращено в уголь, нефть и природный газ. В результате сжигания этих природных ископаемых видов топлива углекислота возвращается в атмосферу и частично обуславливает пресловутый парниковый эффект и глобальное потепление климата.

В атмосфере, богатой углекислотой, метод получения аминокислот с помощью электрических разрядов Миллера—Юри не работает. Если бы первоначальная атмосфера Земли действительно была богата углекислотой, то необходимые для жизни органические вещества должны были образоваться иным способом. Поскольку у нас нет никаких геологических фактов о самых ранних событиях на нашей планете, подробности этого процесса неизвестны и, вероятно, никогда не будут известны. Однако было предложено много правдоподобных идей. Можно предположить, что на Земле, как и в наше время, существовали мириады микросред с различными температурными условиями, разным химическим составом и энергоснабжением. Более того, многие органические соединения, даже аминокислоты, были не раз обнаружены даже в метеоритах. Радиоастрономы выяснили также наличие органических соединений даже в межзвездном пространстве, а исследования кометы Галлея во время ее недавнего наибольшего сближения с Землей показали, что она богата органическим веществом. Можно допустить, что в раннеархейское время многие органические соединения неизбежно должны были поступать на Землю вместе со всем другим падавшим на нее из космоса материалом и при падении рассеивались по всей поверхности Земли. Но жизнь не возникает в развитом виде из таких простых молекул, и ей в своем развитии предстояло сделать гигантский шаг от этих соединений до произ-

водства сложных полимеризованных макромолекул и химических систем, способных самовоспроизводиться, репродуцировать самих себя. Различные пути развития, которые могли бы привести от примитивных органических соединений к началу жизни, сейчас активно исследуются химиками; например, одна из линий исследования показывает, что очень важное значение могла иметь химия поверхностных явлений. Возможно, что поверхности естественно встречающихся материалов, как, например, поверхности минеральных зерен, играли роль шаблонов, с помощью которых была возможна организация расположения в пространстве и даже воспроизведение (репликация) сложных молекул. Однако, при отсутствии подробных записей в геологической летописи, все, что мы можем допустить, сводится к тому, что в течение очень длительного промежутка времени химические реакции между все более сложными молекулами в конце концов привели к образованию соединений и структур, способных репродуцировать самих себя, — и вот здесь-то и началась жизнь.

На какой-то очень ранней стадии этого процесса появились мембраны — тонкие перепонки или оболочки, состоящие из органических молекул, которые позволили некоторым из этих органических молекул концентрироваться и накапливаться в ячейках среды, слегка отличающихся от частей ее, находящихся по ту сторону мембранной оболочки, — короче, таким образом возникли первые примитивные клетки. В сущности, самыми первыми конкретными данными о возникновении жизни, которыми мы располагаем, древнейшими ископаемыми остатками являются крохотные сохранившиеся клетки, напоминающие современных бактерий. Эти объекты обнаружены в архейских осадках, имеющих возраст около 3,5 миллиарда лет.

ПОЧЕМУ ЭТО ЗАНЯЛО СТОЛЬКО ВРЕМЕНИ?

Хотя 3,5 миллиарда лет — это очень долго по любым стандартам, стоит вспомнить, что речь идет о времени спустя один миллиард лет после возникновения Земли. Более чем пятая часть всей земной истории уже прошла. Одной из причин отсутствия распознаваемых органических остатков старше 3,5 миллиарда лет является тот факт, что сохранилось очень мало пород старше этого возраста, а старше 3,9 миллиарда лет — и вовсе никаких. Кроме того, все существующие раннеархейские породы прошли через несколько эпизодов метаморфизма, которые могли уничтожить в них всякие следы жизни, если они и были. Тем не менее существуют намеки на то, что живые организмы могли существовать значительно раньше, чем 3,5 миллиарда лет назад. Признаки этого содержатся в древних, имеющих возраст 3,8 миллиарда лет осадочных породах из Западной Гренландии, которые упоминались в предыдущей главе. За свою долгую жизнь эти осадки были погребены на большую глубину, подверглись сильному нагреванию и метаморфизму и в конце концов снова оказались поднятыми и эксгумированными, так что сегодня они снова оказались на поверхности. Их первоначальный облик был в значительной степени стерт, и в них отсутствуют явные ископаемые остатки живых организмов. Однако они все же содержат зерна графита — чистого углерода, вещества жизни и карандашных грифелей. Возможно, конечно, что этот углерод возник неорганическим путем, но более вероятно, что это остаток, реликт соединений, образованных организмами. Гренландская находка не является уникальной — графит встречается в архейских породах и во многих других частях света.

Однако 3,8 миллиарда лет назад — это больше чем 700 миллионов лет после возникновения Земли. Послед-

ние 700 миллионов лет земной истории охватывают фактически весь ход эволюции, от одноклеточных организмов до китов, кенгуру и человека. Многие ученые считают, что все необходимые шаги для возникновения жизни — образование простых органических молекул из составляющих, имевшихся в первых океанах и атмосфере, полимеризация этих молекул и реакции между ними, ведущие к образованию более сложных форм, и наконец возникновение репликации (самовоспроизведения) — все это могло произойти за относительно короткий период времени, вероятно, за 10 миллионов лет или меньше. Но если это так, почему мы не имеем более ранних признаков существования жизни? Неужели действительно для возникновения жизни потребовался чуть ли не миллиард лет?

Мы уже отмечали, что самые древние породы Земли за свою долгую жизнь неизбежно подвергались нагреванию и всякого рода деформациям, что большая часть признаков их первоначального состояния оказалась стертой, и что даже если бы жизнь возникла вскоре после того, как образовалась Земля, может оказаться, что у нас просто нет сохранившихся ее следов. Но есть также основания полагать, что жизнь могла взять и медленный старт. Это связано с тем фактом, что юная Земля бомбардировалась материалом из космоса.

Хотя каждый год на Землю падают десятки тысяч мелких метеоритов, изредка в нее врезаются и гораздо более крупные тела. Так, огромный, диаметром в целую милю, метеоритный кратер в штате Аризона, в ясный день представляющий собой великолепное зрелище для пассажиров, прилетающих и улетающих из южной Калифорнии, образовался в результате падения метеорита умеренных размеров, который врезался в Землю около 50 000 лет назад. В 1908 году упавшее на Землю тело, взорвавшееся

над отдаленной областью Сибири, представляло собой небольшую комету. Взрыв ее повалил леса на большой площади и создал взрывную волну, которая была отмечена на сейсмографах в Западной Европе, за тысячи километров от места падения. Интуитивно легко понять, что в ранний период истории Земли падение таких естественных космических обломков на Землю должно было происходить в гораздо более крупных масштабах. Ведь в конце концов наша планета образовалась из скопления вещества, рассеянного вдоль орбиты вокруг Солнца, и даже когда это скопление достигло приблизительно нынешнего размера планеты, в ее окрестностях все еще оставалось много материала, падавшего на нее впоследствии. Однако несмотря на эти очевидные доводы, только после получения надежных данных в результате экспедиций на Луну космических кораблей серии «Аполлон» геологи стали осознавать важную роль, которую должны были играть падения на Землю космических тел. Впечатляющие фотографии того, как обломки кометы Леви—Шумейкера 9 падают в атмосферу Юпитера, вызвав возмущения в областях этой планеты размером с Землю, сделанные летом 1994 года, только подчеркнули важность подобных событий в истории Земли.

Луна, как можно видеть через сильный бинокль, имеет щербатую поверхность. Одно время думали, что многие из ее «оспин» вулканического происхождения, но сейчас установлено, что почти все они являются результатом столкновения с метеоритами. Размер кратеров колеблется от больших круглых «бассейнов», образующих темного цвета «моря» (как выяснилось, название это ошибочно), имеющих в диаметре до 1000 километров и более, до микроскопического размера щербинок на образцах пород, привезенных на Землю астронавтами. Одним из многих важных результатов исследования Лун является

определение скорости увеличения числа этих кратеров. Никто не удивился, когда выяснилось, что скорость появления кратеров на Луне оказалась гораздо выше на ранних этапах ее истории, чем теперь. Самые крупные кратеры, которые сейчас заняты «морями», являются и самыми древними. Диаграмма на рис. 3.1 показывает, как резко падала скорость появления новых кратеров в течение жизни Луны.

Луна — маленькая планета, которая быстро остыла и в течение миллиардов лет находилась в состоянии геологического покоя. На ней нет вулканов и не бывает землетрясений. Нет на ней и атмосферы, которая могла бы быть причиной выветривания или эрозии. По существу на ней отсутствуют такие геологические процессы, которые постоянно работают на Земле, стирая с ее лица следы геологических событий. В результате этого Луна сохранила массу данных о своей первоначальной истории. Эти данные показывают, что Луна возникла приблизительно в то же время, что и Земля, и что практически все лунные кратеры старше 3,9 миллиарда лет, как и многие более молодые, были сильно переработаны в результате мощных бомбардировок падающими метеоритами. Самые древние части лунной поверхности полностью покрыты ударными кратерами. Если кривую, показанную на рис. 3.1, экстраполировать в сторону ранней истории Луны, то мы увидим, что наш ближайший сосед подвергался в то время безжалостной бомбардировке из космического пространства. Если Луна так интенсивно бомбардировалась из космоса в ранний период своей истории, то ее ближайшая соседка Земля, гравитационное притяжение которой было во много раз больше, чем Луны, претерпела гораздо более серьезное воздействие.

Какие последствия эти бомбардировки должны были иметь для ранней жизни, только что появившейся на

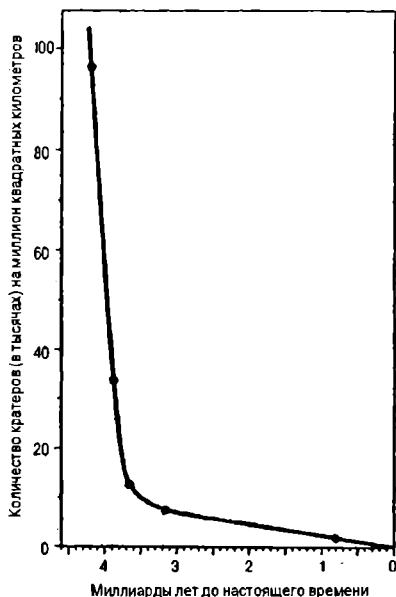


Рис. 3.1. Плотность кратеров в различных частях лунной поверхности измерялась по фотографиям, снятым с космического корабля, вращающегося по орбите вокруг Луны. Некоторые из этих регионов посещались космонавтами во время экспедиций серии «Аполлон». Во время этих высадок были отобраны образцы горных пород, которые были затем доставлены на землю, где был определен их возраст. Этот график составлен на основе полученной таким образом информации и показывает, что первоначальная Луна — по аналогии и в силу близости, — и Земля — подвергались очень сильной бомбардировке. Точки на кривой соответствуют фактическим численным данным.

Земле? Вероятные воздействия наиболее крупных из падавших небесных тел относятся, по-видимому, к области научной фантастики, но в реальной действительности в течение раннего периода земной истории они происходили неоднократно. Столкнувшееся с Землей тело диаметром около 400 километров, то есть размером с крупный астероид из числа образующих теперь так называемый

астероидный пояс, испарилось бы само и превратило в газ значительную часть земной поверхности, выбросив в атмосферу гигантский вулкан испарившихся и расплавленных пород. Часть этих обломков была бы выброшена в космос, но большая часть оказалась бы рассеянной по всей земной поверхности, вызвав нагрев до высоких температур как атмосферы, так и пород, слагающих поверхность. Весьма вероятно, что под воздействием такого количества тепла все существовавшие тогда океаны испарились бы. Огромное количество воды, выброшенной в атмосферу, радикально замедлило бы процесс охлаждения планеты после столкновения, поскольку вода создает парниковый эффект даже более интенсивно, чем двуокись углерода. Поверхность Земли оказалась бы полностью стерилизованной, и любые формы примитивной жизни, существовавшие до столкновения, почти без сомнения, были бы стерты с лица Земли.

Даже менее грандиозные столкновения имели бы радикальные последствия. Бассейн Имбриум, крупнейшая структура на лунной поверхности ударного типа, образовалась в результате падения тела диаметром около 100 километров. Имбриум частично окружен кольцом гор высотой около 5 километров. Место посадки космического корабля «Аполлон-15» находилось у подножия горной цепи Апеннин, являющейся частью этого кольца. Образцы, привезенные на Землю участниками этой экспедиции, а также другие данные показывают, что эти Апеннины совсем не похожи на любые горные хребты на Земле. Это просто огромные груды обломков, часть которых была выброшена взрывом, образовавшим структуру Имбриум. Равноценный по мощности взрыв на Земле превратил бы в пар огромную массу горных пород, создал бы огромный кратер, вызвал бы гигантские морские волны и, вероятно, привел бы к испарению по крайней мере поверхностных

слоев океанов. При этом жизнь на суше или в поверхностных слоях океанов была бы неизбежно уничтожена.

Кроме тела, образовавшего бассейн Имбриум, известен по крайней мере еще один объект диаметром порядка 100 километров, который упал на Луну в первые 600–700 миллионов лет ее существования. Таким образом, существует высокая вероятность того, что в этот же период еще более крупные тела и в еще большем количестве сталкивались с Землей, а это открывает интересную возможность того, что возникновение живых организмов из простых органических молекул происходило на Земле неоднократно, прерываясь стерилизующим воздействием мощных взрывов от падения гигантских тел. Химики и биологи находят достаточно трудной задачу реконструкции шаг за шагом процесса возникновения жизни даже в спокойной обстановке. Принимая во внимание периодически происходившие на ранней Земле бурные события, неудивительно, что процесс возникновения жизни должен был быть медленным и спорадическим.

Частые и крупные столкновения Земли с небесными телами могут также дать ответ и на другую загадку. В предыдущей главе было отмечено, что если Солнце развивается по тому же пути, что и большинство звезд его размера, то в самом начале истории Земли оно было еще слишком слабым, чтобы поддерживать воду на поверхности Земли в жидком состоянии. Расчеты показывают, что если бы вся вода, имеющаяся на поверхности Земли, хотя бы один раз полностью замерзла, то ее трудно было бы снова растопить, даже если бы Солнце нагрелось. И все же описанные выше периодические столкновения Земли с крупными телами вызывали бы ее периодическое размораживание, препятствуя постоянному глубокому промерзанию земных вод прежде, чем излучение солнечной энергии в космос возросло до его нынешнего уровня.

ДРЕВНЕЙШИЕ ИСКОПАЕМЫЕ ОСТАТКИ

Самые древние ископаемые остатки живых существ имеют возраст 3,5 миллиарда лет. Они найдены в осадочных породах северо-западной Австралии и представляют собой микроскопические одноклеточные организмы, похожие на бактерий, которые очень напоминают современную группу, известную под названием цианобитов, или сине-зеленых водорослей. Эти остатки имели форму ниточек, образованных цепочкой соприкасающихся друг с другом клеток, как показано на рис. 3.2. Породы, в которых они встречаются, представляют собой тонкослоистые осадки, сложенные главным образом кремнем или кварцитом (тонкозернистый агрегат зерен кварца), который, по-видимому, был отложен в мелководной среде, возможно в лагуне. Несмотря на свою простоту, эти ископаемые обнаруживают значительное разнообразие

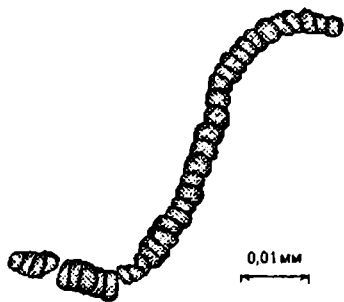


Рис. 3.2. Зарисовка одного из древнейших окаменевших остатков когда-либо найденных организмов: нитеподобная бактерия из осадочных пород северо-западной Австралии, возраст – 3,5 миллиарда лет. Набросок сделан по фотографиям, полученным с помощью микроскопа. Перерисовано с рисунка 1.5.5 (А), стр. 31, из книги Дж. В. Шопфа «Протерозойская биосфера», под ред. Дж. В. Шопфа и С. Клайна. Изд-во «Кэмбридж Юниверсити Пресс», 1992. Печатается с разрешения.

своей морфологии, что позволяет предположить, что образовались они задолго до отложения этого конкретного осадка.

В архее бактерии неоспоримо господствовали в океане. По существу от их первого появления и до конца архейской эры миллиард лет спустя никакие другие остатки живых существ до нас не дошли. Как нам хорошо известно, бактерии все еще сосуществуют с нами, занимая все воображаемые ниши на нынешней Земле. Они с нами и в наших болезнях, и когда мы здоровы, способствуют всякой заразе и ферментации вина. Трудно представить себе мир без бактерий.

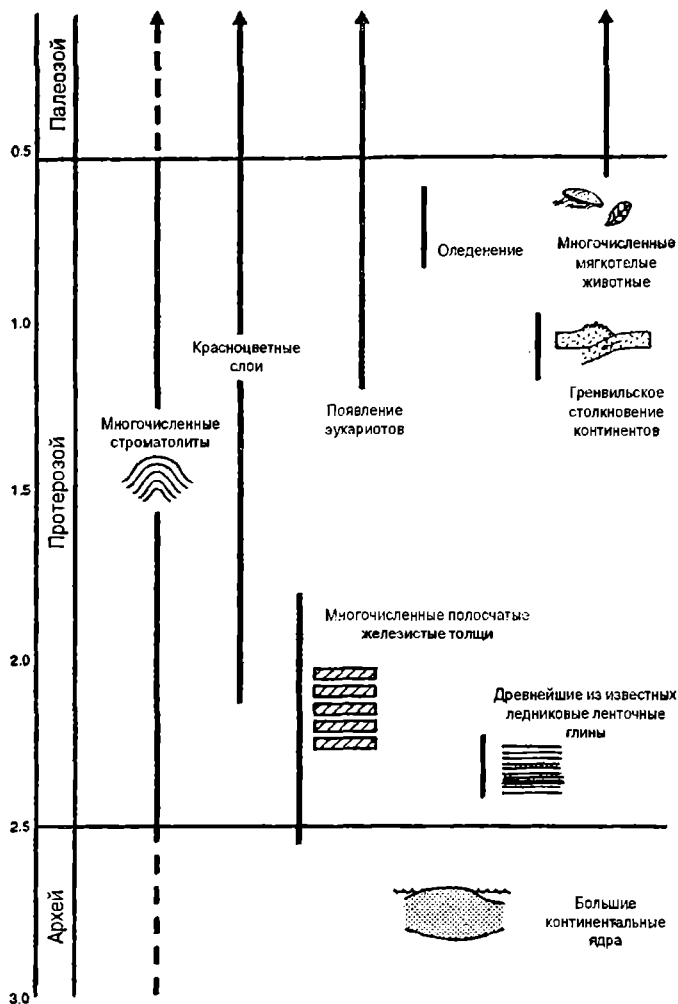
Бактерии — одноклеточные организмы, но их клетки не содержат ядер и многих других внутренних структур, свойственных позднейшим, более развитым формам жизни. В современном мире некоторые бактерии используют солнечную энергию, осуществляя фотосинтез, при этом выделяя кислород. Другие бактерии для своего роста и самовоспроизведения используют совершенно иные виды химических реакций. Когда именно в истории жизни развился фотосинтез — противоречивая и сложная проблема, поскольку именно он явился решающим фактором в эволюции атмосферы от преобладающей углекислоты до чего-то более близкого к нынешнему воздуху, богатому кислородом и пригодному для дыхания.

В породах, появившихся менее, чем через 100 миллионов лет после этих, содержащих первые нитеподобные микроскопические остатки, живых существ, появляются остатки гораздо более крупных организмов, которые легко видеть невооруженным глазом. Они представляют собой своеобразные луковицеобразные структуры, напоминающие очень большие расслоенные кочаны капусты, достигавшие высоты нескольких метров. Но вид их обманчив. Эти объекты, называемые иногда строматолитами,

представляли собой не один организм, а скорее колонии бактерий. Они состояли из отдельных клеток цианобактерий, подобных клеткам самых ранних ископаемых бактерий.

Ископаемые строматолиты становятся все более распространенными в более молодых осадочных породах; в конце архея и в течение последующей протерозойской эры они становятся совершенно обычными и весьма заметными. Их своеобразная форма обусловлена тем фактом, что они вырастали слой за слоем в виде бактериальных циновок или пленок, которые захватывали песок и распределяли зернистый материал в своих клейких волокнистых прядях. Несмотря на факт принадлежности к древнейшим из известных ископаемых остатков, строматолиты все еще живут и в наши дни в виде колоний живых организмов, хотя они далеко не так распространены, как в протерозое. Они растут в тропической обстановке на мелководье, что позволяет сделать вывод, что древнейшие строматолиты, которые встречаются в окаменелом виде в архейских породах, росли в прибрежных регионах архейских материков.

Колонии цианобактерий, которые сегодня образуют строматолиты, живут фотосинтезом. Хотя это и не доказывает, что их архейские предки также жили фотосинтезом, это все же указывает на то, что уже приблизительно 3,5 миллиарда лет назад фотосинтез мог установиться на Земле. Тем не менее, непохоже на то, что даже в конце архейской эры земная атмосфера содержала много кислорода. Это положение, как мы увидим в следующей главе, начало меняться уже в начале протерозойской эры.



Некоторые важные события протерозоя.
Время в миллиардах лет до нашего времени.

Глава 4

ПРОТЕРОЗОЙСКАЯ ЭРА

Как и архей, протерозойская эра длилась почти два миллиарда лет. К ее концу почти девять десятых из 4,5 миллиарда лет истории Земли уже прошли. Хотя о протерозое мы знаем значительно больше, чем об архее, наши данные все еще очень неполны, особенно в отношении начального периода. Однако протерозойские породы распространены сравнительно широко, особенно в сравнении с породами архея. Мы знаем по найденным в них остаткам, что строматолиты стали очень распространенными, что содержание кислорода в атмосфере увеличилось и что, как и в наше время, поднимались и затем разрушались горные хребты. Мы даже знаем немного о климате протерозоя. Каковы же источники всей этой информации? Вероятно, настало время рассмотреть некоторые способы, с помощью которых геологи читают записи, имеющиеся в горных породах, пользуясь образцами из протерозоя.

Одним из фундаментальных понятий в науках о Земле является принцип актуализма. Это слово означает то, о чем говорит. В учебниках смысл этого понятия часто передают фразой: «настоящее есть ключ к прошлому». В сущности, в понимании этого принципа геологические науки не стоят особняком. Эта фраза просто подчеркивает тот факт, что геологическими процессами управляют те же самые законы физики и химии, а описывают их те же математические законы и модели, как и все в природе. Если на обнажившейся поверхности песчаника возрастом

в 300 миллионов лет мы видим следы ряби, похожие на те, что образуются и в наше время на прибрежном песке, то вполне вероятно, что этот песок был отложен в такой же обстановке. Хотя принцип актуализма может показаться очевидным, в свое время он являлся революционной идеей. Шотландский геолог Хаттон первым применил его систематически в своих исследованиях. Этот принцип имел своих противников, но если его применять, опираясь на здравый смысл и с учетом огромности геологического времени, то он служит геологии хорошо. Даже события, которые с человеческой точки зрения являются редкими или катастрофическими, как, например, наводнения, происходящие раз в столетие, или катастрофическое землетрясение, или даже падение большого метеорита, являются на самом деле закономерно повторяющимися, периодическими или до некоторой степени предсказуемыми на геологической временной шкале.

Мы узнали, что древнейшая атмосфера Земли была богата углекислым газом и что даже в конце архея атмосфера содержала очень мало кислорода. Но породы, сохранившиеся от протерозоя, рассказывают нам уже другую историю, и до чего же она увлекательна! Подробно изучая эти породы и в то же время принимая во внимание принцип актуализма, геологи могут реконструировать по крайней мере некоторые этапы развития современной атмосферы.

ЭВОЛЮЦИЯ АТМОСФЕРЫ

Свидетельства об изменяющемся составе атмосферы, содержащиеся в породах протерозоя, позволяют предполагать, что в течение этой эры происходило резкое возрастание концентрации кислорода. Мы знаем, что содер-

жание его в современной атмосфере, поддерживаемое процессом фотосинтеза, протекающим в растениях, равно 21 объемному проценту, и понятно, что колебания уровня его содержания в прошлом были неразрывно связаны с историей жизни на Земле. Ниже мы рассмотрим интересные и неожиданные последствия изменений содержания кислорода в атмосфере — например, в отношении добычи железной руды для наших металлургических заводов.

Особенностью некоторых протерозойских осадочных пород, возраст которых превышает приблизительно два миллиарда лет, является то, что они содержат такие минералы, как пирит (называемый иногда «золотом дураков») и уранинит. По своему химическому составу пирит представляет собой сульфид железа, FeS_2 , а уранинит, как вы можете догадаться, есть минерал урана. В некоторых местах концентрация уранинита в породах протерозоя настолько велика, что его можно добывать в качестве урановой руды. Сами по себе находки этих минералов не являются чем-то выдающимся — их находят также и в породах другого возраста. В особое положение раннепротерозойские пирит и уранинит ставит тот факт, что они встречаются в осадках, которые были первоначально отложены в условиях речных русел и морских пляжей. Тщательное исследование показало, что сами минералы представляют собой угловатые зерна, извлеченные процессом эрозии из какой-то материнской породы и перенесенные к месту их отложения текучей водой. Однако ни уранинит, ни пирит не встречаются в такой обстановке в наше время, поскольку в присутствии кислорода они неустойчивы. За очень короткое время они окисляются и разрушаются. По-видимому, те реки или потоки, в которых эти зерна переносились к месту их отложения, как и современные потоки, находились в контакте с протерозойской атмосферой. Принцип актуализма подска-

зывает, что атмосфера раннего протерозоя отличалась от современной. Очевидный ответ состоит в том, что атмосфера содержала тогда так мало кислорода, что как уранинит, так и пирит могли сохраниться в виде угловатых зерен, не подвергаясь окислению. Эти минералы больше не встречаются в отложениях водных потоков моложе приблизительно двух миллиардов лет, что указывает на то, что в это время содержание кислорода в атмосфере начало повышаться.

Возможно, хотя и маловероятно, что зерна урана и пирита сохранились, избежав окисления, благодаря какому-то пока еще неизвестному механизму. Но существует еще по крайней мере два указания в протерозойских породах, которые также заставляют нас предположить, что земная атмосфера имела низкое содержание кислорода до эпохи, отстоящей от нас приблизительно на два миллиарда лет. Одно из них связано с добычей железа.

Большая часть мировых запасов железной руды заключена в месторождениях, известных под названием полосчатых железных руд, или сокращенно ПЖД. Эта руда встречается в осадочных породах, но собственно месторождения сложены полосчатыми породами с характерным чередованием тонких слоев, богатых железом, и слоев, богатых кремнием. Богатые железом слои имеют гораздо более темный цвет, чем богатые кремнием, и придают месторождению его чрезвычайно характерный полосатый облик. Большая часть запасов мировых полосчатых железных руд содержится в отложениях раннего протерозоя, возраст их немногим больше 1,8 миллиарда лет.

Понимание значения ПЖД как показателей содержания кислорода в атмосфере требует некоторого представления о химическом поведении железа, которое сильно зависит от количества кислорода в окружающей среде. Металлическое железо, как хорошо знает всякий владелец

автомобиля, очень быстро взаимодействует с кислородом, образуя ржавчину. Но в обычных горных породах земной коры железо в форме металла не встречается. В основном оно существует в виде одного из двух ионов разной валентности (или в двух состояниях окисления), то есть Fe^{2+} или Fe^{3+} , и в соединении с другими элементами, образуя типичные минералы, встречающиеся в обычных породах. В изверженных породах, большая часть которых является результатом расплавления пород мантии, основная масса железа находится в более низком состоянии окисления, или в виде иона Fe^{2+} . Однако, когда эти породы подвергаются воздействию дождевых вод, некоторая часть этого железа растворяется в воде и, благодаря высокому содержанию кислорода в атмосфере, быстро окисляется до Fe^{3+} . (Однако, когда эти породы подвергаются выветриванию в результате воздействия дождевой воды, часть этого железа растворяется, а высокое содержание кислорода в атмосфере очень быстро вызывает его окисление до Fe^{3+} .) Но Fe^{3+} является почти нерастворимым в воде, вследствие чего железо очень быстро осаждается в виде тонкозернистого, похожего на ржавчину вещества, оставляющего красноватые пятна на дне ручьев или иных водоемов, где оно собирается. В результате этого все природные воды на сегодняшней Земле содержат очень мало железа в растворенном виде. С другой стороны, если бы содержание кислорода в атмосфере было значительно ниже, то ионы Fe^{2+} не окислялись бы и те же самые воды могли бы содержать гораздо больше растворенного железа, поскольку Fe^{2+} гораздо более растворим, чем Fe^{3+} .

Месторождения полосчатых железных руд откладывались в воде, а геологические особенности большинства из них указывают на то, что они образовались в прибрежных водах морей, хотя и на различной глубине. Железо в этих осадках представлено окисленным (трехвалентным)

ионом Fe^{3+} , осажденным из толщи воды. Поскольку имеются данные о все еще низком содержании кислорода в атмосфере во время образования этих месторождений, был сделан вывод, что необходимый для этого процесса кислород поступал в результате фотосинтеза, осуществляемого водорослями, жившими на поверхности воды. Но тут возникает важный вопрос, касающийся состава атмосферы, а именно: как переносились эти огромные количества железа к местам их отложения. Как отмечалось выше, в современных условиях очень мало железа, растворенного из горных пород на суше, переносится в океаны в силу того, что оно быстро окисляется и выпадает в осадок в виде окислов железа. То же справедливо и в отношении железа, растворенного из базальтовых пород морского дна циркулирующими водами подводных горячих источников. Это еще раз указывает на то, что в раннем протерозое условия среды очень отличались от современных. Низкое содержание кислорода в атмосфере делало возможным перенос весьма больших количеств железа в форме иона Fe^{2+} . Когда на пути его перемещения встречались поверхностные зоны морской воды, сравнительно обогащенные кислородом фотосинтезирующими водорослями, оно осаждалось из раствора в виде окиси железа. Тот факт, что большая часть известных полосчатых железосодержащих толщ приурочена к геологическому времени раньше 1,8 миллиарда лет до нашего времени, также говорит о том, что к тому моменту содержание кислорода в воздухе уже возросло до такого уровня, когда большие количества растворенного железа больше не могли переноситься поверхностными водами.

Третье указание на содержание кислорода в атмосфере также связано с окислением железа. В геологической летописи толщи и слои осадков, имеющих отчетливо красноватый цвет, обычно песчаников, встречаются довольно

часто. Неудивительно, что геологи часто называют их красноцветными толщами. Их цвет обусловлен присутствием тонкозернистого окисленного железа в форме минерала гематита, который часто обволакивает, а иногда и цементирует кварцевые зерна песчаника. Красноцветные толщи часто разрабатывают с поверхности карьерами для получения строительного камня, что может подтвердить всякий, видевший Красный Форт в Старом Дели или соборы в Чичестере или Карлайле в северо-западной Англии. Красноцветные толщи старше 2,2–2,3 миллиарда лет нам неизвестны, очевидно в силу того, что до этого времени в атмосфере Земли не хватало кислорода для образования гематитового цемента. Еще раз стоит предостеречь, что могли существовать и другие причины этого отсутствия. Например, некоторые геологи указывали, что те типы среды, в которых отлагались красноцветные породы, могли еще не существовать в архее или раннем протерозое. Многие из красноцветных пород сложены осадками не морского происхождения, отложившимися на больших площадях континентов в засушливой обстановке, а небольшие континенты, типичные для самой ранней части геологической истории, были, возможно, неблагоприятны для отложения таких толщ. И тем не менее все же *существуют* осадки, имеющие возраст более двух миллиардов лет, которые, по-видимому, образовались в тех условиях, которые в наше время соответствуют условиям возникновения красноцветных пород, но они сцементированы не гематитом. Этот факт весомо указывает на решающую роль содержания кислорода в атмосфере в образовании красноцветных толщ.

Таким образом, даже несовершенные записи в геологической летописи протерозоя дают очень важные знания о путях развития земной атмосферы. Они показывают, что около двух миллиардов лет назад произошло отчет-

ливое увеличение содержания кислорода в атмосфере. После этого времени уранинит и пирит уже не могли накапливаться в реках и прибрежных песках морских пляжей в виде угловатых зерен: они окислялись и разрушались. Железо, растворенное как из континентальных, так и из донных пород, быстро окислялось и осаждалось, и его большие количества, необходимые для образования полосчатых железистых толщ, уже не могли переноситься к морю или даже внутри моря. И по той же самой причине гематит получил возможность осаждаться из межгранулярной воды в песчаниках, образуя оболочки зерен и цемент, скрепляющий их, и создавая на протяжении всего оставшегося геологического времени мощные слоистые толщи красноцветных пород. Хотя отдельные геологические факты никогда не могут быть однозначными, их совокупное свидетельство очень убедительно. Подобно детективам геологи собирали кусочки, казалось бы, никак не связанных между собой фактов, которые, взятые в совокупности, показывают, вне всяких сомнений, подробности событий, происшедших более *двух миллиардов лет назад*.

Несмотря на сравнительную редкость ископаемых остатков, относящихся к протерозою, они подтверждают выводы о происхождении атмосферного кислорода, сделанные на основании других фактов. Записи в геологической летописи показывают, что сложные многоклеточные организмы появились только в конце протерозоя, хотя строматолиты были очень распространены уже в начале этой эры. Современные строматолиты живут в тропиках в приливо-отливной полосе и представляют собой главным образом колонии водорослей, производящих кислород путем фотосинтеза. Вполне возможно, что прибрежные воды океанов или внутренних морей на относительно больших материках, развившихся в конце архея и в начале протерозоя, создали благоприятную среду для

расцвета строматолитов, что привело к увеличению скорости производства кислорода, по сравнению с предыдущим периодом. Однако в силу высокой химической активности большая часть кислорода, произведенного первоначально путем фотосинтеза, была быстро израсходована в химических реакциях, в которых окислялись как компоненты пород суши, так и различные составляющие самой атмосферы. Впрочем, в конце концов по мере увеличения скорости и масштабов фотосинтеза кислород стал накапливаться в атмосфере.

КЛИМАТ ПРОТЕРОЗОЯ

В геологической летописи протерозоя имеется очень мало фактов, относящихся к его климату. Большая часть нашей информации о климате в последующие периоды геологической истории заключена в ископаемых остатках организмов, так как у нас имеется достаточно хорошее понимание типов среды, в которых процветали многие ископаемые организмы. В этом отношении редкие остатки организмов, живших в протерозое, в основном одноклеточные бактерии, дают мало информации. И тем не менее в некоторых породах протерозоя все же сохранились самые древние свидетельства оледенения, может быть, даже глобального.

Вывод о том, что некоторые типы осадочных пород являются результатом деятельности ледников, основан на принципе актуализма: отложения, связанные с современными ледниками, хорошо изучены и некоторые из их особенностей определяются вполне отчетливо. В древних породах Канады, около озера Гурон, имеющих возраст 2,3 миллиарда лет, встречаются тонкие прослои варвитов — очень мелкозернистых осадков, напоминающие

годовые слои осадков, откладывающихся в ледниковых озерах. Типичные современные ленточные глины состоят из чередующихся пар слоев, отражающих годичный цикл, в которых один слой соответствует быстрому таянию льда и переносу осадка в летний период, а второй, более тонкозернистый, соответствует более медленному осаждению зимой. Хотя в протерозойских образцах пород затруднительно различить такие детали строения, эти породы почти несомненно представляют собой древние варвиты ледникового происхождения. Эти тонкозернистые слоистые осадки изредка содержат даже большие гальки или валуны — «дроппстоуны» (dropstones), являющиеся характерной чертой ледниковой среды, в которой более грубый материал иногда переносится на плавающих льдинах и падает на дно потока вдали от своего источника в очень тонкозернистый в целом осадок. Ледниковые осадки приблизительно такого же возраста, как и найденные в Канаде, были обнаружены и в других частях Северной Америки, а также в Африке, Индии и Европе. Это указывает на глобальный характер оледенения и на то, что в течение определенного периода времени в начале протерозоя (длительность которого неизвестна) Земля была охвачена оледенением.

Хотя существует много районов земной коры, породы которых старше 2,3 миллиарда лет, нигде в них не обнаружены явные признаки более древних периодов оледенения. Это отнюдь не означает, что их нет, ибо палеолитическая летопись полна пробелов, и большая часть древних пород претерпела сильный метаморфизм, так что их историю трудно расшифровать. И все же имеющиеся факты позволяют предположить, что это оледенение, случившееся 2,3 миллиарда лет назад, является одним из первых крупных периодов глубокого охлаждения, которым подверглась Земля за свою историю, или по крайней мере после

того, как начались первые записи в геологической летописи около 3,9 миллиарда лет назад. (Возможное промерзание океанов насквозь, о котором говорилось в главе 2, являлось событием совершенно иного порядка по своему масштабу, чем обсуждаемые здесь оледенения, и во всяком случае, даже если оно вообще произошло, это случилось задолго до начала геологической летописи, отраженной в горных породах.) Однако после раннепротерозойского оледенения климат, по-видимому, долгое время оставался вполне благоприятным для развития жизни. Нет никаких признаков оледенений и в последующие полтора миллиарда лет или около того. Далее внезапно наша геологическая летопись указывает ряд эпизодов, похожих на оледенения, в период приблизительно от 850 до 600 миллионов лет назад, в конце протерозойской эры. Эти последующие периоды также представляли собой явления глобального характера, поскольку на всех существующих континентах (за исключением, может быть, Антарктиды, большая часть которой в наше время покрыта льдом и недоступна для исследования) имеются признаки оледенения в течение этого периода. Хотя в конце протерозоя расположение континентов на Земле сильно отличалось от современного, широкое распространение следов оледенения указывает на то, что на большей части планеты, даже в низких широтах, царил холод. В конце протерозоя зимние каникулы в районе современного Карибского моря вряд ли доставили бы большое удовольствие.

ЭВОЛЮЦИЯ КОНТИНЕНТОВ

А что собой представляли континенты в протерозое? Выше уже отмечалось, что в начале архея они были небольшими и, вероятно, не очень похожими на современные

материки. К концу архея уже существовали континенты большего размера, а к концу протерозоя их размеры и физическая природа были уже очень похожи на современные. От долгого периода протерозойской истории сохранилось много следов континентообразующих событий; они свидетельствуют о том, что происходившие тогда процессы не очень отличались от современных. Одним из наиболее документированных примеров этого может служить область Северной Канады, исследованная Полом Хоффманом из Геологической службы Канады.

Хоффман провел несколько летних полевых сезонов, картируя породы, выходы которых распространены на Северо-Западных территориях Канады. На обширной территории, простирающейся от северных берегов материковой части Канады до Большого Невольничьего озера на юге, он распознал и нанес на карту остатки протерозойского цикла эрозии, осадконакопления и горообразования (рис. 4.2). Протерозойские горы уже давно смыты, и современный ландшафт отличается пологим, сглаженным рельефом и однообразием. Но у него своеобразная дикая красота и, что лучше всего для геолога, большая часть его почти лишена растительности, выходы горных пород хорошо обнажены и готовы рассказать свою повесть.

Но как же возможно собрать по кусочкам — обнажениям горных пород — историю, которая произошла здесь более двух миллиардов лет назад? Мы уже мельком взглянули на этот процесс реконструкции истории Земли при обсуждении происхождения атмосферного кислорода, но чтобы подробнее познакомиться с этим предметом, потребовалась бы отдельная книга. Интерпретация геологических данных требует глубокого понимания геологии, а также большого опыта анализа полевых данных. Но некоторые из основных элементов этой работы весьма

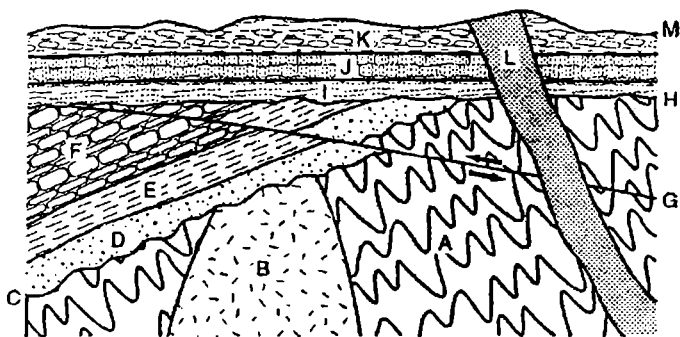


Рис. 4.1. Геологический разрез может содержать огромное количество информации, хотя установление временных соотношений между различными геологическими телами подобно разгадыванию головоломки. Попробуйте-ка решить эту. Фактическая последовательность событий обозначена буквами следующим образом: А — отложение осадков, затем их метаморфизм и складкообразование; В — внедрение гранитной магмы в метаморфизованные осадки; С — образование эрозионной поверхности на элементах А и В путем выветривания на поверхности (это говорит о том, что А и В должны были претерпеть поднятие, поскольку и метаморфизм А и интрузия В произошли в глубинах земной коры); D—F — отложение слоев осадков из какого-то водного бассейна; G — образование разлома со смещением (обратите внимание, что разлом не пересекает элементы моложе F и в настоящее время не является активным); H — вторая эрозионная поверхность (обратите внимание, что, поскольку элементы D, E и F, подобно всем осадкам, залегают горизонтально при своем образовании, вся область была наклонена перед тем, как подверглась эрозии. Между F и I мог пройти очень большой промежуток времени); I—K — дальнейшее отложение осадочных толщ; L — внедрение тела изверженных пород, вероятно, того, что питало потоки лавы на поверхности, которые в дальнейшем были эродированы; M — современная дневная поверхность, сформированная эрозией.

просты и, в сущности, основаны на обычном здравом смысле. Возьмем, например, время. Более подробно об этом будет говориться в следующей главе, но и так вполне очевидно, что время, особенно в отношении возраста

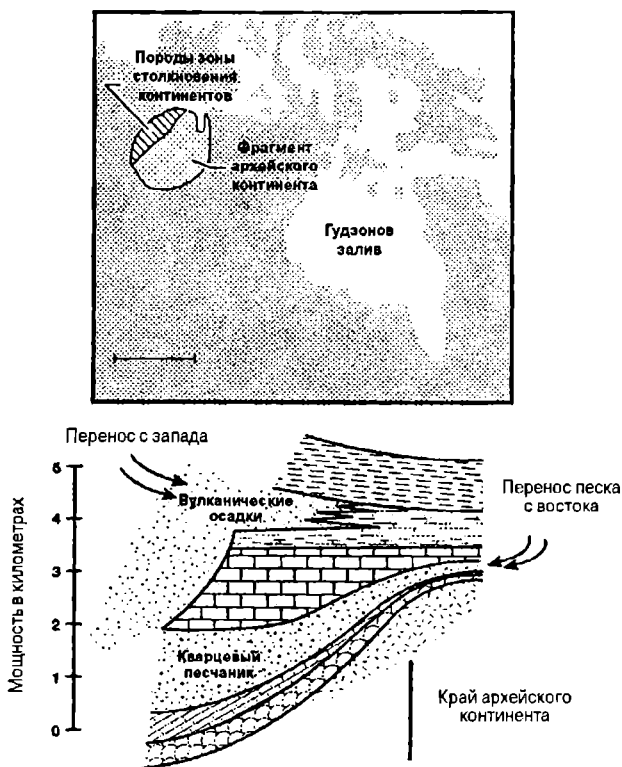


Рис. 4.2. Пол Хоффман из Геологической службы Канады закартировал протерозойские толщи пород, расположенные вдоль западного края архейского континентального фрагмента в Северной Канаде (верхняя карта). Хотя эти осадочные породы в настоящее время разбиты разломами и метаморфизованы, Хоффман смог реконструировать последовательность образования осадочных толщ (нижняя схема), которая показывает, что осадки сносились с расположенного восточнее континента и накапливались вдоль его края. Затем, позднее, с запада начал появляться вулканический материал, указывающий на приближение (которое в конце концов привело к столкновению) другого континента и/или островной дуги.

Займствовано с изменениями из рисунков 10-1 и 10-4 в книге: С. М. Стэнли «Земля и жизнь сквозь время», 2-е изд.

Авт. право © 1989, «В. Х. Фримэн и Компания».

пород и скорости различных геологических процессов, является критическим фактором, определяющим понимание геологической истории определенной территории. По крайней мере относительное время, то есть вопрос о том, является конкретная порода или толща пород более молодой или, наоборот, более древней, чем ее соседи, часто решается очень просто. Например, в последовательности каких-либо осадочных образований более древние образования (слои) обычно располагаются в нижней части разреза через толщу пород, а самые молодые — в его верхней части. Для других пород ключом к пониманию их относительного возраста являются пересечения пород. Например, если тело изверженной породы или поверхность сброса пересекает толщу другой породы, то они, очевидно, моложе самой толщи. Эти примеры могут показаться очень упрощенными, но применение именно такого подхода часто позволяет определить относительный возраст пород даже в очень сложных ситуациях (рис. 4.1). Только после того, как выполнена эта задача, оказывается возможной реконструкция действительной последовательности геологических событий.

Но вернемся к протерозойским породам Северной Канады. Хоффман обнаружил, что исследуемый им регион в начале протерозоя представлял собой край континента и являлся источником материала для образования морских осадков, богатых кварцем (рис. 4.2). Кварцевый песок является хорошим признаком существования где-то рядом древнего континента: при выветривании гранита — типичной породы континентальной коры — освобождается масса зерен кварца. Большая часть других минералов гранита либо растворяется, либо превращается во что-то другое, например, в глину. Белые пески тропических островов (большая часть которых представляет собой окаймленные кораллами вулканы, которые

отличаются по составу от песков континентов) могут показаться похожими на пески пляжей Калифорнии или Испании, но они состоят не из зерен кварца, а из кусочков кораллов. Богатые кварцем протерозойские песчаники, закартированные Хоффманом, показывают, что источник континентальных осадков находился восточнее, а океан располагался западнее, по крайней мере с точки зрения современной географии. Ориентировка континентов относительно стран света в протерозое могла быть совершенно иной, чем сейчас. Но на самом верху осадочного разреза — следовательно, в более позднее время — появляются слои других осадков, содержащие материал вулканического происхождения. В отличие от кварцевых песков источник материала для вулканических (точнее, вулканогенных) осадков располагался западнее, со стороны моря. Как это могло быть? До появления в науке теории тектоники плит подобные загадки разрешались с помощью предположения, что где-то в море должен был существовать «исчезнувший» материк. Сейчас мы понимаем, что далее в сторону моря от континентального края действительно была суша, но на основании современного знания мы можем предположить, что источником вулканогенных осадков могла быть, вероятно, группа вулканов, весьма похожих на вулканы Алеутских или Марианских островов, которая в результате движения плиты приблизилась к древнему континенту и в конце концов столкнулась с ним. В наше время на Северо-Западных территориях отсутствует какой-либо эквивалент протерозойского океана — западный край Северо-Американского континента находится более чем за тысячу километров.

Этот пример никоим образом не является уникальным. Столкновения между материковыми массами, при которых образуется скрепляющий их шов в виде горной цепи, а иногда и обратный процесс раскола континента

и отделиения его частей привели к современной конфигурации границ суши и моря. Северная Америка, один из крупнейших континентов, является типичным примером; во многих отношениях он напоминает лоскутное одеяло, собранное из обломков совершенно разного происхождения.

Нарисованная выше картина происхождения пород Северо-Западных территорий Канады — первые песчаники, образовавшиеся из песков, отложившихся вдоль окраины континента из расположенного восточнее источника, затем вулканические осадки с запада — является очень упрощенной. В действительности эти породы были метаморфизованы, смяты в складки и рассечены многочисленными разломами. Все это чрезвычайно затруднило реконструкцию их первоначального расположения. Складкообразование, разломы и смещение пород вдоль них, да и метаморфизм — все это почти несомненно было следствием движения континентальных и вулканических блоков, которое сопровождалось эпизодом горообразования. Эта территория во всех своих геологических аспектах — тип складчатости, полосы метаморфических пород, протягивающиеся параллельно древним береговым линиям, типы и последовательности (серии) пород — напоминает современные области столкновения тектонических плит и горообразования. Но, как уже отмечалось выше, в наше время на этой территории Канады горные цепи отсутствуют, сейчас это почти плоская страна с сильно сглаженным рельефом. И опять нам напомнили, что по шкале геологического времени Земля — очень динамичное место.

В горных районах эрозия сносит от 1 до 1,5 метра разрушенного материала горных пород каждые тысячу лет. При такой скорости даже Эверест оказался бы смытым до уровня моря за 5–8 миллионов лет. Но, однако, дело

обстоит не так просто, поскольку, по мере того как гора размывается эрозией, ее склоны становятся более пологими и вследствие этого скорость эрозии уменьшается. Частью по этой причине гора Эверест и остальные Гималаи будут еще существовать (хотя и станут более пологими) гораздо дольше, чем следует из современной средней скорости эрозии. Но еще большее значение имеет тот факт, что горы немного похожи на корабли, плавающие в океане: если убрать часть груза, корабль несколько всплывет над уровнем моря. Точно так же, по мере того как горные породы разрушаются и их материал уносится эрозией, земная кора чуть-чуть «всплывает» из лежащей ниже мантии. Если эрозия уносит один метр породы, то ответом Земли на уменьшившийся вес коры будет ее поднятие, таким образом, фактическое уменьшение высоты коры составит всего около 20 сантиметров. По этой причине для того, чтобы типичная большая горная страна была смыта до уровня моря, потребовалось бы, вероятно, от 50 до 60 миллионов лет, хотя это и не особенно долгий срок в масштабах геологического времени. Скалистые горы, Альпы или Гималаи — все они в конце концов исчезнут, но все они оставят память о себе и об истории своего образования и разрушения в толщах сохранившихся пород.

Событие, в результате которого возник ныне исчезающий горный хребет в Северо-Западных территориях Канады, произошло около 1,9 миллиарда лет назад. Но это было лишь одно из многих таких столкновений плит. Уже 1,6 миллиарда лет назад, почти в середине протерозойской эры, большая часть плиты, составляющей сейчас Северную Америку, была собрана из более мелких фрагментов в суперконтинент, который геологи, изучавшие эти породы, называли Лаврентия. Пол Хоффман написал работу об этом процессе и озаглавил ее «Соединенные

плиты Америки». Этот среднепротерозойский суперконтинент включал также Гренландию, северную часть Британских островов, а также куски Скандинавии и северной России.

В других частях мира происходили сходные события. Большинство современных континентов содержит мелкие фрагменты архейской коры, спаянные с другими архейскими и протерозойскими фрагментами в зонах столкновения плит. Вполне возможно, хотя пока и не доказано, что практически все современные континенты в конце протерозоя соединялись между собой, образуя один поистине гигантский континент. Часть данных о нем связана с поясом метаморфических пород, который протягивается вдоль восточной части Северной Америки от полуострова Лабрадор до Мексиканского залива. Возраст этих пород колеблется между 1,2 и 1,0 миллиардом лет. В совокупности их называют провинцией Грэнвиль (рис. 4.3). Они выходят на поверхность в восточной Канаде и в Адирондакских горах штата Нью-Йорк, но присутствуют также под покровом осадочных пород на протяжении большей части Восточных Штатов. Породы провинции Грэнвиль являются памятником мощного столкновения между двумя крупными континентами, из которых нынешняя Северная Америка располагалась на западе, а то, что сейчас составляет Южную Америку, — которая сама была соединена с большинством других континентов, — на востоке. Этот брак между Северо-Американским континентом и другим большим континентом длился несколько сот миллионов лет, пока они снова не начали отходить друг от друга около 800 миллионов (0,8 миллиарда) лет назад — все еще в протерозое. Их раздвиг оставил полосу Грэнвильских пород вдоль восточного края Северной Америки. Как мы увидим в главе 8, еще одна полоса континентальной плиты присоединилась

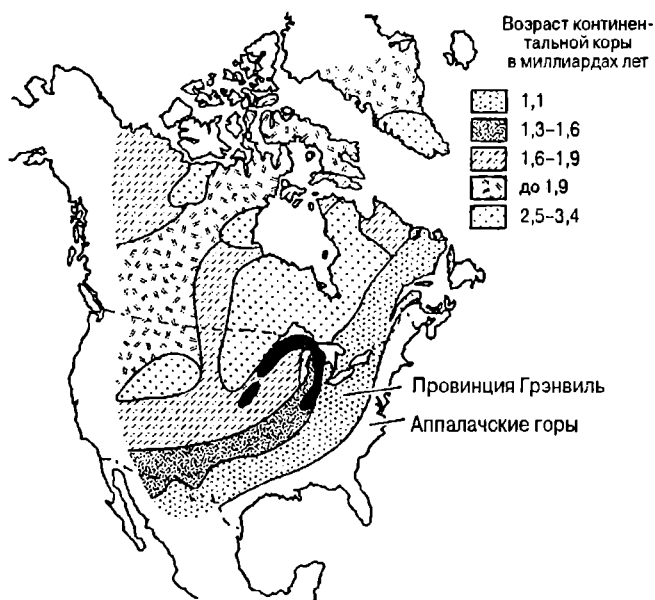


Рис. 4.3. Обобщенная возрастная карта Северной Америки, составленная на основе многих сотен конкретных определений абсолютного возраста пород, показывает, что континент состоит из нескольких крупных кусков коры и в общем смысле становится все моложе изнутри наружу. Как провинция Грэнвиль, так и Аппалачская провинция хранят в своем геологическом строении эпизоды горообразования гималайского типа, когда крупные континенты, располагавшиеся восточнее, столкнулись с Северной Америкой, чтобы снова отколоться в более позднее время. Большая часть материала, добавленного во время этих столкновений, сохранилась в виде осадочных пород, фрагментов вулканических островных дуг или частей морского дна, которые изначально разделяли сближавшиеся континенты, хотя отдельные части сталкивающихся материков иногда сохранялись после того, как эти материки позднее разделились. Рис. 8.2 показывает, как этот процесс мог действовать при формировании Аппалачских гор. Темно-серого цвета структура в форме конского копыта, простирающаяся через большую часть Озера Верхнего, — это несостоявшийся протерозойский рифт, который обсуждается в тексте.

к Северной Америке даже еще позднее, в результате процесса, весьма похожего на тот, который образовал провинцию Грэнвиль. Эта полоса называется сейчас Аппалачскими горами. Все эти различные фрагменты коры, которые сейчас составляют Северо-Американский континент, показаны в виде карты на рис. 4.3.

Отметим, что собирающийся из кусков Северо-Американский континент так и не пережил протерозойскую эру нетронутым. На рис. 4.3 виден большой шрам континентальной коры в форме конского копыта, протянувшийся дугой через район Великих Озер с двумя ветвями, или руками, направленными на юг, в центр континента. Это рифт, след незавершенного разделения континентов, случившегося между 1,3 и 1,2 миллиарда лет назад. Хотя этот рифт сейчас заполнен более молодыми породами, он четко определяется по типам пород, которые встречаются в нем. Это базальты — характерная особенность тех мест, где кора разрывается и расходится в стороны, и осадки характерного состава, заполняющие рифтовые долины. В некоторых местах, например вокруг озера Верхнего, эти породы выходят на поверхность, в других местах они погребены и отмечаются в кернах буровых скважин. Кроме того, поскольку базальтовые породы рифта имеют высокую плотность и высокое содержание железа, их наличие сильно отражается на характере как гравитационного, так и магнитного полей. Поэтому местоположение и границы рифта можно определить по результатам геофизических работ, проведенных на поверхности, — даже в тех местах, которые целиком закрыты позднейшими осадками. Как же мог образоваться этот огромный рифт, протянувшийся почти на 2000 километров в длину и местами более чем на 100 километров в ширину и содержащий огромные объемы базальтовых лав? Почти несомненно, он возник в результате воздействия столба горячего

вещества, внедрившегося из мантии и пронзившего континентальную кору Северо-Американского континента. В наше время такие столбы горячего вещества мантии, поднимающиеся со дна океанов, являются причиной мощного вулканизма Гавайских островов и Исландии. Более подробно о них рассказывается в следующей главе. Однако Северная Америка оказалась слишком пластичной, чтобы расколоться под воздействием даже столба раскаленных пород, поднявшегося из мантии, и даже оставшись со шрамом, она все же избежала раскола на части.

ПРОТЕРОЗОЙСКОЕ БИОЛОГИЧЕСКОЕ ЦАРСТВО

Насколько нам вообще известно, в течение большей части протерозойской эры на фоне образования континентов, их столкновения и раскола на части в биосфере — этом царстве живых существ — произошло удивительно мало изменений. Даже в начале кембрийского периода континент отнюдь не были раем для развития жизни. Хотя уже существовали морские водоросли, а на континентах, возможно, жили даже некоторые примитивные многоклеточные организмы, поверхность суши была почти совсем пустынной и бесплодной по сравнению с нашим временем.

В предыдущей главе мы узнали, что уже в архее существовали одноклеточные организмы, от которых сохранились редкие остатки. По-видимому, это были бактерии и цианобиты (известные также как сине-зеленые водоросли) — клетки, не имеющие ни ядра, ни других важных внутриклеточных структур, свойственных более развитым формам жизни. Их называют *прокариотами*. Строматолиты состояли из прокариот; мы уже отметили выше,

что они являются, по-видимому, самыми характерными ископаемыми остатками протерозоя. Вплоть до середины протерозойской эры прокариоты были, пожалуй, единственными обитателями морей. Но затем случилось нечто удивительное. В настоящее время все согласны с тем, что следующий шаг к развитию сложных организмов, а именно *эукариотовых* клеток, или *эукариотов*, имеющих различные внутриклеточные структуры, произошел в момент, когда прокариотная клетка поглотила другую с намерением, как полагают, съесть ее. Но поглощенная клетка вопреки ожиданиям не поддалась и продолжала жить внутри поглотившей ее в счастливом симбиозе, постепенно изменяясь и приспосабливаясь к такому существованию. Хорошим примером такой внутриклеточной структуры является хлоропласт — структура, существующая в некоторых отдельно живущих эукариотных клетках и в клетках развитых растений, в которых уже осуществляется фотосинтез. Хлоропласты в высшей степени напоминают слегка изменившиеся цианобактерии, или одноклеточные сине-зеленые водоросли. Клетки, имеющие внутреннюю структуру и почти наверняка являющиеся эукариотами, впервые появились в ископаемой летописи около 1,4 миллиарда лет назад.

Удивительно, что даже после появления эукариотных клеток не произошло немедленного взрывного развития многоклеточных животных. На это потребовалось много сотен миллионов лет — гораздо больше, чем прошло от появления на Земле динозавров до наших дней. Несколько ископаемых организмов, являющихся, по-видимому, многоклеточными водорослями, обнаружены в породах возрастом в 1,3 миллиарда лет, но в породах старше 1 миллиарда лет никаких следов многоклеточных животных не найдено. И даже после этого времени дальнейшее развитие было чрезвычайно медленным вплоть до «Кем-

брийского взрыва», описанного в одной из последующих глав. Почему же для развития на Земле сложных форм жизни потребовалось так много времени? Этот вопрос ставил в тупик даже Дарвина, хотя он не осознавал, насколько в действительности огромен был промежуток времени до кембрия. Он продолжает озадачивать ученых, которые изучают развитие жизни на Земле. Конечно, частично ответить на этот вопрос можно, если вспомнить неполноту ископаемых остатков для докембрийского времени. В то время организмы еще не развили твердых минерализованных частей тела — вроде зубов, щитков, скелетов, которые защищают организм от хищников и довольно хорошо сохраняются в породах. Во всех известных случаях докембрийские организмы не имели твердых частей. В сущности, до самых 1950-х годов палеонтологами не было открыто *ни одного* неоспоримого доказательства существования жизни в докембрийское время, несмотря на все их энергичные попытки. У нас, возможно, все еще отсутствуют данные о некоторых решающих моментах эволюции более развитых организмов. Но даже если это и так, развитие жизни в самый ее начальный период, несомненно, представляло собой очень медленный процесс, по сравнению с последующими темпами эволюции. Причина этого пока неизвестна, что добавляет эту загадку к числу многих тайн, делающих изучение истории Земли таким увлекательным делом.

Глава 5

ТАНЕЦ ПЛИТ

Лет тридцать или сорок тому назад некоторые идеи, высказанные в предыдущей главе, в частности, мысль о том, что в течение протерозоя континенты раскалывались и расходились в стороны или спаивались вместе, многим геологам показались бы просто скандальными. Сегодня такие описания принимаются как должное. В последние годы развитие теории тектоники плит полностью изменило представление геологов о Земле. Прежде чем продолжить наше путешествие по геологической истории, стоит коротко рассмотреть эволюцию самой тектоники плит и наше современное представление о движении континентов по поверхности Земли.

Большинство людей, вдумчиво рассматривавших карту мира, в центре которой обычно располагается Атлантический океан, замечали, что, если его удалить, контуры его береговых линий совпали бы. Несмотря на тот факт, что тысячи людей должны были заметить эту особенность, лишь в начале двадцатого века стали серьезно обдумывать последствия этого наблюдения. Именно тогда Альфред Вегенер, немецкий метеоролог, стал собирать и изучать сведения о флоре и фауне континентов, разделенных Атлантическим океаном. Он также тщательно исследовал все, что было тогда известно об их геологии и палеонтологии, о найденных на них ископаемых остатках организмов. Проанализировав полученные данные, Вегенер пришел к неизбежному выводу, что различные

континенты, включая Южную Америку и Африку, в далеком прошлом составляли одно целое. Он открыл, например, что некоторые черты геологического строения Южной Америки, которые резко обрываются береговой линией Атлантического океана, имеют как бы продолжение в Африке, и когда он, вырезав из карты, сдвинул эти континенты навстречу друг другу, как кусочки гигантской головоломки, то геологические особенности этих континентов совпали, как бы продолжив друг друга. Он также обнаружил, что существуют геологические признаки древнего оледенения, охватившего примерно в одно и то же время Австралию, Индию и Южную Африку. Он также обнаружил, что можно совместить эти континенты таким образом, что районы их оледенений образовали бы единую площадь. В 1915 году он опубликовал (в Германии) книгу, озаглавленную «Происхождение континентов и океанов», в которой очень подробно рассмотрел эти доказательства и выдвинул свою теорию «континентального дрейфа». И все же, несмотря на массу собранных геологических данных, Вегенер проглядел многие важные детали и весьма вольно отбирал факты в поддержку своей гипотезы. Частью по этой причине его гипотезу не приняли в то время всерьез. Более того, выдающиеся физики того времени объявили, что внешние части Земли слишком жестки, чтобы позволить континентам дрейфовать подобно кораблям в море. В частности, они указали, что те силы, которые призвал Вегенер, чтобы передвигать континенты, — центробежные силы, возникающие в результате вращения Земли вокруг своей оси, — слишком слабы для такой работы. Идеи Вегенера «пошли ко дну» из-за отсутствия подходящего механизма: было сказано, что без подходящей движущей силы дрейф континентов невозможен.

И все же Вегенер был на правильном пути. Пускай и не совсем так, как он предполагал, но континентальный дрейф оказался реальностью. Как и предполагал Вегенер, Африка и Южная Америка действительно в древности соединялись друг с другом. По крайней мере один раз за всю историю Земли *все* современные континенты соединялись, образуя один сверхконтинент, который протягивался от полюса до полюса. Континентальный дрейф Вегенера рассматривается в учебниках геологии, его преподают в институтах, он образует фундамент многого из того, что сейчас понято в механизмах работы Земли. Сегодня это называется тектоникой плит.

ФАКТЫ, ДОБЫТЫЕ С ОКЕАНСКОГО ДНА

Возрождение идей Вегенера в виде теории тектоники плит произошло главным образом в результате исследований океанского дна, выполненных в 1950-е и 1960-е годы. Во время и после Второй мировой войны Военно-Морской флот США был очень заинтересован в том, чтобы узнать об океанском дне как можно больше. Геологи и геофизики с готовностью включились в эту работу — одни, возможно, из патриотических побуждений, но многие потому, что увидели в интересе Флота золотую возможность узнать больше об океанском дне. В то время это был передовой край науки, ведь дно океанов было практически неведомой территорией. Даже в более позднее время многие геологи любили говорить, что мы больше знаем об обращенной к нам поверхности Луны, чем о морском дне. Флотское начальство оказалось щедрым, и океанографические исследования быстро расширялись. Результаты их по большей части были засекречены, но сделанные открытия подтолкнули науку о Земле

к новому и более качественному пониманию протекающих в Земле процессов.

Одним из поразительных результатов интенсивного исследования дна океанов стали новые знания о его топографии. Конечно, кое-какая информация, собранная за долгую историю морских путешествий, уже имелаась. Самые первые измерения производились очень просто — бросали за борт измерительный трос (лот) и отмеряли длину вытравленного троса, но эти данные были ограничены мелководными, прибрежными районами моря, где в основном было сосредоточено мореходство. Появившиеся на кораблях в 20-х годах эхолоты были еще очень несовершенны и широко распространились значительно позже. Именно с их помощью в 1950-е и 1960-е годы была собрана обширная информация об океанском дне. Проведенные тогда измерения позволили определить с высокой точностью продолжительность времени, необходимого для прохождения звукового импульса от корабля до морского дна и обратно. Так как скорость звука в морской воде хорошо известна, то по времени прохождения звукового импульса легко вычислить глубину моря. Вся прелесть эхолота заключается в том, что он может работать непрерывно, день и ночь, независимо от того, что делает корабль. В каждой океанографической экспедиции эхолот работал постоянно; в результате стали проясняться детали строения океанского дна.

Сегодня гораздо легче картировать топографию океанского дна — это можно сделать с помощью спутников, даже не посылая корабли в море. Спутники очень точно измеряют «высоту» морской поверхности. После того как учтено влияние приливов и волн и введены соответствующие поправки в исходные измерения, появляется удивительная картина. Различия в уровне моря от места к месту в точности отображают топографию морского

дна. Это объясняется тем, что мелкие вариации земного притяжения, обусловленные рельефом дна, — например, избыточная масса крупного вулкана или, наоборот, дефицит массы из-за наличия глубокого рва — влияют на уровень поверхности моря над ними. Эта сравнительно новая технология позволила обнаружить некоторые особенности дна, которые были неразличимы при исследовании с кораблей.

Но вернемся к информации о топографии морского дна, собранной океанографическими кораблями в 50-х и 60-х годах. Скоро после начала работ стало совершенно ясно, что дно океанов по своему рельефу и другим особенностям отнюдь не так однообразно, как это представлялось. По общему мнению, глубокие моря рассматривались как геологически спокойные, не подверженные изменениям места, где с начала времен слой за слоем откладывались тонкий ил и другие осадки, смываемые с континентов. Лишь немногие исследователи пробовали глубже задуматься над этой картиной, поскольку если бы она была верна, то количество накопившихся в океане осадков было бы огромно. Однако по мере поступления материала об океанском дне стало очевидно, что вместо плоского, лишённого каких-либо особых примет дна глубоких морей, прикрытого покровом осадков, на нем обнаружились огромные хребты, глубокие рвы, крупнейшие вулканы и крутые обрывы. Наукс был брошен вызов, необходимо было немедленно разобраться, каким образом могли возникнуть такие особенности морского дна.

Многие из читателей, вероятно, видели популярные карты мира, впервые изданные Национальным географическим обществом, на которых показан рельеф не только суши, но и дна морей и океанов. Хотя они до некоторой степени идеализированы, наиболее бросающейся в глаза особенностью этих карт являются огромные

хребты, или поднятия, выступающие над средним уровнем дна. Уже говорилось о том, что если бы из океанов удалить воду, то именно эти черты рельефа Земли были бы в первую очередь заметны при взгляде из космоса. Особенно выделяется на картах горный хребет, протянувшийся по оси Атлантического океана, что частично обусловлено тем, что этот океан обычно расположен на картах в центре. Срединно-Атлантический хребет рассекает океан точно посередине, повторяя все выступы и впадины береговой линии на каждой его стороне, и таким образом грубо рассекая карту на две половины. В среднем он возвышается приблизительно на 2,5 километра над наиболее глубокими частями океана, расположенными к западу и к востоку от него; на большей части его протяжения как раз по осевой линии проходит рифт, то есть ущелье или долина с крутыми склонами. В северной части Атлантического океана Срединно-Атлантический хребет поднимается над поверхностью океана, образуя остров Исландию.

Хребет, рассекающий Атлантику, является фактически лишь частью более или менее непрерывной системы хребтов, которая протягивается через все океаны. Она окружает антарктический континент, протягивается двумя ветвями в Индийский океан и до Аравийского моря. Она изгибается вдоль берегов восточной части Тихого океана и, кажется, заканчивается тупиком недалко от нижней Калифорнии в Мексике, но затем небольшой сегмент ее появляется снова у берегов северо-западной части Соединенных Штатов и Британской Колумбии. Каково происхождение этой системы океанических хребтов, являющихся такой заметной особенностью Земли? Почему она не оказалась погребенной под покровом осадков, вынесенных из континентов? И какую связь она имеет с дрейфом континентов и тектоникой плит?

Наблюдение, которое, как считается, породило вспышку интуиции, прояснившей происхождение системы океанических хребтов и в конце концов приведшее к разработке теории тектоники плит, пришло из совершенно неожиданного источника, а именно из исследования магнитных свойств пород океанического дна. В своих попытках узнать как можно больше о морском дне геофизики в числе других показателей измеряли магнитные поля вдоль многочисленных маршрутов экспедиционных кораблей. Было уже известно, что горные породы, содержащие магнитные минералы, могут несколько изменять земное магнитное поле над ними, а на континентах измерения интенсивности магнитного поля проводились с целью поисков полезных ископаемых и для решения задач геологического картирования. Многие промышленные месторождения полезных ископаемых содержат в высоких концентрациях магнитные минералы; их присутствие создает характерные аномалии регионального магнитного поля. Следует отметить, что на континентах структура магнитного поля обычно очень сложна, в соответствии со сложной геологией. В противоположность этому, когда впервые позади океанологических кораблей стали буксировать магнитомеры, было обнаружено, что рисунок магнитных аномалий на дне океанов, отражающий магнитные свойства пород океанского дна, отличается замечательной закономерностью. Это наблюдение впервые было сделано учеными из Института океанографии Скриппса; оно весьма их озадачило. Когда они проводили морскую магнитную съемку в районе северо-западного побережья Соединенных Штатов еще в 1950-е годы, оказалось, что узоры магнитных карт, которые они получили, резко отличались от всего, что они видели на континентах. В конце концов был сделан вывод, что закономерный рисунок локальных магнитных аномалий

был, вероятно, каким-то образом связан с довольно правильным рисунком рельефа морского дна в этом районе с характерным чередованием удлинённых параллельных низкогорий и долин. Однако эта гипотеза продержалась очень недолго. Проведенная в 60-х годах воздушная магнитная съёмка на территории Атлантического океана как раз к югу от Исландии принесла поразительные, ставшие с тех пор классическими, результаты. В серии параллельных маршрутов, пересекающих ось Срединно-Атлантического хребта, ученые из Геологической обсерватории Ламонта из Колумбийского университета обнаружили, что узоры магнитного поля над морским дном изменяются симметрично относительно осевой линии хребта. Более того, они нашли, что график изменения магнитного поля вдоль маршрута, пересекающего хребет, был на разных маршрутах в основном одинаков. Когда эти данные (то есть местоположения точек замера и измеренные значения интенсивности магнитного поля) были нанесены на карту и проведены изолинии (линии равных значений характеристик магнитного поля), то они образовали полосатый зеброподобный узор на карте интенсивности магнитного поля, напоминающий узор, открытый учеными Института Скриппса в северо-восточной части Тихого океана, но отличающийся от последнего явной симметрией (рис. 5.1). И в этом случае поража́л контраст с характером поля над континентами. По мере дальнейшего накопления данных становилось все более ясно, что эта симметрия узора магнитного поля встречается *повсюду* вдоль системы океанических хребтов.

Когда изверженные породы охлаждаются из исходного расплавленного состояния, некоторые железосодержащие минералы, образующиеся в них, магнетизируются земным магнитным полем. Это выглядит так, словно сами минералы содержат крохотные магнитные стерженьки —

наподобие компасных игл, — и все они ориентируются одинаково под воздействием окружающего магнитного поля Земли. Эта магнитизация является непрерывным во времени процессом; таким образом, график магнитного поля вдоль маршрута, пересекающего хребет, является как бы ископаемой записью изменений магнитного поля во время образования пород разных частей графика. Эта запись оказывается весьма стойкой и сохраняется в течение долгого времени. Геолого-геофизические съемки вдоль маршрутов, ориентированных перпендикулярно простиранию Срединно-Атлантического хребта, показали, что породы, находящиеся точно над осью хребта, сильно намагничены в направлении современного магнитного поля, как и следовало ожидать. Но симметричный зеброобразный узор магнитного поля, по-видимому, указывает, что морское дно намагничено по-разному в разных полосках, параллельных протяжению хребта. Некоторые из этих полос намагничены нормально, подобно полоскам, лежащим на оси хребта: направление их намагниченности соответствует ориентировке современного магнитного поля Земли. Но они чередуются с полосками, намагниченными противоположным образом, как если бы в то время, когда эти полосы возникали, северный и южный полюсы Земли поменялись местами.

Земное магнитное поле имеет строение так называемого диполя, то есть подобно полю, которое получилось бы, если бы в немагнитную Землю вставить гигантский магнитный стержень. В то время, когда проводились первые магнитные съемки морского дна, у большинства ученых не было никаких оснований полагать, что в геологическом прошлом магнитное поле Земли очень отличалось от современного. Однако приблизительно в это же время исследования намагниченности горных пород

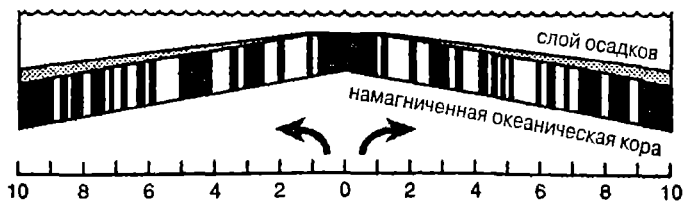
Исландия



10 миллионов лет
назад

10 миллионов лет
назад

поверхность моря



миллионы лет назад

на континентах обнаружили загадочное явление. Было установлено, что в некоторых районах, в которых накопились мощные толщи базальтовых потоков, большая часть потоков имеет направление намагничивания, соответствующее ориентировке изолиний земного магнитного поля, но в других потоках направление намагничивания оказалось прямо противоположным. Первоначально полагали, что причиной этого явления был какой-то вторичный процесс, но когда аналогичная последовательность лавовых потоков с прямой и обратной намагниченностью была обнаружена в нескольких различных местностях, ученые поняли, что *магнитное поле Земли в течение геологического времени неоднократно меняло свою полярность!* Это был ошеломляющий вывод. На фоне этого открытия симметричное расположение меняющихся по своей полярности магнитных полос на морском дне приобрело большое значение. Хотя они, возможно, и не восклицали «Эврика!», но несколько исследовате-

←

Рис. 5.1. Магнитный узор морского дна южнее Исландии (верхняя схема) напоминает ряд полос зебры и состоит из чередующихся полос нормального (черное) и обращенного (белое) намагничивания, располагающихся параллельно простиранию Срединно-Атлантического хребта. Во время своего излияния вдоль хребта и последующего затвердевания базальт намагничивается под воздействием магнитного поля Земли и затем расходится в стороны от разлома, как показано схематически на нижней части рисунка. На карте магнитных свойств морского дна видны только более долгие промежутки времени между обращениями полярности. Предполагаемое положение хребта, пересекающего Исландию, показано более крупным узором на сером фоне. Составлено по рисунку 1 из статьи Дж. Р. Херцлера, Кс. Ле Пишона и Дж. С. Бэррона в журнале «Глубоководные исследования» (Deep Sea Research), том 13, стр. 428 (1966). Использовано с любезного разрешения компании Элсвир Сайенс Лимитед. The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, OX5 1GB, U.K.

лей — Лоренс Морли в Канаде, а также Фрэд Вайн и Драммонд Мэтьюз в Соединенном Королевстве — почти одновременно поняли, что магнитные полосы морского дна, колебания направления полярности на 180 градусов и дрейф континентов — все эти явления являются взаимосвязанными. Они неожиданно сообразили, что зебробразный узор распределения намагниченности горных пород морского дна отражает ту же последовательность смены полярности земного магнитного поля, что и континентальные базальты.

Эти наблюдения убедили большинство геологов, что раздвиг морского дна в стороны от океанических разломов — это реальность. Новая океаническая кора образуется лавой, непрерывно поступающей с глубины в осевых частях океанических хребтов. Магнитный узор пород морского дна симметричен по обе стороны оси хребта потому, что вновь поступившая порция лавы намагничивается при своем застывании в твердую породу и равномерно расширяется по обе стороны от срединного разлома. Морское дно, таким образом, работает, как гигантский магнитофон, точно записывающий смену направления напряженности земного магнитного поля (рис. 5.1). Поскольку даты различных обращений были известны в результате анализа горных пород на суше, магнитные полосы океанского дна можно было использовать как метки. Скорость возникновения новой порции морского дна можно очень просто рассчитать, измерив расстояние от центра — точнее, оси хребта, где возраст морского дна всегда равен нулю, к полосам, соответствующим различным датированным обращениям поля. Геологи называют эти магнитные полосы магнитными аномалиями и для удобства ссылок на них дали им номера. Для тех, кто с ними работает, эти аномалии стали добрыми друзьями. «Ага, это похоже на Аномалию 29Р!»

(буква Р обозначает обращенную, то есть с обратным направлением намагниченности, а N — аномалию с нормальным, соответствующим современному направлению поля).

Хотя скорость образования морского дна и варьируется от места к месту, ее величина, вычисленная по магнитным аномалиям, составляет в основном несколько сантиметров в год. Она примерно соответствует скорости роста ваших ногтей — не так уж быстро, но в то же время заметно, если время от времени будете забывать подстригать их. Континенты, расположенные по разные стороны Атлантического океана, с этой скоростью движутся в разные стороны, отдаляясь друг от друга, что объясняет, почему океаны не заполнены доверху осадками: в геологическом смысле они очень молоды. Хотя несколько сантиметров в год — это действительно очень медленно, весь Атлантический океан при такой скорости мог образоваться за двести миллионов лет, не так уж много по геологическим меркам. На самом деле дно любого из существующих мировых океанов не намного старше. По сравнению с континентами породы океанского дна просто младенцы.

По обе стороны Атлантического океана континенты прочно прикреплены к породам океанского дна. Они расходятся в стороны со скоростью, зависящей от скорости образования новой порции морского дна на оси Срединно-Атлантического хребта. В силу этого механизма возражения физиков против вегенеровского понимания континентального дрейфа оказываются, в сущности, недействительными, поскольку континенты в своем движении не пропахивают себе путь через твердые породы океанского дна; и континенты и океаническая кора движутся вместе, как одно целое, являясь частями одной литосферной плиты (рис. 1.2 и 5.2).

ТЕКТОНИКА ПЛИТ

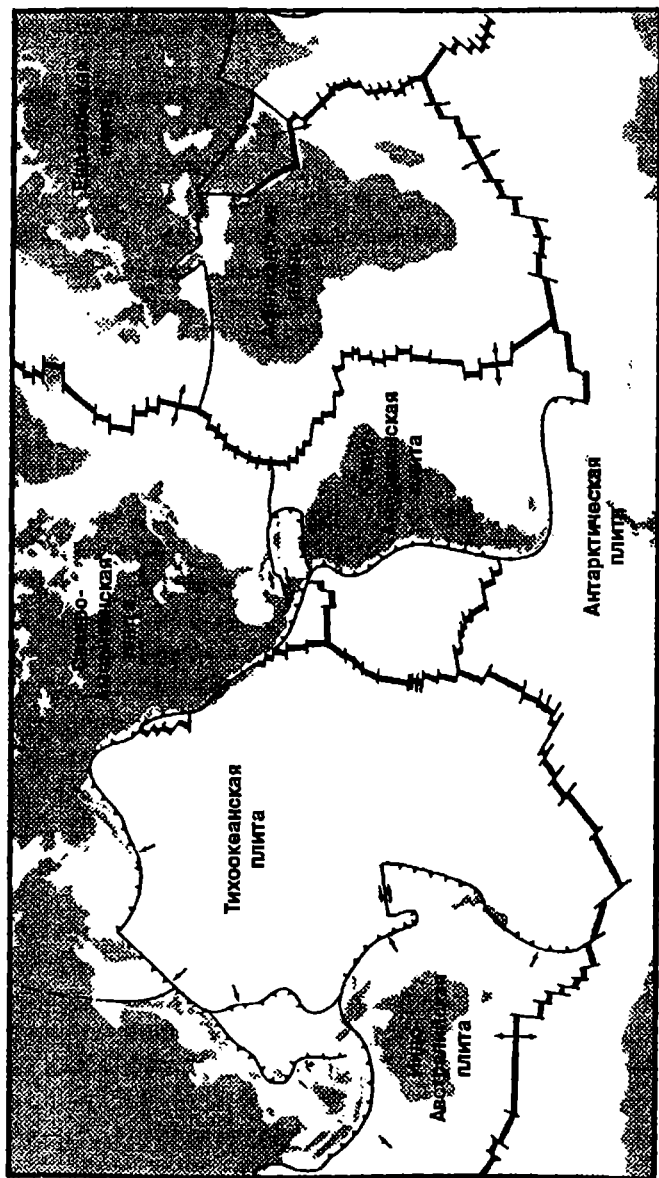
Существование узора магнитных аномалий морского дна и понимание описанного выше процесса их образования окончательно решили проблему континентального дрейфа. Этот термин был быстро заменен в равной степени описательным, но более точным выражением «раздвиг морского дна». 1960-е годы были трудным временем для геологов — развитие идей о расширении морского дна и его последствий некоторые называли даже революцией и сравнивали с подъемом в физике, вызванным появлением теории относительности и квантовой механики. Все следствия факта раздвига морского дна были быстро выведены как теоретиками, пытавшимися объяснить этот процесс математически, так и экспериментаторами, которые, используя все более изощренные приборы, проводили измерения с целью проверки математических теорий. Многие еще недавно малопонятные явления вдруг стали казаться совершенно естественными в контексте теории раздвига дна океанов. Вскоре после этого и раздвиг морского дна, и дрейф континентов были вписаны в более широкую и далеко идущую теорию, которая получила название теории тектоники плит.

Что же в сущности представляет собой эта теория плит и почему ей уделяется столько внимания в науке о Земле? На самом простейшем уровне это как бы глобальная рама, или основа, в которой протекают почти все геологические процессы нашего времени, и с помощью которой можно понять бóльшую часть истории Земли. Конечно, есть еще много деталей, которые нельзя объяснить с помощью тектоники плит, но пока неясно, вытекает это из недостатков самой теории или мы просто не до конца понимаем все процессы. Тем не менее в общем и целом теория тектоники плит является очень мощным

инструментом, облегчающим наше понимание того, как работает Земля.

Слово «тектоника» происходит от греческого «тектон», означающего «строитель» или «плотник». Плитами в тектонике плит называют куски литосферы, то есть сравнительно жесткой внешней оболочки Земли, которая в среднем простирается на глубину до 100 километров (рис. 1.2), хотя местами бывает толще или тоньше. В настоящее время различают десять плит среднего и большого размера и значительно больше «микроплит» (рис. 5.2). Как отмечалось выше, по поверхности Земли движутся не континенты, а литосферные плиты. Континенты и океаны — это только попутные пассажиры. Плиты могут перемещаться в силу того, что внутренняя часть Земли имеет высокую температуру и может пластически деформироваться и течь. Трудно представить себе, чтобы обычные породы вели себя так пластично, но полезно вспомнить, что другие твердые вещества, которые мы в повседневной жизни считаем хрупкими, также становятся текучими, если их подвергнуть умеренным давлениям в течение длительного промежутка времени, например, лед ледников. Основание плит находится на такой глубине, где породы пребывают практически в диапазоне своей температуры плавления и трение между относительно жесткой литосферой и подстилающей ее мантией почти минимально.

Механизм движения плит, их действительная движущая сила все еще до конца неизвестны. Но это больше не является поводом для осмеяния, как было во времена Вегенера. Мы знаем, что плиты действительно перемещаются; мы можем даже, чтобы доказать этот факт, с помощью спутников достаточно точно измерить, как изменяется расстояние между двумя точками на разных плитах и даже определить скорость перемещения плит.



Мы знаем также, что требующаяся для движения плит энергия исходит в конечном итоге из самой Земли, как вследствие ее продолжающегося охлаждения из первоначального горячего состояния, так и от тепла, создаваемого в результате радиоактивного распада урана и тория, распределенных во всей массе Земли. Это тепло переносится к поверхности путем медленной, происходящей в твердом состоянии конвекции и в конце концов рассеивается в космическом пространстве. Сцепление между горячей, конвектирующей мантией и более холодной жесткой литосферой тоже, вероятно, частично обуславливает движение плит.

Большая часть геологического представления происходит у границ между плитами. Сюда входят вулканизм, землетрясения, горообразование, метаморфизм и даже образование многих типов промышленно важных месторождений полезных ископаемых. Но не все края плит ведут себя одинаково. Рисунок 5.2 показывает, что в одних местах плиты расходятся в стороны, в других они сталкиваются, а в некоторых местах они просто скользят друг мимо друга. Поскольку не существует никакой независимой системы отсчета для изучения движения плит, нам известны только их относительные движения. Можно, конечно, стать на краю какой-нибудь плиты и определить, движется ли соседняя с ней плита в нашу сторону или от нее, но мы никак не можем определить их абсолютные направления движения.



Рис. 5.2. Карта мира, показывающая расположение главных литосферных плит. Каждая плита окружена океаническими хребтами, от осей которых идет растяжение (жирные линии), зонами столкновения и субдукции (зазубренные линии) и/или трансформными разломами (тонкие линии). Названия приведены только для некоторых из самых крупных плит. Стрелки указывают направления относительных движений плит.

Границы плит классифицируются в зависимости от типа относительного движения плит вдоль этих границ. Каждая граница имеет свои особые характеристики. Например, на границах различного типа образуются разные породы. Распознавание их стало особенно важным для ученых, стремящихся заглянуть в прошлое, поскольку древние аналоги современных явлений могут быть определены на основе сохранившихся записей в геологической летописи.

РАСХОДЯЩИЕСЯ ПЛИТЫ

Там, где плиты расходятся друг от друга, в земной коре возникают рифты, то есть глубокие трещины. Базальт, наиболее обычный результат расплавления пород земных глубин, поднимается, чтобы заполнить их; как мы видели, именно таким образом образуется морское дно. Расходящиеся границы плит встречаются большей частью в океанах. Как ни парадоксально это может показаться с первого взгляда, рифты, проявляющиеся в рельефе Земли как долины или впадины, часто находятся как раз в осевой части океанических хребтов, представляющих собой широкие топографические поднятия, как это показано на рис. 5.3. Океанические хребты возникают в результате поднятия вещества мантии и сопутствующих термодинамических процессов. По мере того как вновь образовавшаяся кора отодвигается в стороны от хребта, она охлаждается, сжимается, уплотняется и опускается на меньшую высоту. Глубина океана здесь увеличивается приблизительно в два раза, от 2,5 километра до пяти, считая от осевой линии хребта до более древних частей океанского дна, далеко отстоящих от района раздвига плит.

Большинство современных океанических хребтов фактически зародились как рифты внутри континентов.

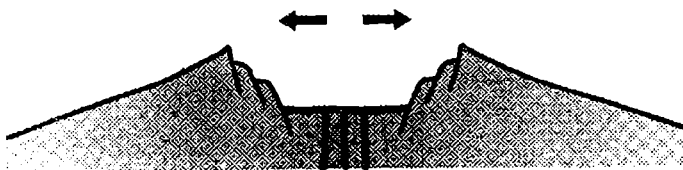


Рис. 5.3. Схематический поперечный разрез через среднеокеанский хребет, показывающий рифтовую долину внутри приподнятой центральной части хребта. Черные вертикальные линии обозначают проводники, через которые магма изливается из мантии на морское дно.

Начальной стадией этого процесса является образование глубокой, с крутыми стенками долины, отличающейся в типичном случае сильным вулканизмом. Таково было происхождение среднеконтинентального рифта, который почти расколол пополам Северную Америку в протерозое; современным примером такого раскола может служить Восточно-Африканская рифтовая долина. По мере продолжения раздвига полная активности континентальная кора, состоящая из пород, менее плотных по сравнению с базальтом, внедрившимся в рифт, в конце концов раскалывается на две части. Между ними вторгается море; таким образом возникает зародыш нового океанического бассейна. Именно так должен был протекать этот процесс, когда около 180 миллионов лет назад начал раскрываться Атлантический океан, отделяя Европу и Африку от Америки. В наше время начальные этапы расщепления континента можно наблюдать в Красном море, где Африка отделяется от Саудовской Аравии вдоль линии, являющейся продолжением системы хребтов Индийского океана. Все океанические бассейны мира возникли в результате рифтообразования; все они вымощены океаническим базальтом. Контраст между плотной корой океанов и более легкой, более плавучей корой

континентов является причиной разницы их высот над уровнем моря.

Вдоль океанических хребтов непрерывно возникает новое океанское дно и тут же симметрично отходит в стороны от разлома. В то время как очертания берегов континентов сохраняют свою узнаваемость на протяжении долгих промежутков геологического времени, география океанских бассейнов изменяется гораздо быстрее. Измеренные скорости раздвига около современных океанических хребтов колеблются от одного-двух сантиметров в год до двадцати. Даже если взять нижнюю границу этого интервала, то и в этом случае выходит, что за 100 миллионов лет может образоваться океанский бассейн шириной в 1000 километров.

СТОЛКНОВЕНИЕ ПЛИТ И ЗОНЫ СУБДУКЦИИ

Если постоянно возникает так много нового морского дна, а Земля не расширяется (и существует достаточно доказательств этого), тогда, чтобы компенсировать этот процесс, что-то на глобальной коре должно разрушаться. Именно это происходит на окраинах большей части Тихого океана. Здесь литосферные плиты сближаются, и на их границах одна из сталкивающихся плит погружается под другую и уходит глубоко внутрь Земли. Такие участки столкновения плит называются зонами субдукции (погружения, подныривания одной плиты под другую); на поверхности Земли они отмечаются глубокими океаническими рвами (желобами) и активными вулканами (рис. 5.4). Грандиозные цепи вулканов, образующие так называемое огненное кольцо, протянувшееся вдоль берегов Тихого океана, — Анды, Алеутские острова, а также вулканы Камчатки, Японии и Марианских островов —

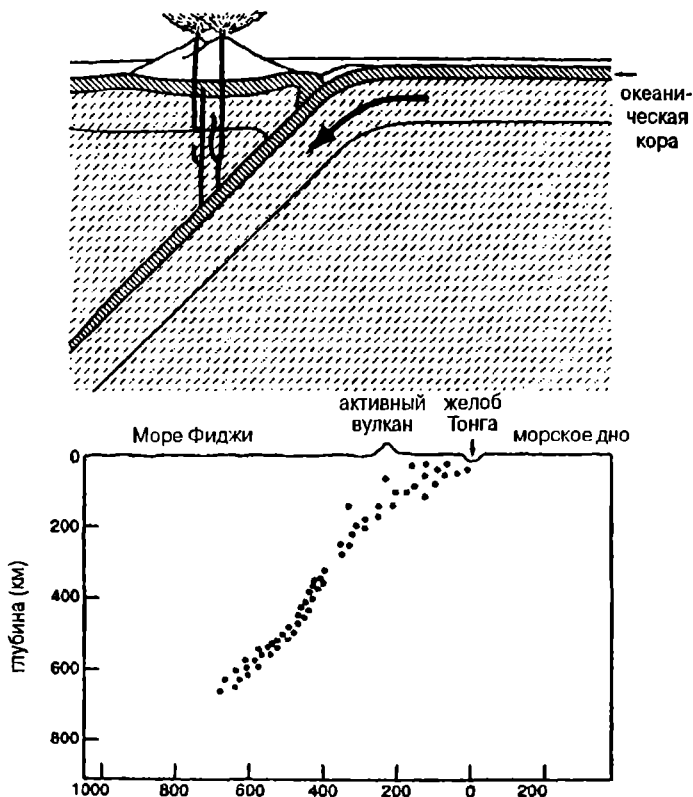


Рис. 5.4. Схематический поперечный разрез зоны субдукции (верхняя часть, не в масштабе) показывает литосферную плиту, опускающуюся в глубины мантии, и активные вулканы над нею. В нижней части рисунка точками изображены положения очагов землетрясений, зафиксированных под желобом Тонга в юго-западной части Тихого океана. В совокупности они отмечают расположение погружающейся плиты до глубины приблизительно 700 километров. Отметки на горизонтальной шкале показывают расстояние от желоба. Составлено с частичным использованием рисунка 4-10 из книги П. Дж. Уилли «Как работает Земля». Изд-во «Джон Уайли и Сыновья», 1976.

все они обязаны своим существованием явлению субдукции.

Никто не может точно сказать, как именно начинается субдукция, когда две плиты начинают сближаться, но ключом к их взаимодействию является, по-видимому, плотность пород. Плотная океаническая кора может подвергнуться субдукции, исчезнув в глубине Земли почти бесследно, в то время как сравнительно легкие континенты всегда остаются на поверхности. Вот почему дно океанов всегда молодо, а континенты стары: морское дно не только непрерывно образуется в разломах океанических хребтов, но и постоянно уничтожается в зонах субдукции. Как мы уже видели, отдельные части континентов имеют возраст почти четыре миллиарда лет, в то время как самые древние части морского дна не старше 200 миллионов лет. Один из первых пропагандистов идеи континентального дрейфа сравнил континенты с пеной, накапливающейся на поверхности кастрюли с кипящим супом, — живое, хотя не сказать, чтобы очень точное сравнение.

Реальность субдукции подтверждается землетрясениями, которые ее сопровождают. Хотя сейсмичность является характерной особенностью всех типов границ между плитами, только зоны субдукции отличаются глубокими землетрясениями, которые происходят на глубине 600 километров или более. Глубокие землетрясения были известны задолго до того, как тектоника плит приобрела популярность. В 1928 году японский сейсмолог К. Вадати сообщил о землетрясениях, происшедших под Японией на глубине нескольких сот километров. Приблизительно через двадцать лет другой геофизик, Хуго Бениоф, показал, что и в других частях света существуют «большие разломы», отмечающиеся частыми землетрясениями, которые погружаются глубоко в мантию из

океанских рвов, как бы продолжая их на глубину. Он описал несколько таких разломов, расположенных как вдоль западного побережья Южной Америки, так и на юго-западе Тихого океана в желобе Тонга. Эти области в то время не были интерпретированы как зоны субдукции и лишь позднее стало ясно, что эти гигантские плоско-наклонные зоны повышенной сейсмичности точно следуют по пути плит, погружающихся внутрь мантии (рис. 5.4). Землетрясения возникают потому, что погружающиеся в горячую мантию части океанических плит остаются сравнительно холодными, в противоположность окружающим их породам мантии, остаются даже на больших глубинах настолько хрупкими, что в них могут возникать трещины, порождающие землетрясения. Некоторые из самых глубоких землетрясений могут также возникать по той причине, что минералы в погружающихся частях плит становятся неустойчивыми в обстановке больших давлений, которым они там подвергаются, и разрушаются внезапно, образуя более плотные минералы, резко изменяя при этом свой объем.

В противоположность сравнительно спокойным прорывам базальтовой лавы вдоль осей расхождения плит, вулканизм, свойственный зонам субдукции, часто проявляется очень бурно. Хотя эта вулканическая активность Земли и создает потрясающе прекрасные вулканы, как, например, гора Фудзи в Японии, она также вносит свой вклад во множество катастроф, сопровождающих историю Земли. Примерами таких катастроф являются погребение древнего римского города Помпеи под слоем горячего вулканического пепла, выброшенного соседним вулканом Везувий, грандиозное уничтожение всего живого вокруг в результате взрыва вулкана Кракатау в Индонезии в 1883 году и совсем недавно взрыв вулкана Пинатубо на Филиппинских островах в 1991 году. Почему

существует вулканизм в зонах субдукции? В главе 2 мы намекнули на возможный ответ: океанические плиты содержат воду. В мощных толщах осадков, накапливающихся на океанском дне, по мере того как оно движется от места своего образования у хребтов к месту своего уничтожения в зонах субдукции, накапливается вода. Кроме того, во время этого долгого путешествия происходит реакция некоторых минералов базальтовой коры с морской водой и образуются другие, водосодержащие минералы. Хотя во время столкновения плит часть этих осадков соскребается с опускающейся плиты и выбрасывается на сушу, другая их часть уносится в мантию на значительные глубины. Во время опускания этих осадков вдоль зоны субдукции большая часть свободной воды, содержащейся в порах между зернами, выжимается увеличившимся давлением и пробивается обратно на поверхность. Но какая-то ее часть остается, как и вода, связанная в структуре минералов коры. В конце концов увеличивающиеся температура и давление изгоняют из пород и эту воду, и она просачивается в мантию в верхней части зоны субдукции. Именно этот процесс вызывает вулканизм. На тех глубинах, где вода изгоняется из пор и из самих минералов, окружающая мантия уже весьма горяча, а добавление воды понижает температуру плавления пород настолько, что это плавление начинается. Этот принцип должен быть знаком жителям северных городов, которые зимой рассыпают на улицах соль, чтобы понизить температуру плавления (таяния) льда.

Во всех субдукционных зонах Земли активный вулканизм неизбежно возникает приблизительно на одной и той же высоте над опускающейся плитой, а именно — около 150 километров. Такова приблизительно глубина, на которой разрушаются водосодержащие минералы,

освобождая воду, которая способствует плавлению. Характерным для этой обстановки типом пород является андезит, получивший свое название, как вы можете догадаться, по названию горной цепи в Южной Америке (Анды), где эта порода весьма распространена. Лабораторные эксперименты показывают, что андезит представляет собой именно ту породу, образование которой следовало бы ожидать, если породы мантии расплавить в присутствии воды, выделившейся из погружившейся плиты; эта вода объясняет также взрывной, бурный характер вулканизма, свойственного зонам субдукции. По мере приближения магмы к земной поверхности растворенная в ней вода и другие летучие компоненты в ответ на понижение давления быстро расширяются; это расширение часто имеет характер взрыва.

Многие из самых крупных землетрясений происходят вдоль зон субдукции. Это и не удивительно, если подумать, что происходит в этих областях: два гигантских куска земной коры, каждый толщиной около 100 километров, сталкиваются друг с другом, причем одна плита вталкивается под другую. К несчастью, некоторые районы, расположенные вблизи зон субдукции, очень плотно заселены. Мы можем предсказать со стопроцентной уверенностью, что в таких областях мощные разрушительные землетрясения будут продолжаться; вряд ли это будет большим утешением перед перспективой таких катастрофических событий, как землетрясение в Кобэ в Японии, происшедшее в начале 1995 года.

И все же Земля — это динамичная планета; даже зоны субдукции существуют не вечно, по крайней мере с точки зрения геологического времени. В конце концов они перестают действовать, и где-нибудь образуются другие. Какие же события могут остановить процесс субдукции?

Чаще всего это столкновение между континентами после того, как океаническая кора, существовавшая между ними, оказывается израсходованной в процессе субдукции. Вспомним, что очень часто литосферные плиты состоят из континентальной и океанической коры. В то время как сама плита, может быть, и безразлична к природе своих пассажиров, этого нельзя сказать о зоне субдукции. Она просто не в состоянии заглотить континентальную кору с ее низкой плотностью. Поэтому, когда океанический бассейн в конце концов закрывается благодаря субдукции, два обломка континентальной коры просто сталкиваются и припаиваются друг к другу; субдукция прекращается. Упрощенный набросок такого процесса показан на рис. 5.5. Он не так уж прост, как можно подумать по приведенному описанию; в типичном случае столкновение между континентами сопровождается мощным вулканизмом, метаморфизмом и горообразованием и занимает очень много времени.

Пожалуй, самым выдающимся примером такого процесса, взятым из недавнего прошлого, является столкновение между Индией и Азией, более подробно описанное в главе 11, в результате которого возникли Гималаи. Когда-то давным-давно на том месте, где сейчас располагаются Гималаи, существовала зона субдукции, вдоль которой находящаяся южнее плита погружалась на север под Азию, а между Азией и континентом Индии, который располагался южнее, находился обширный океан. Породы Гималаев и Тибетского плато свидетельствуют, что эта ситуация продолжалась очень долгое время, в течение которого много мелких фрагментов плавающей континентальной коры, перемещенных вместе с этой океанической плитой, прибыло с юга к зоне субдукции и приклеилось к южному краю Азии. Но постепенно дно океана было поглощено зоной субдукции, в результате

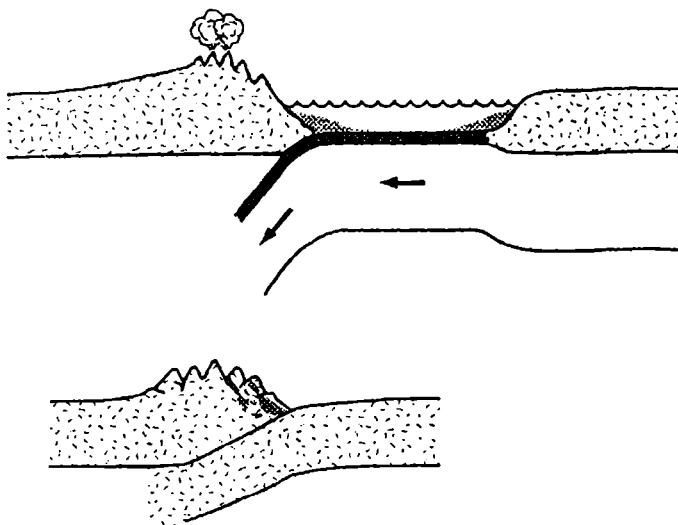


Рис. 5.5. Схематический разрез, показывающий, как процесс субдукции может закрыть океанский бассейн и привести к столкновению континентов, образуя огромные горные системы типа Гималаев.

чего Индия притянулась к северу. Между 50 и 60 миллионами лет назад угол этого континента достиг зоны субдукции и стал прижиматься к Азии. Инерция его движения заставила северную часть Индии проскользнуть под южную часть азиатской плиты, образуя участок континентальной коры толщиной в два раза больше, чем где-либо еще в мире. Осадки, смытые с окраин двух сближенных континентов еще до их столкновения, вулканические острова, существовавшие вдоль их краев, и породы самих континентов попали в ловушку гигантского столкновения, были смяты в систему параллельных складок, разбиты на блоки системой разломов и метаморфизованы. В результате образовалась самая высокая горная цепь и самое большое плоскогорье на Земле.

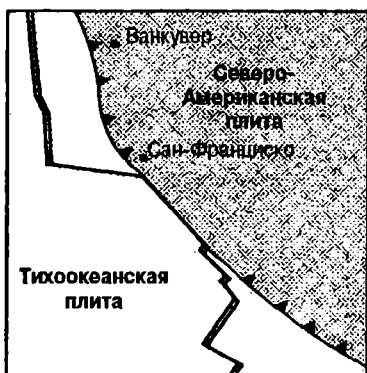
Обширная горная страна Гималаев все еще считается границей плиты, потому что до сих пор существует относительное движение между Азией и Индией. Эта страна пока поднимается; там довольно часты землетрясения. Действительно, землетрясения, снимающие напряжения, возникающие в земной коре, происходят в наши дни уже вдали от зоны столкновения, особенно в Китае, как результат того факта, что части Азии были сжаты и повернуты к востоку в момент, когда обе плиты устремились друг на друга. Однако в конце концов, когда прекратится относительное движение между двумя ранее отделенными друг от друга континентами, Гималаи будут признаны неактивной шовной зоной, находящейся внутри континента. Но когда это произойдет, кое-чему другому придется отодвинуться, чтобы дать пристанище новой области морского дна, образующейся вдоль океанического хребта, лежащего далеко к югу (рис. 5.2). Проведенные в последние годы исследования морского дна вблизи от Шри-Ланки показывают, что южнее этого острова, возможно, образуется новая зона субдукции, которая разрешит геометрическую головоломку.

Столкновения континента с континентом, подобные тому, что произвели на свет Гималаи, видимо, происходят регулярно на протяжении геологической истории. Хотя созданные ими высокие горы давно разрушились, следы таких событий можно распознать в древних породах по тому факту, что они образуют характерные длинные полосы сильно метаморфизованных пород, имеющих приблизительно одинаковый возраст. Хорошим примером такой области является провинция Грэнвиль в восточной части Северной Америки (рис. 4.3), которая была, без сомнения, в глубокой древности очень похожа на нынешние Гималаи.

РАЗЛОМ САН-АНДРЭАС

Разлом Сан-Андрэас в Калифорнии является, подобно Гималаям и среднеокеанским хребтам, границей плиты. Города Лос-Анджелес и Сан-Диего, лежащие западнее этого разлома, располагаются на Тихоокеанской плите и движутся в том же направлении, что и остров Гавайи, в то время как город Беркли, находящийся к востоку от разлома, движется вместе с Нью-Йорком и Майами на Северо-Американской плите (рис. 5.6). Границы между плитами, которые проходят по разломам, подобным разлому Сан-Андрэас, были названы трансформными разломами; они встречаются главным образом в океанах, соединяя между собой сегменты раздвигающихся хребтов. Именно они являются причиной того, что края плит имеют зигзагообразную форму. Около таких разломов нет ни схождения (сближения), ни расхождения (раздвига) плит; они просто движутся мимо друг друга. Если попробовать изобрести тектонику плит, разбив внешнюю оболочку шара на куски, которые заходили бы друг под друга на одних границах и обновлялись бы на других, то обнаружится, что особые формы, похожие на трансформные разломы, — это просто геометрическая необходимость.

Наиболее знаменитый или, если угодно, печально известный трансформный разлом — это разлом Сан-Андрэас в Калифорнии. Он также соединяет сегменты системы океанических хребтов, но в противоположность большинству трансформных разломов, пререзает часть континента. Эволюция разлома Сан-Андрэас весьма интересна (рис. 5.6). Около 50 или 60 миллионов лет назад существовала зона субдукции, протягивавшаяся вдоль всего Западного берега Северной Америки. Западнее от нее в море находился океанический хребет, вдоль



которого в осевом разломе формировалось новое морское дно. Но Северо-Американская плита двигалась на запад быстрее, чем росло новое морское дно, и в конце концов континент просто переехал через океанический хребет. Это впервые случилось около тридцати миллионов лет назад и продолжалось с перерывами до тех пор, пока небольшая плита между хребтом и зоной субдукции не была постепенно попросту съедена. Сохранились кое-какие небольшие обломки ее против берегов Мексики и южнее, а также против штатов Орегон, Вашингтон и Британская Колумбия к северу. Но по мере исчезновения этой плиты появились новые границы между плитами, чтобы облегчить глобальное взаимодействие плит в их движении. В ответ на это литосфера раскололась около края континента. Небольшая часть Северо-Американской плиты прикрепилась к Тихоокеанской плите, и родился разлом Сан-Андрэас.

На мировой карте литосферных плит, как, например, на рис. 5.2, трансформные разломы имеют вид акку-

←
Рис. 5.6. Эти диаграммы (сверху вниз) показывают, как развивался западный край Северной Америки, постепенно надвигаясь на раздвигающийся среднеокеанический хребет (двойные линии) в Тихом океане. Вплоть до первой половины третичного периода вдоль всего побережья существовала зона субдукции (зубчатые линии), в которой дно Тихого океана подворачивалось под Северную Америку (верхняя схема). В настоящее время (нижняя схема) трансформный разлом — разлом Сан-Андрэас — соединяет сохранившиеся сегменты океанического хребта в Калифорнийском заливе и к западу от Ванкувера в северо-восточной части Тихого океана. Небольшой осколок континента, включающий Баджа (Ваја), Калифорния, Лос-Анджелес и побережье Калифорнии к северу от Сан-Франциско, является сейчас частью Тихоокеанской плиты, движущейся на северо-запад относительно остальной части континента. Составлено согласно рис. 16.24 из книги: В. Дж. Скиннер и С. С. Портер «Динамическая Земля». Изд-во «Джон Уайли и Сыновья».

Использовано с разрешения.

ратных тонких линий. В действительности они представляют собой очень сложные границы, особенно когда они располагаются на континентальной коре. Хотя на геологической карте есть только один большой разлом, обозначенный как «разлом Сан-Андрэас», который действительно имеет вид величественного ущелья, особенно сверху, на самом деле литосферные плиты скользят одна вдоль другой на протяжении очень широкой области Калифорнии, отличающейся множеством разломов и признаков деформации. Многие из них ориентированы более или менее параллельно по отношению к самому разлому Сан-Андрэас; большая часть проявлений столь известной сейсмической активности в Калифорнии сосредоточена вдоль этих менее известных разломов.

Итак, суммируя вышеизложенное, отметим, что литосферные плиты придают поверхности Земли мозаичную структуру, имеют края, представляющие собой океанические хребты, от которых расходится морское дно, либо зоны субдукции или трансформные разломы; именно в этих краевых областях сосредоточена большая часть проявлений земного вулканизма, сейсмической активности и метаморфизма. Окружающая всю Землю система океанических хребтов, самые высокие горы Земли и ее самые прекрасные и самые опасные вулканы — все они располагаются на границах литосферных плит.

ГОРЯЧИЕ СТОЛБЫ В МАНТИИ

Из вышесказанного можно было бы сделать вывод, что внутренние части плит являются в геологическом плане спокойными областями земной коры, и по большей части это так и есть. Тем не менее есть и исключения. Например, при взгляде на карту Тихого океана сразу же

бросается в глаза, что внутри Тихоокеанской плиты, вдалеке от ее краев, очень много островов. И все они являются вулканами. Многие из них уже не активны («потухшие вулканы»), а некоторые даже целиком заросли кораллами, но все они образовались в результате вулканизма.

Но как возможна вулканическая активность в таком удалении от границ плит? Гавайские острова являются в этом отношении поучительным примером. Подобно многим другим островным группам в океанах они расположены цепочкой. В сущности, если обозначить на карте и подводные вулканы, то получится очень длинная и действительно впечатляющая цепь, простирающаяся от собственно Гавайских островов до Алеутского рва (рис. 5.7). В 1840-х годах американский геолог Джеймс Дэли заметил, что различные острова этой группы, видимо, прошли сходный путь геологической эволюции, но все более эродированы и поэтому, вероятно, чем точнее, тем старше. Затем в 1963 году, в самом начале эпохи разработки тектоники плит, канадский геофизик Тьюзо Уилсон понял, что это закономерное увеличение возраста островов могло получиться при условии, что они возникали в поверхностной литосферной плите, перемещавшейся над неподвижным вулканическим источником, находящимся под нею. Уилсон предположил, что длинная цепь вулканов, протянувшаяся на северо-запад от острова Гавайи, представляет собой проявление на поверхности какой-то древней и глубоко укорененной локальной структуры в мантии.

Хотя эта идея и не была сразу воспринята геологами и геофизиками, сейчас она составляет главную опору тектоники плит. Ее подтверждает также тот важный факт, что датировка лавы из разных островов Гавайской (и других аналогичных ей) островной цепи показала, что их возраст увеличивается при движении от ныне активного вулкана

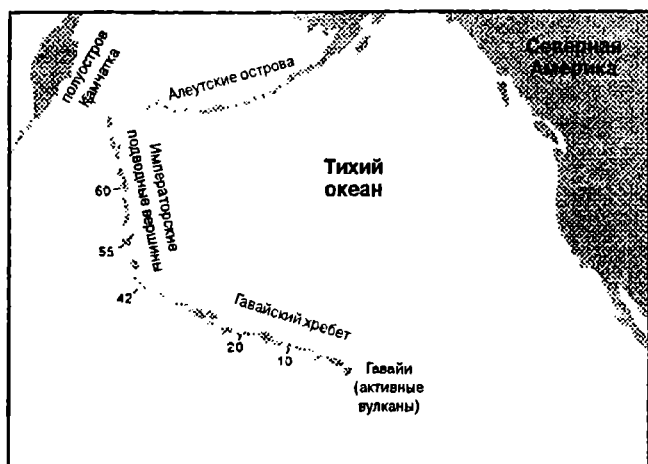


Рис. 5.7. Цепь островов и подводных погасших вулканов простирается на запад от Гавайских островов в направлении к Алеутскому желобу. Определение абсолютного возраста пород из этих вулканов показало, что в направлении от ныне активных вулканов Гавайских островов на запад и северо-запад их возраст увеличивается (цифры на карте обозначают возраст в миллионах лет). Резкий изгиб цепи отражает изменение направления движения Тихоокеанской плиты около 45 миллионов лет назад.

именно так, как предполагал Дэли (рис. 5.7). Большинство вулканов, расположенных во внутренних частях плит, образовалось, как сейчас считается, в результате деятельности мантийных столбов — неподвижных источников вулканического материала, которые поднимаются из глубин мантии. Их современные проявления, такие как остров Гавайи, называются «горячими точками». Большинство крупных и активных вулканов, расположенных внутри океанических плит, сопровождаются образованным горячей точкой «хвостом», или цепью еще более древних потухших вулканов, которые как бы

маркируют или провешивают путь поверхностной литосферной плиты над глубоко сидящим мантийным столбом. Эти столбы, по-видимому, возникают на больших глубинах, возможно даже на границе между ядром и мантией, и многие из них очень долго сохраняют свою активность. Самые древние вулканы в цепи Гавайских островов, образующие «хвост», связанный с конкретной горячей точкой, имеют возраст, приближающийся к восьмидесяти миллионам лет. Острова Таити и остров Пасхи в Тихом океане, острова Реюньон и Маврикий в Индийском океане и вообще большая часть островов во всех океанах Земли обязаны своим существованием мантийным столбам.

КАК ДАВНО РАБОТАЕТ ТЕКТОНИКА ПЛИТ?

Помимо того что многие из океанических вулканических островов являются очень приятным местом для посещения, эти острова и сопровождающие их «хвосты», образованные горячими точками, особенно полезны для геологов, поскольку они фиксируют места расположения плиты во время ее прохождения над неподвижным источником лавы. Поэтому они позволяют как бы прокрутить назад запись процесса расширения морского дна и реконструировать географию континентов и океанских бассейнов в далеком прошлом. Поскольку плиты обладают жесткостью, положение Тихоокеанской плиты, скажем, пятьдесят миллионов лет назад можно определить, передвигая ее так, чтобы вулканы, которым пятьдесят миллионов лет, оказались на месте расположения ныне действующего вулкана, например, сегодняшнего острова Гавайи.

Однако поскольку океанские бассейны являются на самом деле довольно эфемерными образованиями на

геологической временной шкале, реконструирование географии мира путем прослеживания движения плит через горячие точки возможно только для последних пяти процентов геологического времени. Те же трудности возникают при попытке проследить историю расширения дна океана, используя аномалии магнитного поля, обусловленные сменой полярности магнитного поля Земли. Как можем мы получить информацию о движении плит в более ранние времена? О процессах, происходивших более 200 миллионов лет назад, единственные указания мы получаем только на континентах, но и их трудно найти и интерпретировать. Например, магнитные свойства континентальных пород можно иногда использовать для определения их положения относительно магнитного полюса во время их образования, но это можно сделать только в том случае, если породы имеют сегодня в точности ту же ориентировку, что и в то время, когда они приобрели свои магнитные свойства. Если они были смяты в складки или наклонились, то их интерпретация становится гораздо более трудной, если вообще возможной. Более того, поскольку континенты на протяжении своей геологической истории путешествовали по всему земному шару, то для очень древних пород оказывается невозможно даже определить, в северном или южном полушарии произошло их намагничивание.

Иногда информацию о положении плит дают ископаемые остатки организмов. Аргументы Вегенера в пользу дрейфа континентов опирались частично на свидетельство ископаемых остатков, показывавших, что некоторые материки, отделенные сейчас друг от друга широкими пространствами океана, когда-то соединялись друг с другом. Иногда они могут даже указывать на географическую широту места своего образования или по крайней мере их можно использовать для различения тропиче-

ских типов среды их обитания от полярных. Однако ископаемые остатки организмов характеризуют лишь сравнительно поздние этапы геологической истории и бесполезны для этой цели в докембрии. Для протерозойской и архейской эр относительное положение плит и даже, в некоторых случаях, состав плит почти неизвестны. И в самом деле, еще недавно велись горячие споры о том, действовала ли вообще тектоника плит в столь отдаленном прошлом. И тем не менее, как было отмечено в главе 4, имеются многочисленные свидетельства о существовании континентальных швов в докембрии; эти швы должны отмечать места расположения древних зон субдукции, в которых древние континенты или их фрагменты сталкивались друг с другом при закрытии океанских бассейнов. Характер пород в этих зонах в общем похож на тот, что наблюдается в более поздних примерах. Убедительным признаком во многих таких шовных зонах является наличие небольших осколков океанского дна, выброшенных на материк во время столкновения плит, — ясное указание на то, что они образовались в районе сближения и столкновения плит в области субдукции морского дна. Таким образом, хотя и существует еще некоторое количество скептиков, большинство геологов убеждено, что тектоника плит действовала приблизительно так же, как и в наше время, миллиарды лет и даже, вероятно, с самого начала истории Земли.

Глава 6

ПРИРОДНЫЕ ЧАСЫ

В предыдущих главах много говорилось о времени. Геология является, в сущности, исторической наукой и поэтому время имеет в ней первостепенное значение. Земля образовалась 4,5 миллиарда лет назад, Атлантический океан начал открываться около 200 миллионов лет назад, динозавры вымерли 66 миллионов лет назад. Все эти утверждения содержат вполне точные даты важных событий в истории Земли. Как можем мы быть уверенными в том, что они верны?

Древние греки и римляне вывели из своих наблюдений над природой, что осадочные породы образовывались в течение долгих промежутков времени. Однако только Джеймс Хаттон, выдающийся шотландский геолог, выдвинувший принцип актуализма, первый в Новое время стал убеждать своих современников, что летопись горных пород уходит поистине в древнейшие времена. Его подход к проблеме геологического времени был прост и классически научен: он наблюдал протекающие вокруг него процессы осадконакопления и понял, что обычно они протекают очень медленно. Из этого он сделал вывод, что мощные выходы недавно затвердевших осадков, которые он наблюдал в крутых обрывах, должны свидетельствовать об очень длительных периодах накопления осадков. Дарвин, который был знаком с идеями Хаттона, также пришел к выводу, что для объяснения процессов биологической эволюции, которые записаны

в ископаемых остатках горных пород, требуется огромное время.

Но ни один из этих ученых, как и никто из их современников, которые были убеждены в огромной древности Земли и медленном темпе геологических изменений, не имели способа точно определить геологическое время. И тем не менее геологами была предложена шкала времени, охватывающая сотни миллионов лет, и числовые оценки, которые были революционными в их время. Многие представители влиятельной элиты того времени получили образование, опирающееся на теологию; такие идеи находились в резкой оппозиции к принятой тогда буквальной интерпретации Библии. Ведь именно из-за враждебного отношения христианской церкви были отброшены идеи древних греков о древности осадочных пород и находящихся в них окаменевших остатках организмов. Более того, подобно гипотезе Вегенера о континентальном дрейфе, представления передовых ученых о *настолько* древней Земле подвергались нападкам других ученых. Особенным влиянием во второй половине девятнадцатого века пользовался английский физик Лорд Кельвин, который еще в конце этого века доказывал, что Земля не может быть старше сорока миллионов лет, а вероятнее всего имеет возраст не больше двадцати миллионов лет, который он определил на основе своей теории о процессе ее охлаждения. Его доводы, казалось, были правильными, и геологам было трудно в то время противопоставить им какие-либо количественные расчеты, но они противоречили геологическим фактам.

Один из просчетов в аргументации Лорда Кельвина, как мы сейчас знаем, состоит в том, что он не знал того факта, что Земля содержит ряд естественно встречающихся радиоактивных изотопов. Они медленно распадаются, выделяя тепло в этом процессе и эффективно

продлевая процесс охлаждения Земли. Но в то время, когда Кельвин делал свои вычисления, радиоактивность была еще неизвестна, поэтому он не мог учесть ее влияние на процесс охлаждения Земли.

Существует забавный рассказ об Эрнесте Резерфорде, одном из пионеров исследования радиоактивности, который имеет отношение к оценке возраста Земли Лордом Кельвином. Однажды Резерфорд читал лекцию о теплоте, выделяющейся в процессе радиоактивного распада. Он нервничал, поскольку Лорд Кельвин, еще имевший мощное влияние в английской науке, находился среди публики. В своей гладкой речи он объявил, что в сущности Лорд Кельвин предвидел открытие радиоактивности, поскольку его расчет возраста Земли был сделан при условии, что результат вычислений мог бы оказаться иным, если бы был найден новый источник внутреннего тепла Земли. Рассказывали, что Лорд Кельвин, которому тогда было восемьдесят лет, клевал носом во время лекции, но проснулся с широкой улыбкой, когда услышал заявление Резерфорда.

Помимо выделения тепла внутри Земли, радиоактивность также снабдила геологов целой серией надежных «часов» для измерения возраста горных пород и скорости протекания различных геологических процессов. Но прежде чем обсудить подробности того, как это делается, имеет смысл рассмотреть, как ученые подходили к оценке геологического времени до открытия методов датировки горных пород на основе явления радиоактивности. Ведь по существу большая часть элементов за период в 550 миллионов лет геологической шкалы времени (рис. 1.1), то есть весь фанерозойский эон, была разработана задолго до того, как были определены действительные даты важнейших геологических границ. Были известны относительные положения

различных временных подразделений, но не их длительность.

Понятие относительного времени просто, но в то же время является очень мощным инструментом для определения возрастных взаимоотношений между различными геологическими телами, как уже отмечалось в главе 4 и иллюстрировалось на рис. 4.1. Этот подход очень прост и часто сводится к вопросу: порода А старше, чем порода Б, или наоборот? Один из наиболее очевидных аспектов понятия относительного времени был интуитивно известен многие тысячи лет, но был четко сформулирован только в семнадцатом столетии: в последовательности осадочных слоев самый молодой материал находится наверху. Человеком, который придумал этот закон, был датский анатом, который жил в Италии и латинизировал свое скандинавское имя (Нильс Стенон) в Николаус Стенон. Стенон внес важный вклад в медицину, а также в геологию и минералогию, но, к сожалению, в возрасте тридцати семи лет сделался священником и оставил науку. Указав на очевидное — а именно, что осадки, выпавшие в воде, должны первоначально образовывать горизонтальные слои, независимо от их теперешней ориентировки, и что самые молодые слои должны быть сверху, — он заложил основу для создания геологической шкалы времени.

Однако Земля представляет собой весьма динамичное место и невозможно найти в каждой отдельной местности полную, слой за слоем, запись всех событий фанерозоя. Как же можно в таком случае построить геологическую временную шкалу, даже пользуясь только относительным временем? Ответ заключается в факте эволюции и в постоянной и непрерывной изменчивости ассоциаций — то есть совместно встречающихся сообществ — ископаемых остатков организмов, сохранившихся в осадочных породах.

И действительно, более чем за полстолетия до того, как Дарвин опубликовал свои идеи об эволюции, некий английский инженер по имени Уильям Смит, который занимался составлением карт вдоль каналов в южной части Англии, обнаружил, что может начертить всю объединенную вертикальную последовательность осадочных слоев, которые он нашел на разной высоте и в разных местностях. Он сделал это, используя ископаемые остатки, или, говоря точнее, ассоциации ископаемых остатков, которые встречались в различных осадочных породах, которые он наносил на карту. Он смог свести в один разрез сложную последовательность пород, поскольку во многих местах наблюдалось их частичное перекрытие. Это легко себе представить, если обозначить конкретные группы ископаемых остатков, совместно и постоянно встречающиеся в осадочных породах, буквами латинского алфавита, — так, чтобы буква А обозначала самые древние (рис. 6.1). В обрыве в некоторой местности могут выходить на поверхность осадочные слои, содержащие группы ископаемых остатков А, В, С и D, в другом обнажении встречаются слои с группами С, D и Е; в третьей местности обнаружены группы С, Е, F и G. Совмещая слои с одинаковыми группами ископаемых остатков, встречающиеся в разных местах, можно построить на сводном разрезе полную вертикальную последовательность, как если бы все эти слои присутствовали в одном месте. Согласно правилу Стенона, в таком разрезе самые древние породы должны находиться внизу, а самые молодые наверху. Исходя из этого, несмотря на то, что группы А и В ни разу не были найдены в тех же местностях, что и группы F и G, очевидно, что F и G моложе, что следует из сводной относительной временной последовательности. В принципе мы знаем также, что, если бы какая-либо из этих групп была встречена где-нибудь

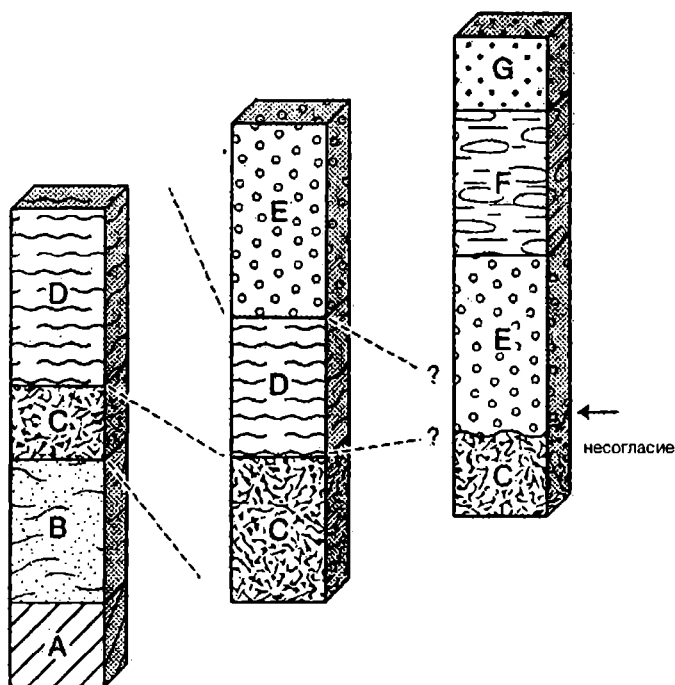


Рис. 6.1. Как поясняется в тексте, слои осадочных пород часто содержат диагностические ассоциации окаменелых остатков организмов (обозначенные здесь буквами латинского алфавита), которые позволяют провести корреляцию (сопоставление) между разрезами различных местностей (иногда корреляция оказывается возможной даже на основании только типов пород, но корреляция по ископаемым остаткам более надежна). На основании такой корреляции можно установить временную последовательность образования пород. Например, из этой простой иллюстрации ясно, что группы окаменелостей А и В старше, чем F и С, хотя они никогда не встречаются вместе в одной и той же местности. Обратите внимание, что иногда слои отдельных пород совершенно исчезают, как происходит со слоем D. В правой колонке имеется так называемое несогласие между слоями С и Е, указывающее на наличие разрыва во времени в геологической летописи. В этой местности слой D и частично С были снесены в результате эрозии до отложения слоя Е.

в другом месте мира, ее можно было бы поместить на ее место во временной шкале эволюции по отношению к другим группам.

В сущности, именно такую процедуру применили для построения шкалы относительного возраста Земли, приведенной на рис. 1.1, то есть без указания абсолютного возраста границ между подразделениями. Конечно, она отнюдь не так проста, как можно подумать, глядя на этот рисунок. Несмотря на тот факт, что временная шкала включает данные, полученные из весьма отдаленных друг от друга местностей, существуют части геологической летописи, которые очень плохо представлены в осадках на всем земном шаре. Фактически из-за воздействия перемещений плит, большая часть записей в геологической летописи океанов была уничтожена — либо содрана со дна вышележащей плитой в зонах субдукции, либо метаморфизована до неузнаваемости при столкновениях между континентами. А что касается сохранившихся осадков, особенно тех, которые были отложены вдоль континентальных окраин или на мелководье вокруг островов, то существуют географические различия в ископаемых остатках, которые следует учитывать: ведь и в наше время имеются резкие различия во флоре и фауне, между, скажем, коралловыми рифами, окружающими какой-нибудь тропический остров в Тихом океане, и атлантическими водами около Исландии. Но безжалостный ход эволюции и сходство, если не точное подобие многих видов, несмотря на географические границы в данный момент времени, сделали этот подход на редкость успешным.

Относительная датировка пород с использованием ископаемых остатков организмов позволили первым геологам разработать последовательность главных событий, которые произошли в течение фанерозоя. Они узнали, например, что рыбы на Земле появились раньше,

чем динозавры или млекопитающие. Они смогли выяснить, что обширные угольные месторождения в восточной части Северной Америки и в Западной Европе образовались в древних болотах до того, как на океанском дне образовались меловые отложения, которые теперь слагают Белые Утесы около Дувра в Англии. Но что касается пород, не содержащих ископаемых остатков, особенно относящихся к докембрию, то здесь они оказались в тупике. Казалось, вообще справедливо положение, что наиболее метаморфизованные породы являются, вероятно, и более древними, чем породы слабее деформированные или измененные, но не было никакого способа выяснить, являются ли такие породы в Индии старше, чем такого же вида породы в Канаде, или наоборот. Не было также никаких оснований выяснить тот факт, что относительная временная шкала, которую они разрабатывали для фанерозоя, фактически включает только около двенадцати процентов всего геологического времени. И даже там, где относительная последовательность залегания пород была достаточно хорошо установлена, не было никакого способа оценить длительность различных частей шкалы. Эта возможность появилась лишь позднее, большей частью лишь во второй половине двадцатого столетия, и она все еще продолжает совершенствоваться.

ДАТИРОВКА С ПОМОЩЬЮ РАДИОАКТИВНОСТИ

Для геологов главным судьей-хронометристом является радиоактивность горных пород. К счастью, существует много естественно встречающихся радиоактивных изотопов, обладающих свойствами, делающими их полезными для решения задач геологической хронологии. Их

важность нельзя переоценить. Только благодаря им появилась возможность составить историю Земли, которая рассказывается в этой книге.

Как же можно использовать свойство радиоактивности для определения возраста горных пород или для оцифровки временной шкалы? Тема эта является весьма сложной и специальной. Тысячи научных статей и много книг были написаны об этом предмете. Здесь мы можем дать читателю лишь краткий очерк, приведя несколько примеров. Но основная предпосылка метода, в сущности, очень проста. Радиоактивные изотопы распадаются с постоянной скоростью. В этом отношении они совершенно аналогичны обычным часам. Мы знаем, что каждую минуту часы отстукивают шестьдесят секунд. Мы также знаем, что в любом образце горной породы, который содержит уран, около полутора процентов этого урана распадается, образуя свинец, каждые 100 миллионов лет. Измеряя количество урана, которое распалось в течение жизни какого-нибудь определенного образца (или, наоборот, количество свинца, образовавшегося в результате распада), можно определить возраст образца.

Большинство химических элементов периодической таблицы Менделеева имеют по несколько изотопов. Как уже рассказывалось в главе 2, все изотопы одного элемента ведут себя в химическом отношении одинаково. Каждый из них имеет одинаковое число протонов в ядре своих атомов и одинаковое число электронов, окружающих это ядро. Однако каждый из изотопов имеет слегка отличный вес, поскольку ядра разных изотопов содержат неодинаковое число нейтронов. Вид изотопа определяется числом, которое означает сумму протонов и нейтронов в ядре атома (и тем самым его вес, точнее — массу). Таким образом, в каждой глотке воздуха, который вы вдыхаете, большая часть атомов кислорода принадлежит

изотопу кислород 16, но некоторые принадлежат изотопу кислород 18 и совсем ничтожное число — изотопу кислород 17. Но что касается вашего тела, то большая часть его состоит из всех изотопов кислорода.

Радиоактивные изотопы неустойчивы. Радиоактивный распад направлен на достижение устойчивости с помощью изменения соотношения между числом протонов и нейтронов в ядрах атомов. Это осуществляется путем выбрасывания некоторых частиц из ядра с большой энергией, и в этом процессе образуется другой химический элемент. Например, мы видели, что уран, распадаясь, образует свинец (хотя в этом конкретном случае преобразование ядер урана в свинец включает целую серию радиоактивных распадов, а не один-единственный этап). Явление радиоактивности было открыто в последние годы девятнадцатого столетия и с тех пор интенсивно изучается. Ученые быстро узнали путем экспериментов, что радиоактивность является статистическим явлением, то есть что каждый радиоактивный изотоп характеризуется определенной вероятностью того, что он распадется в заданный промежуток времени. Это легче всего представить, вообразив большое количество радиоактивных атомов в стакане. Представим себе, что мы можем их видеть и определять их число в любой момент времени. Если мы проделаем такое наблюдение через какой-нибудь промежуток времени, скажем, через минуту, то обнаружим, что определенная часть атомов распадется; при наблюдении еще через минуту распадется та же часть *оставшихся* атомов и так далее. Поскольку радиоактивность является статистическим явлением, и особенно если количество атомов в стакане изначально было мало, то доля распадающихся атомов может слегка колебаться от минуты к минуте, но в среднем она будет постоянной. Тот же эксперимент, но проведенный в разное время

и при широком разнообразии окружающих условий, даст тот же результат. Это указывает на то, что вероятность распада определенной доли данного изотопа за определенное время является постоянной величиной. Закономерность распада удобно выразить через время полураспада изначального количества атомов данного изотопа в образце породы, то есть время распада половины изначальных атомов изотопа. Математически период полураспада прямо пропорционален величине постоянной распада и для большинства радиоактивных изотопов он определен с высокой точностью. Именно эти данные являются ключом ко всем применяющимся в геологии методам «абсолютного» датирования.

Возможно, вы поняли из этого описания, что радиоактивный распад описывается экспоненциальным законом распределения: количество распадающихся за каждую единицу времени атомов в начале процесса велико, но с течением времени становится все меньше. Именно доля атомов, которые распадаются в каждый из одинаковых промежутков времени, оказывается постоянной, что видно из рис. 6.2.

Почему же в природе существуют неустойчивые радиоактивные изотопы? Вместе с устойчивыми элементами большая часть их образуется в результате ядерных реакций в недрах звезд или же при взрывах сверхновых звезд, которые регулярно происходят в нашей Галактике. Они являются частью того вещества, которое вошло в состав Земли при ее образовании; изотопы с очень долгим периодом полураспада распались лишь частично. Они все еще встречаются на Земле. Но существуют и изотопы со столь коротким периодом полураспада, что любые их количества, существовавшие в период образования Земли, давно уже полностью распались. Тот факт, что они все же встречаются на Земле, говорит о том, что они

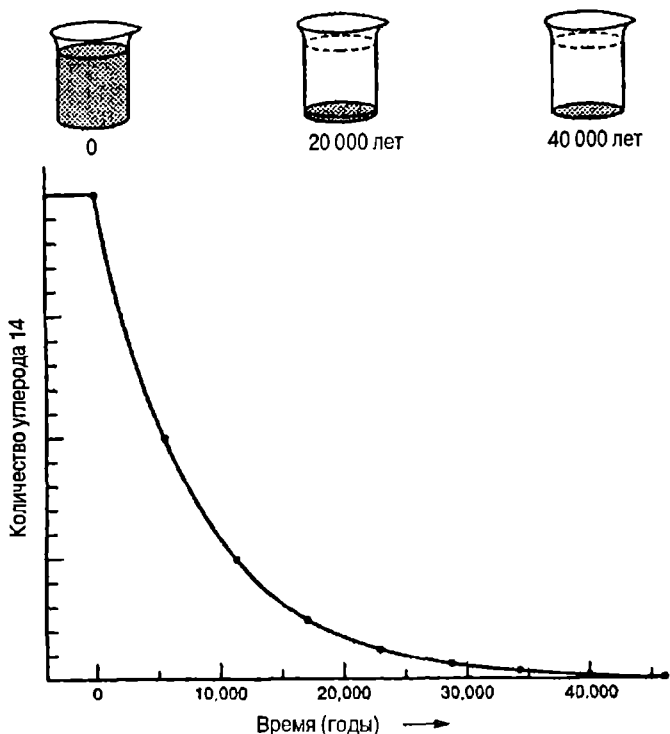


Рис. 6.2. Количество радиоактивного изотопа углерод 14 (здесь оно показано в произвольных единицах), содержащееся, например, в растении, остается постоянным, пока оно живо и обменивается CO_2 с атмосферой. После того как оно умирает (отмечено цифрой 0 на графике), содержание в нем углерода 14 уменьшается наполовину каждые 5700 лет, в связи с его распадом до нерадиоактивного азота. Точки на кривой расположены через интервал времени, равный времени полураспада. Очевидно, что после пяти или шести таких периодов остается очень мало углерода 14. Тот же процесс показан и в верхней части рисунка в условной форме исчезновения углерода 4 из первоначально полного стакана.

продолжают образовываться в каких-то ныне протекающих процессах.

Хорошим примером изотопов последней категории является углерод 14 — изотоп, столь знакомый многим в связи с углеродным (или карбоновым) методом датировки. Он имеет короткий (по геологическим масштабам) период полураспада, равный 5700 лет, так что никакое количество углерода 14, обнаруживаемое в наши дни, не может быть остатком, сохранившимся со времен образования Земли (как должно быть очевидно из рис. 6.2). Наоборот, запасы этого изотопа на нашей планете постоянно пополняются в результате ядерных реакций, протекающих в атмосфере. Это оказалось счастливым обстоятельством для археологов и климатологов, которые широко используют углерод 14 для датировки.

Ядерные реакции, благодаря которым в земной атмосфере образуется углерод 14, вызываются космическим излучением, то есть потоками элементарных частиц — преимущественно отдельных атомов, — которые пронизывают космическое пространство и часто падают на Землю, пронизывая ее атмосферу. Многие из этих атомов имеют своим источником Солнце и разгоняются, устремляясь в космос в больших количествах в моменты, когда огромные языки пламени — солнечные протуберанцы — выбрасываются Солнцем на миллионы миль от солнечной поверхности. Некоторая часть космического излучения с еще большими энергиями частиц — это путешественники из областей Галактики, далеко отстоящих от Солнечной системы. Но независимо от их происхождения, когда очень быстрые частицы космического излучения сталкиваются с атомами земной атмосферы, возникают ядерные реакции, подобно тому, как это происходит в созданных человеком ускорителях элементарных частиц. Побочным продуктом этих реакций являются ней-

троны; когда произведенный космическим лучом нейтрон ударяется в устойчивый атом изотопа азота под номером 14 и захватывается им (азот является самым мощным элементом в составе атмосферы), выбивая из него один протон, возникает радиоактивный углерод 14.

Большая часть углерода в составе земной атмосферы связана с кислородом и образует углекислый газ (диоксид карбона). Такова судьба и образованных с помощью космических лучей атомов радиоактивного углерода 14, так что в каждой порции углекислого газа, взятого из атмосферы, содержится постоянная доля атомов углерода 14. Вследствие того, что в живых организмах углерод, входящий в их состав, в конечном итоге образуется из атмосферы с помощью происходящего в растениях фотосинтеза, он содержит ту же постоянную долю углерода 14, что и атмосфера. Это является основой для использования этого радиоактивного изотопа в качестве хронометра.

Датирование с помощью углерода 14 было применено для определения возраста Туринской плащаницы, раковин из мусорных куч североамериканских индейцев, доисторических извержений вулканов на Гавайских островах. Как же конкретно производится датирование определенных образцов с помощью этого метода? Во-первых, нужно найти материал, который содержит углекислоту (и значит, углерод 14), заимствованную из атмосферы. Для этого подойдет все, что угодно, лишь бы оно содержало углерод и было живо во время события, время которого мы хотим определить, хотя некоторые вещества более пригодны для этого, чем другие. Часто используются растительные остатки, как, например, древесина или даже древесный уголь. Когда растение умирает или падает под ударами топора, или сгорает в лавовом потоке и поглощается им, оно перестает связывать углерод из атмосферы; начиная с этого момента содержащийся

в нем радиоактивный углерод ^{14}C начинает распадаться в соответствии с хорошо известной величиной — постоянной распада и с графиком, показанным на рис. 6.2. Если образец старого дерева имеет возраст, точно соответствующий периоду полураспада углерода ^{14}C , то есть 5700 лет, то он содержит в точности 50 % количества этого изотопа, которое содержится в современных растениях; если его возраст равен двойному периоду полураспада — то 25 % и так далее. Из рис. 6.2 очевидно, что после времени, равного нескольким периодам полураспада, остается не так уж много радиоактивного изотопа. И все же современная техника позволяет определить исключительно малые количества углерода ^{14}C и таким образом измерить возраст образцов до сорока или пятидесяти тысяч лет. Это составляет более восьми периодов полураспада, поэтому в образце такого возраста содержится $1/254$ часть первоначального количества углерода ^{14}C .

Единственная неопределенность при использовании этого метода заключается в содержании углерода ^{14}C в древней атмосфере — оно, возможно, отличалось от сегодняшнего. Однако существуют различные способы проверить эту возможность — например, путем калибровки возраста, определенного радиоуглеродным методом, да и с помощью других методов. Даже при отмеченных флуктуациях содержания углекислоты в древней атмосфере эти проверки показали, что в общем и целом допущение о приблизительно постоянном содержании углерода ^{14}C в атмосфере хорошо выдерживается для того отрезка времени, для которого пригоден этот метод.

Это краткое описание дает пример того, как можно использовать радиоактивные изотопы для определения возраста объектов или событий. Тем не менее период полураспада углерода ^{14}C столь мал, что этот изотоп можно использовать для установления хронологии лишь очень

недавнего прошлого. Для остальной же части геологической шкалы времени применяются гораздо более долгоживущие изотопы; способы их использования тоже различаются.

В главе 2 мы упоминали об изотопах свинца и об их полезности для измерения возраста Земли и датирования зерен устойчивого к выветриванию минерала циркона. Мы узнали, что различные изотопы свинца являются устойчивыми конечными продуктами распада радиоактивных урана и тория. Ураново-свинцовый метод был по существу первым из всех применяющихся сейчас способов определения возраста пород с помощью радиоактивного распада; он все еще является одним из самых полезных в геологии. Другие общепотребительные пары изотопов используют распад изотопа калия до изотопа газа аргона или распад рубидия 87 до стронция 87. Исходный изотоп в каждом случае является широко распространенным компонентом пород земной коры; период его полураспада достаточно длинный, чтобы метод можно было применить для всей истории Земли.

В принципе методы, использующие долгоживущие радиоактивные изотопы, подобны методу, использующему углерод 14, но есть некоторые важные отличия. Одно из них заключается в том, что исходные («родительские») изотопы не возникают на Земле непрерывно и постоянно; количество их постепенно уменьшается в результате радиоактивного распада. Поэтому сейчас на Земле имеется значительно меньше урана, чем в период формирования — большая часть его распалась, превратившись в свинец.

Для обычно используемых методик датирования процедура состоит в измерении количества «дочернего» изотопа, который образовался за время жизни образца, а не «родительского», оставшегося в образце, как при

использовании углерода 14. Тем самым мы избегаем необходимости знать количество родительского изотопа, присутствовавшего в образце в момент, когда были запущены радиоактивные часы. Поскольку каждый «родительский» атом распадается, производя «дочерний», то количество последних всегда равно количеству распавшихся «родительских» атомов.

Хорошим примером того, как работает эта методика, является калий-аргоновый метод. Калий 40 — единственный радиоактивный из трех встречающихся в природе изотопов калия. Хотя калий 40 не так уж распространен и составляет всего около 0,01 процента от общего количества атомов калия, сам калий является обычным компонентом минералов земной коры, что делает его весьма полезным для датирования горных пород — как имеющих возраст Земли, так и молодых, около 100 000 лет или даже меньше. Дочерним изотопом для этой реакции распада является аргон 40 — газ; хотя аргон не столь уж редкий элемент — в атмосфере он содержится в количестве около одного процента, — большинство изверженных пород, особенно вулканические породы, прорвавшиеся на поверхность земли, при своем образовании вовсе не содержат аргон 40. Любой аргон, который был растворен в расплавленной лаве, просто уходит в атмосферу во время извержения вулкана. Поэтому все количество аргона 40, определенное в древней вулканической породе, должно было образоваться в результате радиоактивного распада калия 40 за время жизни образца. Поскольку период полураспада калия 40 хорошо известен, не так уж сложно вычислить время, необходимое для накопления этого количества аргона. Некоторые самые обычные минералы, как, например, полевой шпат или слюда, богаты калием и поэтому представляют собой особенно чувствительные хронометры.

Другие долгоживущие радиоактивные изотопы, используемые в геохронологии, применяются аналогичным образом, хотя каждый имеет свои особенности. Поскольку в этих методах используются разные химические элементы, некоторые лучше, чем другие, подходят для датирования конкретных пород. Однако часто случается, что одну и ту же породу можно датировать разными методами. Хотя используемые при этом радиоактивные изотопы могут иметь весьма различные значения периода полураспада, а «родительские» и «дочерние» изотопы — совершенно разные химические свойства, возраст обычно определяется один и тот же. Это придает геологам уверенность в правильности каждого метода, а также подтверждает точность определения периодов полураспада, используемых в расчетах.

Но что же здесь, собственно, датируется? Приведенный выше пример вулканической породы, накапливающей аргон ^{40}Ar с момента ее выхода на поверхность в виде лавы, очень прост: определяется время извержения, равное возрасту вулканической породы. А как быть в случае осадочной или метаморфической породы? Применимы ли к ним такие же правила? Ответом будет: и да и нет.

Рассмотрим случай осадочной породы. Предположим, что богатый калием минерал отобран из образца для датировки калий-аргоновым методом; его возраст определяется в 300 миллионов лет. Является ли эта дата временем образования осадка? В общем случае ответ будет отрицательным, поскольку многие из минералов, встречающихся в осадочной породе, могут быть осколками ранее существовавших пород. Они были перенесены из своего первоначального источника к месту отложения реками или океанскими течениями. Измеренный возраст для зерен богатого калием минерала, скорее всего, правилен,

но он, вероятно, отражает время образования гранита, из которого эти минеральные зерна были выветрены, а не время его отложения как части осадочной породы. В этом случае можно утверждать только то, что данная осадочная порода не может быть старше 300 миллионов лет. Она должна быть моложе, чем ее составные части, а насколько моложе — это не всегда легко определить.

В случае метаморфической породы задача еще больше усложняется. Все методы датирования в определенной степени чувствительны к температуре, особенно калий-аргоновый метод. Если нагреть богатый калием минерал, то некоторое количество накопившегося газообразного аргона ^{40}Ar , вероятно, опять диффундирует в атмосферу. Поскольку метаморфизм почти неизменно связан с повышением температуры пород, большинство пород во время метаморфизма теряет часть своего аргона. Если эта потеря является полной, то радиоактивные часы тем самым переводятся на нулевое время; определенный по ним возраст породы — это возраст ее метаморфизма. Но в общем случае потеря аргона является лишь частичной и, более того, обычно невозможно установить, какая часть аргона потеряна. Иногда эту трудность можно обойти, используя несколько разных методов датировки или минералов с разной чувствительностью к температуре. Тем не менее полученную таким образом информацию не всегда легко интерпретировать. И все же в последнее время были достигнуты большие успехи в понимании поведения различных элементов вроде аргона при нагревании; в некоторых случаях оказалось возможным реконструировать температурную историю породы на основании тщательного анализа ее изотопного состава. Этот подход оказался особенно плодотворным при изучении истории горных цепей, таких, например, как Гималаи, в которых глубоко погребенные

(и поэтому очень горячие) породы были подняты на более холодные этажи близ земной поверхности, где они снова начали сохранять свой аргон. При благоприятных условиях хронология поднятия горных массивов определяется достаточно точно.

КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ ДАТИРОВАНИЯ

Во многих случаях удастся определить возраст породы без прямого измерения количества «родительского» и «дочернего» изотопов. Это особенно полезно для осадков, которые, как показано выше, зачастую не подходят для прямого измерения возраста. Возраст осадков можно определить косвенным способом, притом иногда вполне точно, используя окаменелости.

Окаменелости — это сохранившиеся остатки живых организмов. Иногда они представляют собой просто отпечатки мягких тканей, не полностью разложившихся, как в случае многих растительных остатков. Но чаще это твердые части организмов — раковины, зубы, кости. К сожалению, во всех таких остатках обычно отсутствуют радиоактивные изотопы в количествах, достаточных для применения изотопных методов датировки; во всяком случае, первоначальный химический состав ископаемых остатков бывает совершенно изменен циркулирующей водой спустя долгое время после их отложения, при этом слабо повлияв на их внешний вид. Тем не менее, поскольку жизнь эволюционирует, ископаемые остатки организмов тоже являются природными хронометрами, ведь их морфология и другие особенности изменяются с течением времени. Если можно определить временной промежуток, в течение которого на земле жил какой-либо организм или группа организмов, тогда находка в породе

такого ископаемого организма автоматически датирует породу, в которой он найден.

К счастью, геологи смогли довольно точно приписать определенный возраст большинству ископаемых организмов, поскольку существуют хотя бы некоторые составные части осадка, которые могут быть точно датированы, даже если сами органические остатки не поддаются такому датированию. Например, взрывные вулканические извержения выбрасывают в воздух большие количества пепла, которые очень быстро, за очень короткие в геологическом смысле промежутки времени оседают в виде слоев зернистой или комковатой породы и обломков минералов, о чем, к своему несчастью, узнали многие жители штата Вашингтон после взрыва вулкана горы Святой Елены в 1980 году. Но геологи питают симпатию к слоям вулканического пепла, поскольку последние образуют четко выделяющиеся и легко прослеживаемые (маркирующие) слои в однородных толщах пород. Минералы, которые содержат такие слои, часто могут быть датированы различными методами, например, калий-аргоновым, давая нам точные даты для различных интервалов осадочной толщи. Таким образом, используя слой пепла и другие датированные компоненты осадков, на основании десятков тысяч химических анализов образцов пород со всего мира, был разработан временной каркас для истории Земли, в котором для каждого ископаемого организма есть своя ячейка. Именно таким способом были приписаны определенные даты для геологической шкалы, приведенной на рис. 1.1, которая существовала как относительная последовательность комплексов пород до того, как были открыты методы датировки пород, основанные на явлении радиоактивности. Точный возраст некоторых из границ на временной шкале в наши дни продолжает уточняться с помощью тщательных и детальных иссле-

дований, сочетающих анализ ископаемых сообществ организмов и точную датировку некоторых компонентов осадочных пород, таких как слои вулканического пепла.

Еще один косвенный метод датировки горных пород основывается на периодически повторяющейся смене полярности магнитного поля Земли, о которых говорилось в предыдущей главе. Путем анализа базальтовых потоков на материках с определением как их возраста (используя вышеописанные изотопные методы), так и магнитных свойств, была довольно точно разработана хронология таких изменений полярности. Фактически она сейчас столь детальна, что возраст различных частей морского дна можно определить просто путем сопоставления зebroобразных магнитных аномалий на морском дне с датированными последовательностями базальтовых потоков на материках.

Но магнитная хронология не ограничивается только изверженными породами. Как и базальты океанского дна, осадки также нередко содержат магнитные минералы; по мере медленного оседания на дно они ориентируются в соответствии с преобладающим направлением изолиний земного магнитного поля. Поэтому смены направления земного магнитного поля также оказываются записанными в осадках и опять же путем корреляции с известной уже хронологией можно по ориентировке магнитных осей в зернах минералов установить возраст осадка.

Геологи приложили огромные усилия, чтобы установить и довести почти до совершенства временную шкалу истории Земли. Самые лучшие определения возраста древнейших, докембрийских пород содержат ошибку меньше одного процента; это означает, что события, отстоящие друг от друга всего на несколько миллионов лет, можно расположить в их истинной последовательности даже по породам, имеющим возраст три миллиарда лет.

Это поистине замечательное достижение. Оно равноценно возможности правильно расположить во времени события, отстоящие друг от друга всего на несколько часов, но случившиеся год назад, измеряя каким-либо образом их последствия, которые проявились только сегодня. Замечательно также то, что мы теперь знаем темп эволюции, точную дату исчезновения динозавров, время раскола и расхождения одних континентов и столкновения других. Все это знание получено с помощью описанных в этой главе радиоактивных часов. Всякий раз на протяжении нашего рассказа, когда говорится о возрасте пород или ископаемых остатках организмов, все данные основываются на показаниях этих геологических хронометров.

Глава 7

КЕМБРИЙСКИЙ ВЗРЫВ

После того как в двух последних главах мы отвлеклись на тектонику плит и геологическое время, пора вернуться к моменту геологической истории Земли, где мы ее оставили, а именно к концу протерозойской эры. Следующим крупным подразделением геологического времени (опять посмотрим на рис. 1.1) является палеозойская эра, которая началась кембрийским периодом около 540 миллионов лет назад. Для порядка следует отметить, что остается некоторая неопределенность в отношении точного возраста границы между протерозоем и кембрием. Даже последние оценки ее колеблются между 530 и 600 миллионами лет. Такая изменчивость является составной частью естественного прогресса науки, а отнюдь не признаком слабости научного подхода, как думают некоторые. Причины этой неопределенности лежат как в технических трудностях датировки пород, так и в поисках подходящих образцов, характеризующих эту границу (поскольку не все породы могут быть датированы). Существует также проблема, куда конкретно поместить физическую границу в данной последовательности осадочных пород. Принятое здесь значение в 540 миллионов лет основывается на тщательной ураново-свинцовой датировке кристаллов циркона, извлеченных из слоя вулканического пепла, найденного в осадках из провинции Юннань, Китай. Точность определения возраста самого слоя пепла сомнений не вызывает. Неопределенность

состоит в том, что неясно, как располагается сам этот слой относительно действительной границы. Палеонтологи на основании содержания в породах различных ископаемых остатков организмов сделали вывод, что осадки, залегающие непосредственно выше и ниже этого слоя пепла, отложились очень близко к началу кембрийского периода (кембрия) — первого периода палеозойской эры. Но независимо от точной даты с начала кембрия и ближе к нашему времени геологическая история Земли неразрывно связана с историей жизни на нашей планете, сага о которой рассказывается ископаемыми остатками, сохранившимися в породах.

ОКАМЕНЕЛАЯ ЛЕТОПИСЬ

Окаменелости, используемые геологами для прослеживания путей эволюции и реконструкции моделей климата Земли, дошли до нас в различных формах. Некоторые остались почти неизменными по сравнению с их первоначальным состоянием, как, например, скелеты саблезубых тигров, открытые в смоляных карьерах около Ла-Бриа в районе Лос-Анджелеса, но большей частью они в разной степени изменены химическими реакциями при сохранении внешнего вида. Наиболее распространенными окаменелостями являются твердые части животных, сложенные обычными минералами, — кости или зубы, состоящие из фосфатных минералов, и раковины, сложенные карбонатом кальция. Мягкие ткани обычно разлагаются слишком быстро, чтобы от них что-нибудь сохранилось, хотя в некоторых видах среды осадкообразования они тоже сохраняются. И это большая удача, потому что большинство докембрийских и раннекембрийских животных были мягкотелыми и их остатки

имеют критическое значение для понимания природы кембрийского взрыва.

Химические реакции, которые резко изменяют минеральный и химический составы остатков — как твердых, так и мягких их частей, — обычно оставляют нетронутой морфологию и внутреннюю структуру растений или животных. В типичных случаях реакции происходят после погребения организма в осадках, когда циркулирующая в осадке вода, несущая растворенные в ней минералы, реагирует с первичным материалом погребенного организма, трансформируя его. Хорошим примером такой реакции является окаменевшее дерево, которое сохраняет тончайшие детали своего первоначального строения — годовичные кольца и т. п., несмотря на тот факт, что целлюлоза и другие химические компоненты первоначального дерева полностью замещены кремнеземом — той самой составной частью, которая составляет обычный минерал кварц. Как показывает само название, в данном случае древесина была превращена в камень.

Некоторые очень ценные ископаемые вообще являются остатками не организмов, а их следов — это борозды после проползших червей, царапины крабов, отпечатки следов динозавров. Подобно опытному следопыту, который может определить пол, рост и вес человека по не слишком отчетливым следам, некоторые палеонтологи умудрились насобирать по мелочам огромное количество информации о древних организмах и их поведении по такого рода остаткам. Их работа гораздо труднее, чем работа следопыта, поскольку во многих случаях вообще неясно, какое животное оставило данный след.

Студентом я холодно относился к палеонтологии. Помню, как я проводил долгие вечера по пятницам в жаркой комнате старинного здания, делая зарисовки древних существ под руководством доброго, по то же древнего

преподавателя. На этих занятиях почти не было речи о поведении, эволюции или каких-либо процессах, а только о классификации. Я думал, что геофизика или геохимия гораздо более интересные дисциплины; кроме того, мне никогда не нравились мои рисунки. Но если на мгновение призадуматься, согласитесь, что при правильном подходе вряд ли существует нечто более интересное и волнующее, чем держать в руках кусок породы возрастом в 500 миллионов лет, выцарапывать из нее окаменелый остаток какого-нибудь неизвестного существа и пытаться реконструировать мир, каким он был полмиллиарда лет назад. Палеонтологи занимались именно этим. На основе мириадом изученных ими окаменевших остатков животных раннего кембрия они сумели узнать многое о способах перемещения, диете и местах обитания самых разных существ на великом древе эволюции.

Во многих частях света почти невозможно не увидеть ископаемые остатки организмов, если вы хоть мало-мальски наблюдательны. Подберите какую-нибудь гальку на пляже, прогуляйтесь среди природы за городом или даже подойдите к банку — если его здание построено из осадочной породы типа известняка, — и вы почти наверняка наткнетесь на какую-нибудь окаменелость или отпечаток. Обильные остатки древних организмов сохранились, начиная с кембрийского периода; долго считалось, что причина этого только в том, что именно на этой временной границе животные обзавелись твердым панцирем. Но сейчас ученые поняли, что это лишь часть истории. Существуют некоторые типы пород кембрийского возраста, которые переполнены остатками животных, не имевших ни раковин, ни костей, ни зубов — они целиком состояли из мягких тканей. Такой материал обычно быстро разрушается, но при некоторых обстоятельствах — например, при быстром погребении в среде, бедной

кислородом, — даже мягкие ткани могут окаменеть. А если особые геологические условия сохранили такие ископаемые остатки в породах кембрия или более поздних, то спрашивается: а почему не более ранних? Ответ, по-видимому, в том, что нечему было сохраняться. Разнообразные многоклеточные животные претерпели бурный рост своей численности, начиная с момента около 540 миллионов лет назад; и именно это внезапное изменение характера записей в каменной летописи определяет границу между протерозоем и кембрием. Как указывает название данной главы, это изменение было определено как кембрийский взрыв; оно и было именно взрывом. Некоторые исследователи пришли к выводу, что в кембрийский период появилось не менее 100 классов (класс — это широкое подразделение в животном царстве, выделенное главным образом по строению тела), в то время как сейчас существует только около тридцати. Подтвердят или нет будущие исследования такое число первых типов, ясно одно: неопровержимым фактом является то, что конец протерозоя отмечен радикальным изменением характера жизни на Земле.

В главе 3 было отмечено, что ископаемая летопись жизни фактически началась задолго до кембрийского периода, будучи зафиксированной в породах, имеющих возраст в 3,5 миллиарда лет, и что имеются признаки существования еще более древней жизни, хотя прямые ископаемые остатки и отсутствуют. И все же в течение очень длительного промежутка геологической истории после первого появления жизни — более двух миллиардов лет — на Земле обитали, согласно имеющимся данным, только простейшие, одноклеточные организмы. Более сложные и подвижные животные оставили борозды и следы в иле, пусть даже их тела и не сохранились. Такие следы довольно часто встречаются в кембрийских

и более молодых осадках, но — хотя их тщательно искали — редко встречаются в предыдущий период времени и вообще не найдены в породах старше одного миллиарда лет.

В самом конце протерозоя перед собственно кембрийским взрывом в океанах появляется ряд мягкотелых животных. Эта группа организмов известна среди геологов как Эдиакаранская фауна — по названию местности Эдиакара в Австралии, где эти ископаемые остатки были впервые найдены. Время появления Эдиакаранской фауны на страницах ископаемой летописи точно не определено, но, вероятно, ее возраст не больше 100 миллионов лет до начала кембрийского периода. В общепринятом понимании она включает предшественников некоторых кембрийских и даже современных животных. Однако некоторые исследования последних лет заставляют предполагать иное. Характер строения тела у этих животных, с одной стороны, крайне своеобразен и отличается от любых других современных или кембрийских организмов. Ископаемые остатки свидетельствуют, что животные — представители Эдиакаранской фауны были в основном очень плоскими, сплюснутыми существами со множеством ячеек (их даже называют иногда «стегаными»), которые лежали повсюду на морском дне, словно миниатюрные коврики. Очевидно, у них не было никаких внутренних структур; некоторые палеонтологи предположили, что они представляют собой совершенно обособленное царство животных, отличающихся от всех известных нам сегодня. Если эта интерпретация верна, тогда животные Эдиакаранской фауны являются тупиковой ветвью эволюционного древа и их быстрое появление, расцвет и исчезновение из мировых океанов остается увлекательной загадкой.

КЕМБРИЙСКИЕ ИСКОПАЕМЫЕ ОСТАТКИ

Самые первые организмы, имевшие минерализованные части тела и поэтому оставившие после себя традиционные окаменелости, появились в кембрийский период. Самая ранняя их группа, называемая Томмотианской фауной — по названию местности в России, знаменует собой начало кембрийского взрыва; кажется, что она появилась на страницах каменной летописи в совершенно развитом виде, во всем своем значительном разнообразии и без каких-либо явных предшественников. Но даже эти ископаемые остатки тают в себе нечто загадочное. В силу отсутствия лучшего понимания их истинной природы палеонтологи называют их «мелкими раковистыми ископаемыми». Неясно, являются ли эти объекты — крошечные конусы, круглые уплощенные шляпки, маленькие свернутые кольцом или спиралью раковинки и многие другие — мелкими частями более крупных организмов или большими частями мелких организмов. Они появляются совершенно внезапно в начале кембрия, быстро достигают пика своей численности и разнообразия, затем быстро исчезают, чтобы уступить ведущее место другим животным. Но они все же достигли почти повсеместного распространения — их находят в самых ранних кембрийских породах по всему миру.

Даже геологам приходится иногда сделать паузу и поразмышлять над тем, что означают такие слова, как «быстрый» и «быстро», встретившиеся нам в предыдущем параграфе. Если для начала кембрийского периода нарисовать диаграмму (или график), на которую для различных значений времени нанести количество различных форм мелких раковистых ископаемых, как это делают палеонтологи, то она покажет, что в действительности означают такие выражения, как «внезапное появление»

и рост и столь же быстрое исчезновение. Возвышение и падение образуют на графике маленький резкий скачок, или пик. Но этот маленький пик занимает в ширину по крайней мере 10 миллионов лет. Как «быстрый рост» численности, так и быстрое распространение этих организмов по всему земному шару продолжались, вероятно, свыше миллиона лет. Миллион лет — это долгое время. Несколько миллионов лет назад в северном полушарии только начинался современный ледниковый период (который все еще продолжается, но подробнее об этом будет рассказано дальше), а собственный наш вид, *Homo sapiens*, еще не существовал. Десять тысяч лет назад, что составляет всего 1/100 миллиона лет, огромные клыкастые мамонты заполняли Северную Америку. Требуется постоянное усилие, чтобы удерживать геологическое время в правильной перспективе.

Поэтому быстрое распространение по всему земному шару животных, которые оставили нам маленькие раковистые окаменелости, не так уж и впечатляет, если принять во внимание подлинную огромность того отрезка времени, который для этого понадобился. Очертания суши в начале кембрия также очень отличались от современных. Хотя реконструкция мировой географии для такого отдаленного прошлого — дело нелегкое, есть достаточно данных для разумной уверенности в общих очертаниях суши. Многие из ныне отдельных континентов — Африка, Индия, Австралия, Южная Америка — были объединены в один массив суши, что, возможно, облегчало распространение мелких морских животных вдоль мелководий континентальных окраин. Но Северная Америка и нынешняя Сибирь были, очевидно, совершенно отдельными материками. На рис. 7.1 показана картина мира в начале кембрийского периода, что позволяет определить перспективу дальнейшего развития суши.

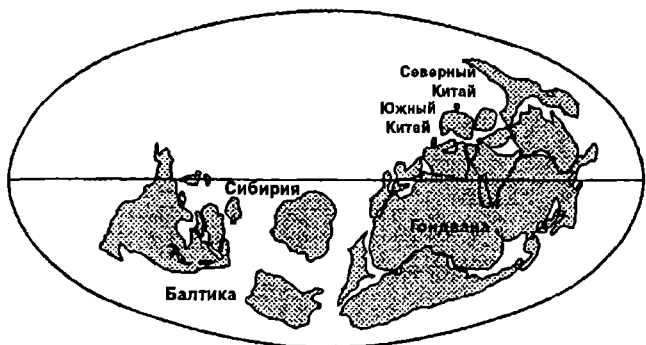


Рис. 7.1. Карта мира, показывающая приблизительное расположение континентов в начале кембрийского периода. Многие из современных континентов были в то время объединены в гигантский массив суши, называемый Гондваной, за исключением Северной Америки. Приводится с изменениями по рисунку 1 из статьи В. С. Мак-Керроу и др. в журнале *Journal of the Geological Society of London*, том 149, 1992, стр. 600.

Появление и распространение мелких раковистых окаменелостей Томмотианской фауны было всего лишь первым ударом пульса кембрийского взрыва. Вскоре после него появляется большинство главных групп беспозвоночных животных. Сюда входят такие животные, как губки и характерные для кембрия ископаемые животные трилобиты. Хотя они давно вымерли, в кембрийских морях они обитали во множестве. Они представляли собой большей частью очень небольшие плоские существа; почти все их разновидности ползали по морскому дну, обычно оставляя за собой характерные следы в мягком иле. Эти следы нередко встречаются в виде отпечатков. У трилобитов был твердый известковый внешний скелет, который, без сомнения, защищал мягкие части их тел от хищников; они хорошо сохранились во многих осадочных породах кембрия. Встречаются они настолько часто, что мелкие образцы можно дешево купить в магазинах,

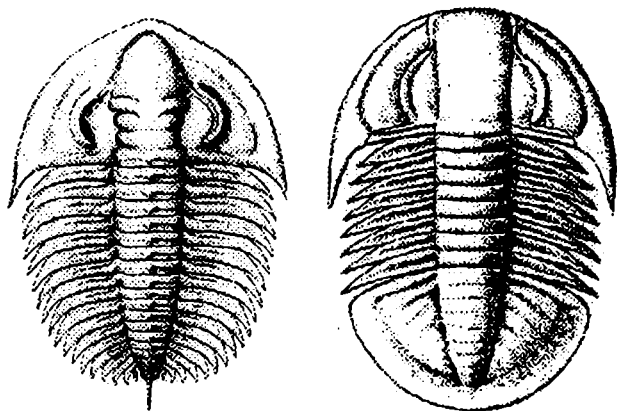


Рис. 7.2. Два обычных трилобита из кембрийского периода. Показанные здесь трилобиты, срисованные с подлинных окаменелостей, имели длину около 20 (левый) и 5 (правый) сантиметров. По рисункам 137-1а и 164-2 из книги «Курс палеонтологии беспозвоночных», часть О, под ред. Р. С. Мура, издательство Геологического общества Америки и Университета штата Канзас, 1959. Используется с разрешения.

специализирующихся на продаже образцов минералов, горных пород и других природных диковинок. На рис. 7.2 изображены два типичных кембрийских трилобита. Многие годы мы использовали мелких трилобитов с приклеенными к ним магнитиками для прищипливания к дверце холодильника газетных карикатур, детских рисунков и других артефактов. Какой позорный конец для обитателя кембрийских морей!

Почему у животных вдруг развился минерализованный скелет и твердые щитки именно в кембрии? И почему они появились в таком ошеломляющем разнообразии? Даже у тех, кто специализируется на исследовании этих вопросов, нет однозначного ответа. Конечно, животные с твердым панцирем имели больше шансов выжить среди хищников. А скелет, наряду с твердым внешним

покрытием, облегчал передвижение. Минералы, осаждаемые из раствора для образования твердых частей тела, представляли собой карбонат кальция и фосфат кальция. Было высказано предположение, что на границе между протерозоем и кембрием произошло изменение химического состава морской воды, которое облегчило образование именно этих минералов. Тем не менее трудно представить себе обстоятельства, которые могли бы привести к таким изменениям, но не появлялись на Земле множество раз на протяжении предшествующих нескольких миллиардов лет земной истории. Кажется вероятным, что у кембрийского взрыва была не одна причина; свою роль здесь сыграло совпадение многих факторов.

СЛАНЦЫ БЕРДЖЕСС-ШЭЙЛ

Интересной стороной кембрийской истории, относящейся к обсуждаемому вопросу, является то, что быстрое увеличение разнообразия животного мира не ограничивалось животными с твердым панцирем. Если изменившийся состав воды в океанах имел значение для развития скелета и раковин, то это только одна из возможных причин удивительного разнообразия жизни. Хотя традиционное представление об эволюции жизни в кембрии основано на минерализованных остатках организмов, в последнее время большое внимание уделялось более редким остаткам мягкотелых животных. Они сохранились в ряде мест, где геологические обстоятельства мешали их размыву. Вероятно, самой знаменитой является находка в Берджесс-Шэйл, в Скалистых горах, в южной части Британской Колумбии. В одном-единственном карьере в этой толще сланцев были найдены десятки

тысяч окаменелостей, демонстрирующих поразительное разнообразие очертаний и телесных форм. Их изучение дало палеонтологам ценнейшую информацию о процессе биологической эволюции. Два примера таких странных существ показаны на рис. 7.3.

Увлекательнейшей истории открытия и изучения окаменелостей в Берджесс-Шэйл посвящена книга, давшая название главе 3: «Чудо жизни». Ее талантливый автор, уже упоминавшийся С. Дж. Гулд, гарвардский палеонтолог, с энтузиазмом пишет на тему, явно близкую его сердцу. Его книга весьма рекомендуется для всякого, у кого есть пылкое желание узнать больше о разнообразных мягкотелых животных кембрия и их роли в эволюции. Многие из далее приводимого материала основываются на этой книге.

Геологи дают собственные имена толщам пород, которые имеют постоянные или почти постоянные физические свойства и облик и могут быть надежно прослежены и закартированы на большой площади. Сланцы Берджесс-Шэйл (или берджесские сланцы), в сущности, представляют собой всего лишь небольшой набор пород с условным названием в пределах такой толщи (Толща Стивен) в Скалистых горах штата Британская Колумбия. Слой осадочных пород, в котором первоначально были открыты берджесские окаменелости, имеет мощность всего два с половиной метра; в свое время утверждалось, что эта маленькая группа выходов горных пород заключает в себе большее разнообразие типов строения тела животных, чем все современные океаны! Подобно всем сланцам, берджесские сланцы состоят в основном из уплотненных и затвердевших тонкозернистых глин и ила. Первоначально эти породы отложились вдоль западного побережья Северо-Американского континента приблизительно в середине кембрийского периода.

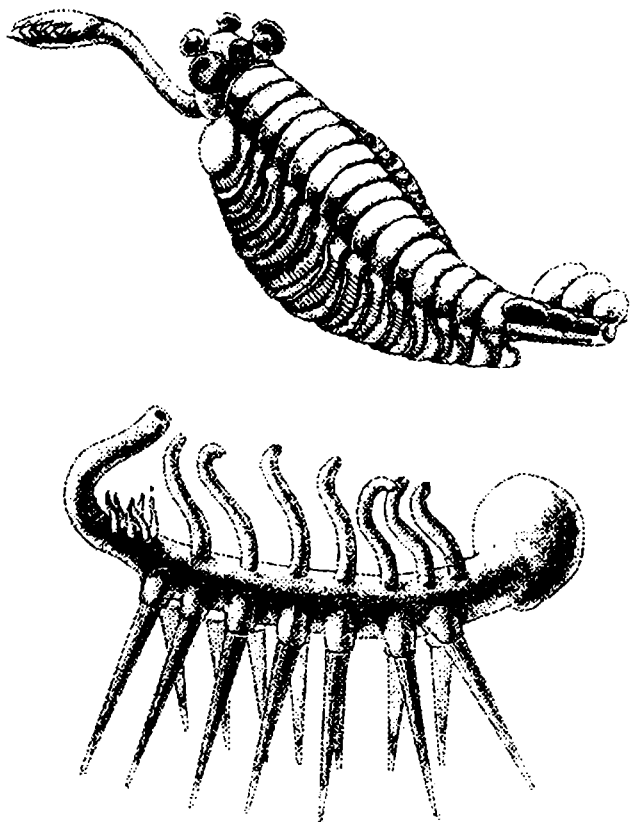


Рис. 7.3. Два представителя удивительных мягкотелых существ, найденных в окаменелом виде в сланцах Берджесс-Шэйл. У опатинии (верхний рисунок) было странное длинное «рыло» и пять вытаращенных глаз, а галлуцигенция (*Hallucigenia*) (нижний рисунок) умела «стоять» на морском дне, опираясь на свои семь пар «ног». Эти две иллюстрации представляют собой репродукции оригинальных рисунков Мэриан Коллинз из книги Стивена Дж. Гулда «Чудо жизни: Сланцы Берджесс-Шэйл и сущность истории». Перепечатано с разрешения издательства «В. В. Нортон энд Компани», авт. право © 1989 г., Стивен Джей Гулд.

Поскольку они хорошо обнажены на почти безлесных склонах, первоначальная геологическая обстановка сланцев Берджесс-Шэйл была установлена довольно детально при картировании, включая протяженность и взаимоотношения с окружающими типами пород. Содержащиеся в них окаменелые животные жили, очевидно, в относительно мелких прибрежных водах на илистых отмелях, выходящих в открытый океан. Эти отмели граничили с высокими, сложенными карбонатом кальция рифами, в свое время образованными водорослями. Некоторые из этих рифов достигали в высоту до 200 метров — своеобразный кембрийский эквивалент коралловых рифов, которые тогда еще не появились. Однако это ставит проблему перед исследователями сланцев Берджесс-Шэйл: если бы мягкотелые существа просто умирали на илистых отмелях, их бы целиком пожирала хищники или же они быстро разлагались бы. Более того, судя по их морфологии, многие из этих организмов, должно быть, ползали по илистому дну или зарывались в него, но никаких следов такого рода их деятельности не найдено.

Наиболее удовлетворительным решением этих загадок является, по-видимому, предположение, что животные сланцев Берджесс-Шэйл (да и растения, также обнаруженные среди окаменелостей) были смыты небольшими грязевыми лавинами, бесцеремонно сметены с их насыщенных кислородом и хорошо освещенных солнцем отмелей и погружены в более глубокие воды, где они оказались погребенными заживо и сохранились в бедной кислородом среде. Этот сценарий объясняет и то, почему ископаемые остатки организмов столь редко встречаются в остальной массе толщи, частью которой являются сланцы Берджесс-Шэйл, а если и встречаются, чаще всего появляются в больших количествах в ограниченных осадочных слоях.

Скопления остатков мягкотелых кембрийских организмов, подобные найденным в сланцах Берджесс-Шэйл, встречаются, хотя и нечасто, по всему земному шару. Их редкость, по-видимому, обусловлена не частотой находений, а тем, что обычно они не сохранялись.

Ко времени образования сланцев Берджесс-Шэйл в середине кембрия у некоторых организмов уже развились твердые части. Они сохранились в виде окаменелостей вместе со своими мягкотелыми современниками; поскольку и те, и другие составляют ассоциацию, обнаруженную и во многих других местностях, то отсюда был сделан вывод, что и в осадках, из которых образовались сланцы Берджесс-Шэйл, мягкотелые животные были также широко распространены. С некоторой уверенностью можно сказать, что в кембрийском взрыве приняли участие как мягкотелые животные, так и животные с твердыми частями.

Как рассказывает в своей книге Гулд, история открытия сланцев Берджесс-Шэйл вращается вокруг двух человек. Это С. Д. Уолкотт, геолог и очень влиятельный в свое время ученый, открывший остатки мягкотелых организмов в Берджесс-Шэйл в 1909 году, и Х. Уиттингтон, английский палеонтолог, предпринявший повторное изучение этой местности и ее окаменелостей в 1960-е годы. Уолкотт был признанным знатоком кембрийских окаменелостей. Ко времени открытия им сланцев Берджесс-Шэйл он был уже главой Смитсоновского института в Вашингтоне, округ Колумбия. Полевые работы в захватывающе прекрасных Скалистых горах, куда он часто брал с собой все свое семейство, были для него желанной передышкой от административных обязанностей.

Уолкотт наткнулся на окаменелости сланцев Берджесс-Шэйл в конце полевого сезона 1909 года и сразу же понял их значение. Его полевые книжки показывают, что он старался собрать и описать как можно больше образцов

за оставшееся в этом полевом сезоне время. В течение следующих четырех лет он каждое лето возвращался на это место. Кроме того, он еще раз посетил его в 1917 году. Всего он собрал и привез в Смитсоновский институт около 80 000 образцов!

Многие из животных, которых нашел и зарисовал в своих полевых книжках Уолкотт, были уникальными, невиданными прежде. Они обнаруживают невероятное разнообразие форм. Но Уолкотт был очень занятой человек: возвращаясь в Вашингтон после каждого полевого сезона, он взваливал на себя бремя административных обязанностей и бесконечных участий в заседаниях различных национальных комитетов и комиссий. В результате, как можно предположить, он не мог уделить достаточно времени на обдумывание собранной коллекции ископаемых остатков из сланцев Берджесс-Шэйл. Он опубликовал описание открытых им остатков, но ему не удалось издать какие-либо детальные аналитические работы. Несмотря на явную странность и причудливость форм тела этих организмов, явно следующую из приведенных им описаний, он включил их в состав хорошо известных в то время более молодых ископаемых и современных групп животных. Для характеристики такого подхода Гулд использует термин «рожок для обуви»; это очень подходящая характеристика: подобно сводным сестрам Золушки, но без злого умысла, Уолкотт попытался затолкать в стеклянный башмачок нечто не вмещавшееся в нем. Удивительно, но его характеристики не подвергались особому сомнению более чем полстолетия, вплоть до появления работ Уиттингтона и его коллег.

Сланец — порода, характерным свойством которой является способность раскалываться на плоские пластинчатые куски или плитки. В таких местностях, как Скалистые горы, усыпанные обломками сланца крутые склоны

дают геологу в конце рабочего дня редкую возможность: в некоторых местах можно, разбежавшись, скользить сотни метров вниз по склону на мини-лавине из мелких плиток сланца. Огромное количество свежих сколов дает возможность для отличной охоты за окаменелостями и отпечатками. На этих поверхностях скола остатки организмов имеют вид уплощенных двумерных проекций первоначальных животных. Именно такими считал их Уолкотт. Открыть трехмерную природу этих существ стало задачей Уиттингтона и его талантливых сотрудников в рамках проекта работы над берджесскими окаменелостями. В процессе этой работы они поняли, что никаким «рожком» нельзя запихнуть их в готовые группы, как это предлагал Уолкотт.

Уиттингтон работал над материалом по сланцам Берджесс-Шэйл в Кембриджском университете в Соединенном Королевстве. Вместе с двумя своими помощниками, аспирантами Конвеем Моррисом и Дэреком Бриггсом, ныне справедливо признанными экспертами, он совершил настоящую революцию в общепринятых представлениях об эволюции животных в кембрии. Эти трое ученых показали, что кембрийская эволюция не только не была упорядоченным переходом от примитивных к более развитым формам с постоянно возрастающим количеством различных, специализированных групп, а скорее представляла собой хаотические изменения, поистине игру случая, богатую экспериментами, которые часто терпели неудачу. Они описали и изучили великое множество остатков животных, которые, видимо, не оставили никаких распознаваемых потомков.

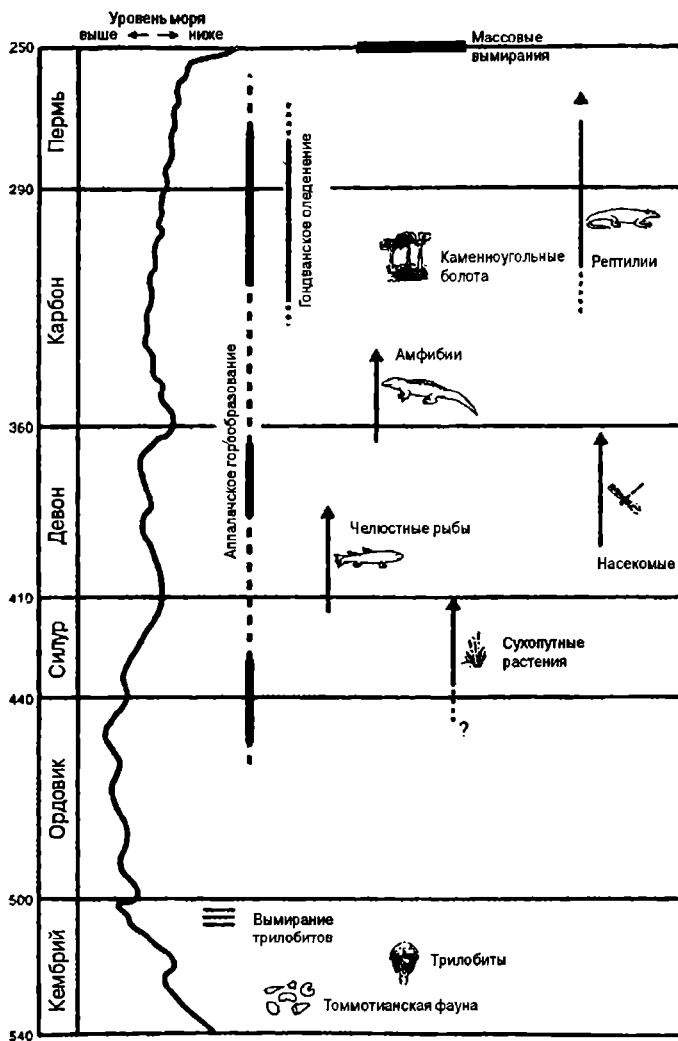
Хотя Уиттингтон и его коллеги собрали свои собственные коллекции окаменелостей из сланцев Берджесс-Шэйл, собрание Уолкотта было все же гораздо больше и полнее, и многие их открытия были результатом повторного изучения образцов из коллекции Смитсоновского

института. Их успех зависел также от принятого ими подхода. С помощью микроинструментов, таких, как, например, зубо врачебные сверла, Уиттингтон с сотрудниками с невероятным упорством *анатомировали* (!) окаменевших животных, отдельные экземпляры которых имели размеры всего в несколько сантиметров, вдоль от-ростков и выступов слой за слоем, снимая твердую поро-ду, чтобы определить (например) число суставов в конеч-ности, а при удобном случае даже извлекая различные глаза мелкие организмы из внутренностей более круп-ных — остатки кембрийского обеда. Эти очень подро-бные исследования позволили группе Уиттингтона доку-ментировать уникальность многих берджесских животных.

Больше никто не сомневается ни в удивительном раз-нообразии фауны сланцев Берджесс-Шэйл, ни в том, что это разнообразие развилось очень быстро — в геологиче-ском смысле. Однако существуют все еще не разрешенные разногласия в отношении выводов из этих наблюдений. Некоторые считают это изобилие телесных форм палеон-тологической загадкой, поскольку многие из принадле-жащих к этой фауне животных не имеют в ископаемой летописи ни предшественников, ни наследников. Другие исследователи рассматривают проблему более оптими-стично и подозревают, что она возникла в результате не-полноты геологической летописи. В конце концов очень много пробелов есть и в каменной летописи животных со скелетом и твердыми частями тела. Возможность сохра-нения большей части мягкотелых организмов из сланцев Берджесс-Шэйл сравнительно ничтожна. Более того, в са-мом начале эволюции многоклеточных организмов нельзя не ожидать большого разнообразия и быстрого увеличе-ния этого разнообразия, поскольку организмам пришлось приспособляться к самым разным экологическим ни-шам и условиям обитания. Следовало бы ожидать также

частые и быстрые вымирания, когда оказывалось, что некоторые эволюционные решения не работают; тогда быстро распространялись другие группы, чтобы заполнить пробелы. Может быть, в природе оказалось бы больше непрерывности и постепенности, чем это кажется, если бы только существовал материал, который позволил бы палеонтологам проследить быстро меняющиеся пути и направления эволюции. В настоящее время геологи живо интересуются результатами исследований скоплений окаменелостей типа берджесских, которые были открыты в различных районах мира. Не исключено, что очень скоро наши представления о кембрийском взрыве окажутся под еще более острым вниманием исследователей.

Я заканчиваю эту главу интригующим вопросом, который поставил С. Дж. Гулд: а что было бы, если бы пленку прокрутить повторно? Независимо от различий в интерпретации кембрийской каменной летописи, большинство специалистов в этой области, вероятно, согласились бы, что результат — сегодняшний мир животных — был бы другим и даже, что вполне возможно, радикально другим. Быстрое увеличение разнообразия форм жизни в течение кембрия (а также в некоторые другие периоды времени) вместе с вымираниями явно случайного характера оставило группы уцелевших животных, выбранных эволюцией скорее случайным образом, чем согласно какому-либо предопределению. Конечно, такие факторы, как приспособляемость или терпимость к широкому диапазону условий окружающей среды, могли способствовать выживанию отдельных видов или групп животных, но если бы процесс мог быть запущен сначала, маловероятно, чтобы в результате сохранились те же самые группы. И весьма вероятно, что вид *Homo sapiens* никогда бы не появился — такой вывод, в высшей степени неприятный для некоторых, кажется неизбежным.



События палеозойской эры, включая изменения уровня океана. Время в миллионах лет.

Глава 8

РЫБЫ, ЛЕСА И КОНТИНЕНТ ГОНДВАНА: ПАЛЕОЗОЙСКАЯ ЭРА

Кембрийский взрыв ввел нас в палеозойскую эру, название которой буквально означает «эра древней жизни». В течение 300 миллионов лет она была свидетелем развития жизни от примитивных существ, сохранившихся в окаменевшем виде в сланцах Берджесс-Шэйл, до рыб, насекомых, пресмыкающихся и, в конце концов, до непосредственных предшественников млекопитающих. Материки и океаны стали к этому времени уже вполне пригодной для обитания живых существ средой. К концу палеозойской эры с ее теплым, благоприятным для жизни климатом широко распространились роскошные болотистые леса — источник многих наших угольных месторождений. Почти весь палеозой большая часть современных южных континентов — Африка, Южная Америка, Австралия, Индия и Антарктида — соединялись, образуя гигантский материк Гондвану. К концу этой эры в результате столкновений между Гондваной и остальными континентами образовалась еще большая масса суши, которую геологи называли Пангеей и которая включала практически все современные континенты. Пангея простиралась от полюса до полюса; столкновения, связанные с ее образованием, привели к формированию горных цепей на территории нынешних Северной Америки (восточная часть), Шотландии, Азии, восточной Австралии, а также других территорий. В конце палеозоя, как бы отмечая конец этой эры, произошло, вероятно,

крупнейшее за всю историю Земли массовое вымирание животных и растений. Ни одно живое существо не избежало в той или иной степени его влияния. Животные и растения, обитатели океанов и суши — все они в той или иной мере пострадали. Целые виды и семейства просто исчезли из каменной летописи. В семействах, которые все же выжили, часто осталось всего несколько видов. Причина этой всемирной катастрофы до сих пор неизвестна.

Палеозойские породы широко распространены на всех континентах. По сравнению с предшествующим временем для этой части земной истории имеется значительно более полная запись обо всех событиях. Частично это обусловлено тем фактом, что большую часть палеозоя уровень моря был очень высок. Внутренние области континентов часто затоплялись мелководными морями, на дне которых слой за слоем накапливались осадки. Они служили местом погребения растений и животных, сохраняя информацию о климате и характере окружающей их среды. Например, в Северной Америке во время палеозоя большая часть территории периодически оказывалась под водой. Эти промежутки затопления отражались в характере палеозойских осадков, которые и сейчас еще покрывают чуть ли не весь континент. Их сохранению способствовал тот факт, что ядро Северной Америки, фундамент, на котором откладывались осадки, представляет собой древний устойчивый щит архейских и протерозойских пород, спокойный в геологическом смысле и низко лежащий. Такие регионы сравнительно мало подвержены эрозии.

Хорошая сохранность палеозойских и более молодых пород, море содержащейся в них информации о жизни, климате и тектонике делают весьма трудной задачу кратко рассказать об отрезке земной истории, охватывающем

последние полмиллиарда лет. Тут столько интересных подробностей, что возникает реальная опасность не разглядеть леса из-за деревьев. По этой причине здесь и в последующих главах мы даем только общую картину некоторых самых значительных событий, и лишь немногие из них рассматриваются сколь-нибудь подробно. Возможно, вы заметили, рассматривая рис. 1.1, что каждая из трех геологических эр, на которые разделен отрезок из последних 500 миллионов лет, — палеозой, мезозой и кайнозой, — короче по фактическому количеству лет, чем предшествующая. Так получилось потому, что — как и во всякой истории — в каждом из последующих периодов содержится все больше и больше информации для дальнейшего подразделения. Для тех, кто захочет глубже покопаться в этой летописи, мы приводим в конце книги краткую библиографию. Эти источники и содержащиеся в них ссылки должны удовлетворить большинство любителей.

ТРИЛОБИТЫ И ПРИЧИНЫ ВЫМИРАНИЯ

В начале палеозоя континенты все еще оставались почти безжизненными. За исключением водорослей, которые к этому времени уже колонизировали сушу и, вероятно, придали влажным районам зеленоватый оттенок, в целом континенты были скорее всего столь же голы, как поверхность Луны. Но к концу эры уже стояли леса, кишели крылатые насекомые, а среди зелени шныряли пресмыкающиеся. В озерах, которыми изобиловала Пангея, было полно рыбы. Развитие этих форм жизни достаточно хорошо известно; это увлекательнейшая история. Повествование продвигается медленно и однообразно, но изредка очерчивается резкими изменениями.

В предыдущей главе был очень кратко описан кембрийский взрыв. Это событие привело к развитию океанской флоры и фауны, не имевшему прецедента в предшествующей истории Земли. Это было только начало. Очень быстро, если судить по масштабам уже прошедшего времени, появились новые формы жизни. При этом некоторые старые формы приходили в упадок, а иногда совершенно внезапно вымирали. Конкретные причины этих быстрых изменений в деталях неизвестны, но большей частью эти вымирания были ответом на внешние стимулы. Если бы мир был совершенно устойчив, с неизменным климатом, с постоянной средой, постоянной плотностью населения и без дрейфа континентов, то многие из этих изменений, вероятно, никогда бы не произошли. В крайнем случае они происходили бы гораздо медленнее.

Трилобиты, эти характерные кембрийские животные, являются поучительным примером вымирания видов и его возможных причин. Их история особенно хорошо документируется в Северной Америке, которая на протяжении почти всего кембрия находилась на экваторе и периодически затапливалась теплыми мелкими морями. Было открыто много видов кембрийских трилобитов; по типам осадков, в которых они окаменели, оказалось возможным кое-что узнать об их образе жизни. В эту группу входили плавающие формы, обитатели дна, виды, жившие в теплых мелководьях и в более глубоких и холодных водах. Большинство отдельных видов трилобитов сохранялись в каменной летописи в течение всего лишь нескольких миллионов лет или даже меньше, хотя в каждый момент времени одновременно существовало много различных видов. Регулярное исчезновение видов, живших до этого несколько миллионов лет, и появление новых видов являются частью «шумового фона»

эволюции. Однако в течение трех отдельных моментов времени ближе к концу кембрийского периода большое количество видов, которые, казалось бы, процветали, внезапно исчезло; это заняло всего несколько тысяч лет или, может быть, даже меньше. Одно из этих «массовых вымираний» трилобитов отмечает конец кембрийского периода. После каждого такого вымирания следовал период, называемый палеонтологами периодом адаптивной радиации, то есть быстрого распространения многих новых видов из одной или нескольких прародительских групп.

Что же послужило причиной этих внезапных событий? Вымирания животных и растений происходили неоднократно на протяжении всей истории жизни на Земле, из которых одни затрагивали только несколько видов, в то время как другие были, по-видимому, глобальными и катастрофическими. Геологи и палеонтологи пытались открыть причины этих вымираний, изучая каменную летопись. Как правило, им не удавалось найти однозначные ответы, но они обнаружили целый ряд повторяющихся тем. Эти темы включают изменения климата, перемещение континентов, эволюцию хищников и изменения уровня моря. В частном случае трилобитов имеются признаки того, что свою роль сыграли изменения климата. По-видимому, вымирание было самым катастрофическим для видов, обитавших в самых теплых водах. Более того, предками большинства быстро развивавшихся после каждого вымирания видов были трилобиты, жившие в более глубоких и холодных водах вдоль окраин континентов; это заставило многих геологов сделать вывод, что вымирание было обусловлено внезапным похолоданием. Виды, обитавшие в холодной воде, оказывались способными выдержать изменение; те же, которые приспособились к более теплой воде, вымерли. Хотя эту гипотезу

ни в коей мере нельзя считать доказанной, она является вполне разумным выводом из имеющихся данных. Этот пример, касающийся трилобитов, не является уникальным: есть много мест в каменной летописи с признаками того, что климатические изменения играют важную роль в ходе эволюции.

Тем не менее отнюдь не все изменения флоры и фауны в палеозое вытекали из изменчивости климата, во всяком случае, непосредственно. Так, численность строматолитов, столь широко распространенных в протерозое, постройки которых возникали слой за слоем из водорослевых пленок, или «циновок», в течение палеозоя резко уменьшилась. Но в этом случае нет никаких признаков того, что это как-то связано с изменениями климата. Наоборот, их упадок большей частью связывается с появлением хищников, питавшихся водорослями, и роющих животных, которые пожирали тонкие водорослевые слои строматолитов, как только те разрастались. Строматолиты нашего времени живут только в очень ограниченной среде, в которой такие хищники отсутствуют или редки.

Многие вымирания, возможно, связаны с изменениями уровня моря, хотя почти нет данных, свидетельствующих о том, что это может быть приложено к трилобитам или строматолитам. Все же даже сравнительно небольшие изменения в уровне океанов могли коренным образом изменить среду обитания вдоль береговых линий океанов или в мелководных внутренних морях. Поэтому они могли вызвать большие перерывы в геологической истории организмов, живших в такой среде. Но как мы можем узнать что-нибудь об изменениях уровня моря, происходивших сотни миллионов лет назад? Очевидно, что в то время некому было проводить измерения, но опять же, в горных породах есть ключи для решения и этой задачи. Камни рассказали нам одну интересную историю,

и следующий раздел — небольшое отклонение от подробностей истории палеозоя — иллюстрирует ход рассуждений, с помощью которого ученые разыскивают детали подъема и опускания уровня океана.

ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ОКЕАНА

Как показывает каменная летопись, большую часть палеозоя уровень океана относительно континентов был довольно высок. Но при этом происходили его значительные колебания. Море нередко проникало в глубь континентов, но и периодически отступало. Некоторые особенно хорошо документированные свидетельства изменения уровня моря найдены в породах западной части Северной Америки.

Ключ к пониманию того, как изменения уровня моря отмечаются на страницах каменной летописи, очень прост: большинство осадочных пород первоначально было отложено в воде, а все водные бассейны накапливают на своем дне какие-нибудь осадки. Под воздействием дождей и эрозии все породы континентов рассыпаются и сносятся вниз; обломки минералов — результат этого процесса — смываются реками в озера и моря, где оседают в виде слоев осадка. Более того, грубозернистый материал выпадает первым, тогда как более тонкие зерна остаются взвешенными в воде и выносятся дальше в море. Таким образом, тип формирующегося осадка зависит от глубины водного бассейна. Имея в виду эти очевидные принципы, можно многое узнать об изменениях уровня океанов, которые происходили в палеозое.

Осадочные породы западной части Северной Америки особенно поучительны в этом отношении, поскольку в самом начале кембрия и в течение всего времени отложе-

ния сланцев Берджесс-Шэйл территория, ныне занимаемая Скалистыми горами, располагалась на окраине континента. Реконструкция мировой географии показывает, что в кембрии этот континент был повернут относительно своего нынешнего положения и то, что мы сейчас называем западной частью Северной Америки, фактически лежало на северной окраине континента, рядом с экватором (рис. 7.1). Но для нашего рассказа это несущественно. Главное то, что большая часть западной части континента была весьма устойчивой — там не было ни столкновений с другими плитами, ни вулканизма, приуроченного к областям субдукции океанических плит. Большую часть палеозоя вдоль этой спокойной континентальной окраины откладывались осадки. Если вам когда-либо доводилось бывать в Большом Каньоне, вы видели результаты этого процесса: горизонтально залегающие пласты пород, слагающие большую часть стен карьера, простираются во времени от кембрия до перми (пермского периода), то есть охватывают всю палеозойскую эру. А если вы посмотрите внимательно, то заметите, что стены каньона сложены различными породами, каждая из которых представляет в разрезе особую среду осадкообразования. По существу, часть красоты этого каньона обусловлена именно этим разнообразием пород, поскольку каждая из них эродируется особым образом, так что одни из них образуют уступы и крутые обрывы, другие дают при выветривании более мягкие склоны. Не так очевиден случайному наблюдателю тот факт, что в последовательности осадков, наблюдающейся в стенках каньона, имеются большие перерывы, соответствующие значительным периодам времени в течение палеозоя, которые не представлены какими-либо породами. Как эти отсутствующие части разреза, так и изменчивость типов пород являются, по крайней

мере частично, результатом флуктуаций уровня моря в палеозое.

Совершенно очевидно, что на окраинах континентов наиболее распространенным типом осадков является песок. Вдоль большей части морских побережий вам не нужно далеко ехать или идти, чтобы найти песчаный пляж, хотя бы маленький. Берега представляют собой активное место, где океанские волны дают массу энергии для переноса и сортировки материала, приносимого к ним реками; тонкозернистые осадки типа глины, являющейся главным минералом сланцев, просто не накапливаются в таких местах. Сравнительно грубозернистый песок откладывается у берега, в то время как более мелкие частицы остаются во взвешенном состоянии (в суспензии) в воде и переносятся в более глубокие и спокойные воды, где они медленно оседают на дно в виде ила, который в течение долгих периодов времени затвердевает, превращаясь в глинистый сланец. Еще дальше от берега большая часть тонкозернистого материала уже выпала в осадок из водной толщи; здесь основная масса накапливающегося осадка состоит главным образом из остатков морских организмов, живших близ морской поверхности и формировавших свои раковинки или скелеты из карбоната кальция. Такие отложения в конце концов превращаются в известняки. Таким образом, если бы вы захотели изучить последовательность типов осадков, начиная от береговой линии, в сторону моря и не в одном месте, а во многих местах берега, вы обнаружили бы одну и ту же последовательность, состоящую из песка, ила или (дальше от берега) глинистого сланца и, наконец, осадка, состоящего в основном из карбоната кальция. А теперь представьте себе, что бы получилось, если бы уровень моря стал повышаться. Вся последовательность осадков сдвинулась бы в сторону континента. Песчаные

осадки прежней береговой линии располагались бы дальше от края моря, в более глубокой воде. Глинистый сланец отлагался бы поверх песчаных слоев. Дальнейшее поднятие уровня моря привело бы к тому, что прежняя береговая линия оказалась бы на еще большей глубине и на сланец стал бы отлагаться осадок, богатый карбонатом кальция. Таким образом, последовательность осадков (от берега к глубоким водам) песчаник—сланец—известняк стала бы с течением времени *вертикальной* последовательностью тех же пород для положения старой береговой линии. Это именно то, что наблюдается в Большом Каньоне. Но можем ли мы действительно применить принцип актуализма и интерпретировать вертикальную последовательность Большого Каньона как результат постепенного изменения глубины воды вдоль края палеозойского континента? Ответом на этот вопрос будет решительное «да», поскольку на протяжении всей западной части Северной Америки одна и та же последовательность пород наблюдается как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. Геологические карты, составленные для какого-нибудь определенного момента времени, показывают почти одинаковую последовательность типов осадочных пород, сходную с той, что и сейчас можно наблюдать вдоль береговых линий, как, например, на Золотом Берегу в Соединенных Штатах: песчаник—глинистый сланец—известняк (в направлении с востока на запад). Карты, составленные для более ранних или более поздних моментов времени, показывают ту же последовательность, но сдвинутую географически, что отражает факт поднятия и опускания уровня моря, при которых береговая линия мигрировала на восток и на запад. Эти особенности геологического разреза схематически показаны на рис. 8.1.

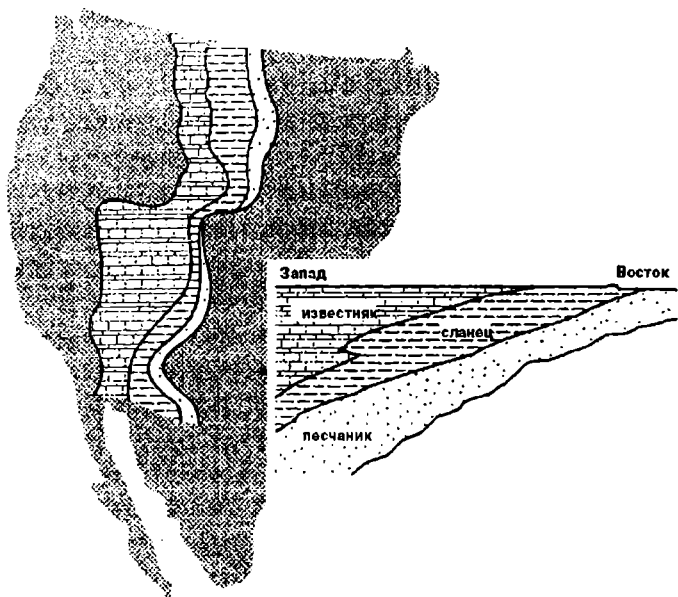


Рис. 8.1. Распределение песчаников, сланцев и известняков в западной части Соединенных Штатов, показанное на карте (слева), отражает распределение глубины моря в некоторый момент геологического времени в начале палеозойской эры. Песчаники отмечают положение края континента, более глубокие воды располагались западнее. В приведенном поперечном разрезе (показанном здесь в увеличенном вертикальном масштабе) возраст пород увеличивается сверху вниз, а горизонтальная поверхность (на рисунке ей соответствует горизонтальная линия) отмечает распределение типов пород в конкретный момент времени. Таким образом, можно видеть, что береговая линия постепенно передвигалась с запада на восток. Приводится с изменениями по рисункам 19-3 и 19-4 из книги: С. В. Барнз «Земля, время и жизнь». Изд-во «Джон Уайли и Сыновья», 1988. Использовано с разрешения.

Но даже если эти наблюдения принять как свидетельство поднятия и опускания уровня моря, то все еще остается вопрос: а что же на самом деле происходило — поднимался или опускался континент, или же изменялся

абсолютный уровень моря? В конце концов, смена осадков регистрирует только относительные изменения, а мы знаем, что континенты испытывают вертикальные движения — породы на вершинах высоких гор, таких как Альпы или Скалистые горы, часто содержат ископаемые остатки существ, живших в океане, а мы знаем, что океаны никогда не были *столь* глубокими. И тем не менее вопрос об истинном уровне океана и его изменениях мог бы быть убедительно решен, если бы данные, подобные только что описанным для западной части Северной Америки, были бы получены для пород того же возраста, но из других географически широко распространенных регионов. Геологи довольно подробно нанесли на карты распространение различных типов осадочных пород почти на всем земном шаре; в результате синтеза этих данных в настоящее время достигнут довольно высокий уровень понимания как степени, так и времени глобальных изменений уровня Мирового океана на протяжении всего фанерозоя. Итог всей этой информации для палеозойской эры подведен на рисунке данной главы, где показаны временная шкала и главные события этой эры. Из этого рисунка очевидно, что на протяжении всей этой эры уровень океана был высок.

Если каменная летопись говорит о больших изменениях уровня океанов, то возникает очевидный вопрос — почему? Насколько нам сейчас известно, существует, в сущности, только две возможности: в прошлом могли происходить изменения либо объема самой воды в океанах, либо тех образований, которые замещают воду, как, например, континенты, острова или океанские хребты. Например, мы знаем, что ледниковые периоды характеризуются понижением уровня моря, поскольку большие количества воды, находящейся на суше, свя-

запы в виде ледниковых щитов. Было подсчитано, что в период наибольшего продвижения ледового покрова на суше, приблизительно 20 000 лет назад, уровень моря был ниже, чем сейчас, более чем на 100 метров. И хотя большая часть этой массы льда растаяла, на Земле остается большое количество замерзшей воды в виде ледяных покровов вокруг полюсов. Если бы они растаяли, то уровень моря поднялся бы на 65 метров. Может быть, это звучит не так уж грозно, но вспомним, что значительная часть населения Земли живет вдоль берегов морей и океанов. Город Мехико при такой катастрофе уцелел бы, но большая часть таких городов, как Лос-Анджелес, Нью-Йорк, Токио и Берлин — назовем лишь несколько для примера — подверглась бы затоплению.

Хотя оледенения сильно влияют на уровень моря, большая часть его колебаний, которые отразились в палеозойских породах, не приходится на те моменты, для которых имеются независимые свидетельства глобальных оледенений. Очень вероятно, что они обусловлены изменениями объема океанических хребтов. Как описано в главе 5, вдоль продольных разломов в океанических хребтах изливается горячая магма, создавая новое океанское дно. Когда средняя скорость расширения морского дна увеличивается, — то ли потому, что образуются новые сегменты хребта, то ли оттого, что старые расширяются быстрее, — объем системы океанических хребтов в целом также возрастает. Примерно то же произойдет, если бросить кирпич в ведро с водой — уровень воды поднимется в соответствии с объемом кирпича. Кажется вероятным, что общий высокий уровень океана в палеозое обусловлен системой океанических хребтов, объем которой в целом был больше, чем теперь.

ВЕЛИКИЙ РАСКОЛ: ОБРАЗОВАНИЕ АППАЛАЧСКИХ ГОР

Осадки, которые отлагались в западной части Северо-Американского континента, верно и более или менее непрерывно фиксируя подъемы и опускания уровня океана, накапливались вдоль так называемого пассивного края, то есть окраины континента, которая полностью лежит в пределах большой плиты, в стороне от области столкновения континентов, субдукции или вулканизма. Таково состояние восточного берега Северной Америки сегодня. Что касается западной части этого континента, то есть данные о том, что в конце палеозоя здесь происходили столкновения с небольшими фрагментами вулканической коры, представлявшими собой нечто вроде островных дуг, которые характеризуют западную часть современного Тихого Океана; в то же время нет признаков крупных столкновений между континентами. На противоположной стороне континента ситуация была резко отличной. В восточной части Северной Америки сохранилось много признаков вулканизма, столкновения континентов и горообразования, происходивших в течение всего палеозоя — часть процесса, соединившего все существовавшие тогда континенты в один сверхконтинент Пангею.

Записью в каменной летописи об этом процессе является Аппалачский горный пояс. Эта геологическая провинция простирается от острова Ньюфаундленд на севере до штата Алабама на юге, и это только та часть пояса, которая теперь обнажена (рис. 4.3). Большая часть первоначального горного пояса в наше время погребена под покровом позднейших отложений. Как можно ожидать от такой грандиозной структуры, Аппалачские горы имеют довольно различное продольное строение, что

является результатом различий в деталях геологической истории их частей. Но если отвлечься от деталей, то укрупненные черты строения Аппалачей говорят о том, что этот горный пояс фиксирует в каменной летописи этап закрытия древнего океанического бассейна и склеивание, или слипание, трех крупных континентальных плит — Северной Америки, Европы и Африки — в единый материк. Хотя эти события происходили сотни миллионов лет назад, тщательное сопоставление сохранившихся пород Аппалачей с более молодыми горными цепями типа Альп, которые тоже сформировались в результате столкновения континентов, обнаруживает много сходных черт.

Сегодня Аппалачи представляют собой отнюдь не могучий горный хребет с зазубренными, покрытыми снегом вершинами, а скорее ряд приятных глазу сглаженных холмов и долин. В Аппалачскую геологическую провинцию входят прекрасный Голубой хребет штата Вирджиния, Большие Скалистые горы Северной Каролины и Зеленые горы штата Вермонт. Современный рельеф этого края имеет мало общего с первоначальными горами, которые были снесены эрозией уже к середине мезозойской эры. В южной части эта провинция по крайней мере на половину ширины эродированного хребта покрыта осадками береговой равнины. Современные горы образовались в результате довольно мягкого поднятия древних, смятых в складки пород в геологически совершенно недавнем прошлом, за которым последовала неоднородная эрозия различных типов пород и формирование типичного для древних хребтов рельефа из чередующихся долин и покатых гор.

Хотя Аппалачские горы имеют сложное геологическое строение, они весьма подробно изучались американскими и канадскими геологами на протяжении более чем столетия; их физические особенности хорошо известны. Все

же теории их образования и эволюции, которые были выдвинуты до появления в 1960-е годы теории тектоники плит, оказались неубедительными. В частности, в этих первых сценариях отсутствовали механизмы, которые могли бы объяснить вулканизм, расколы и сильный метаморфизм, проявления которых обнаруживаются в современных породах этих гор. По мере осознания того, что и континенты, и океаны не являются неподвижными элементами строения Земли, стали выдвигаться более приемлемые гипотезы. В самом общем виде наиболее общепринятый взгляд на образование Аппалачских гор описывается ниже. Однако вы должны понимать, что в действительности это был процесс гораздо более сложный и что последовательность событий сильно изменялась в деталях от места к месту вдоль обширного протяжения образующейся Аппалачской горной цепи.

По мере подъема уровня моря в течение кембрия и в начале ордовика береговая линия восточной части Северной Америки постепенно перемещалась на запад. Вдоль восточного края этого континента откладывались мощные толщи морских осадков, особенно карбонатных пород типа известняка. В это время восточное побережье, как и западное, все еще оставалось пассивной окраиной. Но к середине ордовикского периода океан на востоке начал закрываться из-за субдукции морского дна (рис. 8.2.). Вскоре произошел первый из трех эпизодов горообразования, которые были выделены в истории Аппалачских гор, когда последний из участков морского дна поднырнул под наступавшую с востока плиту. Северо-Американский континент столкнулся с несколькими фрагментами коры, в результате чего большая платформа карбонатных осадков, накопившихся вдоль окраины, была смята и части ее были отодвинуты далеко на запад в сторону внутренней части континента.

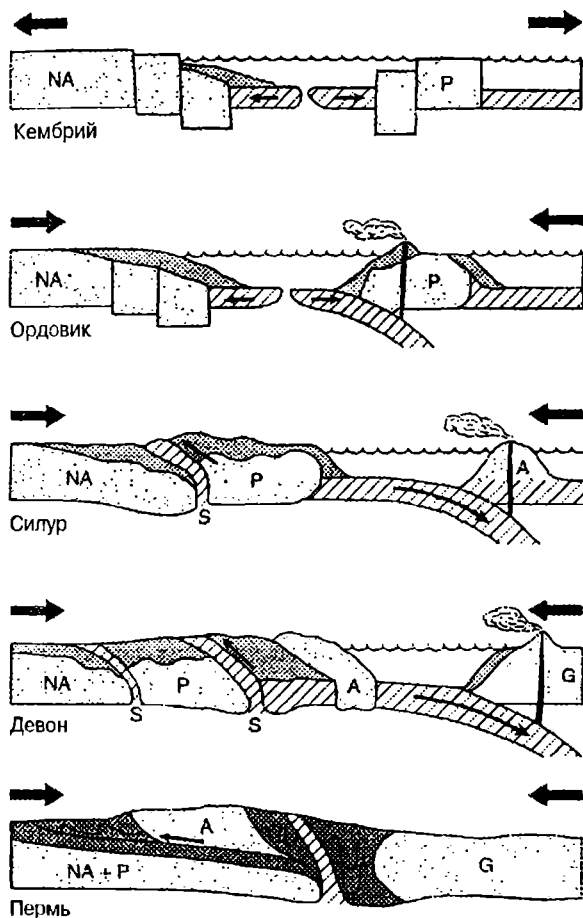


Рис. 8.2. Упрощенная реконструкция некоторых важнейших эпизодов истории южной части Аппалачских гор. Буквы на разных блоках коры означают: А — Северная Америка, С — Гондвана, Р и А — различные островные дуги или микроконтиненты, которые сталкивались с Северной Америкой. Расшифрованные шовные зоны (S) отделяют эти блоки друг от друга. Составлено по рисунку 13.28 из книги: Р. Х. Дотт, мл., и Д. Р. Протэро. «Эволюция Земли», изд. 5-е, изд-во «Мак-Гроу-Хилл», 1994. Печатается с разрешения.

На востоке на конвейерной ленте тектоники плит все еще оставался остаток океана, который продолжал закрываться по мере дальнейшей субдукции. В конце концов, вероятно, около 380–390 миллионов лет назад этот процесс полностью поглотил океан, и то, что сейчас называется Скандинавией, вместе с частями нынешней Великобритании столкнулось с Северной Америкой. Этот второй эпизод Аппалачского горообразования проявился подобным образом и в Европе — типы пород, ископаемые остатки организмов и геологические структуры этого времени по обеим сторонам Атлантического океана очень схожи. Спустя приблизительно 70–80 миллионов лет еще один большой континент — Северо-Восточная Африка (вероятно, вместе с Южной Америкой) — столкнулся с южной частью Северной Америки, что послужило началом последнего из трех главных периодов Аппалачского горообразования. Это столкновение, вероятно, послужило причиной образования гор Вуачита в Оклахоме и Арканзасе, являющихся по существу продолжением Аппалачских гор вокруг южного края Северной Америки. В очень упрощенном виде рис. 8.2 показывает ряд кадров, иллюстрирующих последовательность этих столкновений. Имейте в виду, что этот схематический рисунок относится главным образом к событиям, протекавшим в южной части Аппалачских гор, и показывает столкновение с островной дугой (А), а не с Северной Европой на второй стадии Аппалачского горообразования.

Последний импульс Аппалачского горообразования спаял вместе гигантский южный континент, Гондвану, частью которого являлась Африка, и северную американско-европейскую массу суши, что явилось одним из последних шагов в сборке огромного, от полюса до полюса, мегаконтинента Пангеи (рис. 8.4). Как мы увидим далее,

гораздо позднее этот гигантский континент снова раскололся, и на месте этого разлома возник современный Атлантический океан.

Процесс, сформировавший Аппалачские горы, является типичным примером образования и более молодых горных поясов, таких, например, как Альпы. И хотя детали этих процессов часто остаются неопределенными, многие из гораздо более древних геологических провинций, как, например, провинция Гренвиль, рассмотренная в главе 4, являются, вероятно, результатом сходных процессов. По существу и провинция Гренвиль, и Аппалачская представляют собой параллельные и рядом лежащие пояса (рис. 4.3); обе они возникли в результате столкновений вдоль восточной окраины Северной Америки; обе присоединили новые части коры к окраине континента. Возрастное строение Северо-Американского континента с приблизительно концентрическими полосами все более молодой коры, окружающими древние континентальные ядра, привели многих геологов к точке зрения, согласно которой рост континентов происходит путем наращивания новой коры на окраинах.

Аппалачские горы не единственные, которые образовались в течение палеозоя. Уральские горы в центральной России также являются результатом столкновения двух континентов ближе к концу этой эры — еще один шаг в сборке гигантского массива суши, называемого Пангеей. Очевидно, что современный Урал не располагается больше параллельно континентальному краю в отличие от Аппалачского горного пояса. Этот шов еще крепок; Евразийский континент еще не распался снова. В течение палеозоя большая часть восточной Австралии была присоединена к остальной части этого континента в результате ряда горообразующих событий, которые также воздействовали и на Антарктиду. Здесь процесс

представлял собой не столкновение двух крупных континентов, а скорее налипание островных дуг и окраинных осадочных толщ, что весьма напоминает первый из трех этапов образования Аппалачской горной цепи.

ЖИЗНЬ В ПАЛЕОЗОЕ

По мере того как в течение палеозоя процессы тектоники плит строили и перестраивали континенты на земной поверхности, достигнув своей кульминации в сборке Пангеи, продолжалась быстрая эволюция форм жизни — почти несомненно под сильным влиянием изменений взаимного расположения суши и моря. Повторяющиеся вымирания и радиация (распространение во все стороны) трилобитов имеют параллели в ископаемой летописи многих других групп организмов палеозоя.

Позвоночные — то есть животные, обладающие позвоночником, вроде нас — не встречаются среди окаменелостей в Берджесских сланцах или в их подобиях в других частях света. Тем не менее они эволюционировали довольно рано. Их первыми представителями в геологической летописи являются рыбы. Фрагментарные окаменелости, которые считаются частями рыб, найдены в осадках, относящихся приблизительно к концу кембрийского периода, а также из ордовика. Эти первые рыбы были хорошо защищенными существами: многие из их окаменелых остатков представляют собой внешние костные пластины. По-видимому, это были обитатели дна, питавшиеся путем фильтрации воды, а не хищники, подобно современным рыбам; у них не было хватательных-кусательных челюстей. К числу немногих потомков этих бесчелюстных рыб, доживших до наших дней, относится минога.

Хотя окаменелые остатки древнейших рыб найдены в океанических осадках, значительная часть остатков из силурийского периода и далее к нашему времени, начиная с 440 миллионов лет назад, происходит, скорее, из пресноводных, а не морских отложений. Признаемся, что до сих пор идут довольно жаркие споры о том, развились ли позвоночные первоначально в пресной воде или же в океанах. К сожалению, каменная летопись озер и рек еще менее полна, чем органические остатки из морских сред, и пока нет убедительных данных для решения этого вопроса.

К концу силурийского периода, все еще больше 400 миллионов лет назад, как в пресноводных бассейнах, так и в океанах появилась новая группа рыб. У них была чешуя и многочисленные острые спинные плавники. Но у них были и челюсти, и очевидно, что они оказались эффективными хищниками. В течение девонского периода челюстные рыбы процветали и множили число своих форм. Теперь они составляли главные звенья в сложной пищевой цепочке, в которой более мелкие виды пожирались более крупными, а те в свою очередь пожирались своими еще более крупными собратьями. Одна странная девонская рыба, обладавшая тяжелым панцирем из крупных костяных пластин на голове и в передних частях своего тела, достигала размера около 10 метров — поистине устрашающий обитатель морских глубин.

Появление челюстей стало важным шагом в эволюции рыб, да и всех позвоночных. Оно представляет собой также интересный пример часто встречающейся особенности эволюции, а именно, изменение какой-либо ранее существовавшей части тела или структуры для решения новой задачи. Большинство палеонтологов считает, что челюсти рыб развились из хрящевых жаберных подпорок, которые были в головах бесчелюстных рыб. Они

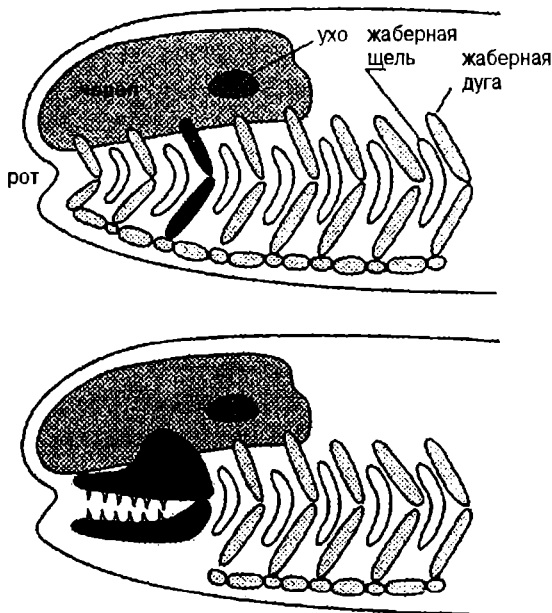


Рис. 8.3. Палеонтологи считают, что челюсти у рыб (черная деталь на нижнем рисунке) и, следовательно, у всех позвоночных развились из жаберных опор, как это видно на иллюстрации. Зубы добавились позже, представляя собой, по-видимому, измененные чешуи. Репродуцировано с рисунков 13-12 из книги: С. М. Стэнли. «Земля и жизнь сквозь время», 2-е изд. Изд-во «В. Х. Фримэн и компания», 1989. Использовано с разрешения.

анатомически оказались на нужном месте и при минимальном изменении могли функционировать как простые челюсти, как видно из рис. 8.3. Самые первые зубы представляли собой, вероятно, видоизмененные чешуи. История эволюции изобилует такими поистине удивительными подробностями; никак нельзя не вернуться к вопросу С. Дж. Гулда: если прокрутить снова ленту с записью событий истории Земли, то повторилась ли бы та же самая история? Развились ли бы челюсти таким же

образом? Появились ли бы рыбы вообще, какими мы их знаем еще в палеозое?

Одна из разновидностей рыб, развившаяся в девоне, стала предком наземных позвоночных. Эта группа включает двоякодышащих рыб, несколько видов которых дожили и до нашего времени. Они обитают в засушливых местностях Австралии, Африки и Южной Америки. Двоякодышащие рыбы способны получать кислород как непосредственно из воды, с помощью жабер, как прочие рыбы, так и заглатывая воздух в примитивные легкие, когда пруды и озера, в которых они живут, пересыхают. Предшественники наземных позвоночных имели такие же способности. По какой-то странной иронии природы развитие сухопутных организмов происходило на основе приспособлений, созданных рыбами, позволявшими им пережить сухой период, чтобы они могли после него продолжать свою жизнь в воде!

Первым шагом в направлении развития позвоночных, живущих полностью на суше, явилась эволюция земноводных (амфибий). Современные примеры — лягушки и жабы — начинают свое существование в воде, но затем выползают на сушу, где они вырастают и проводят большую часть своей жизни. Можно предположить, что жизненный цикл первых амфибий был аналогичным. Впервые они появляются среди окаменелостей девонского периода; детали строения тела некоторых из первых окаменелых амфибий так похожи на соответствующие черты рыб того же периода, что нет никаких сомнений в их близком родстве. По-видимому, эти первые амфибии являются прямыми потомками рыб, включая и двоякодышащих.

Переход от рыб к амфибиям, обитающим преимущественно на суше, занял пятнадцать миллионов лет или даже больше. По мере того как палеонтологи накапливали

все больше данных об этом эволюционном шаге, простое представление о единой линии развития рыб, приспособившихся к мелководной среде и затем выплзших на сушу, уступило место более сложному сценарию. Как в период кембрийского взрыва, во многих других узловых пунктах эволюционного древа жизни существовали, очевидно, многочисленные параллельные ветви, вдоль которых развивались амфибии. Несмотря на сходство строения тела и многих других особенностей у представителей этих разных ветвей, лишь немногие из них дожили до наших дней.

Тем не менее наиболее удачливые амфибии имели перед собой всю тогдашнюю сушу и быстро увеличивали количество своих форм. Конечно, перед ними стояли и определенные проблемы, которые им предстояло преодолеть: их предшественники постоянно купались в воде; суша была для них совершенно чуждой средой обитания. Им пришлось развить навыки, позволяющие избежать высыхания, а также научиться передвигаться способом, отличным от плавания. Более того, их скелетная система должна была стать более прочной, чтобы удерживать полный вес тела в воздухе, гораздо менее плотной среде, чем вода, и поэтому менее способной поддерживать их тела. А еще им пришлось развить легочную систему, которая позволила им проводить большую часть жизни вне воды. Тем не менее амфибии процветали; некоторые из них достигли довольно больших размеров. Среди них были и хищники, и травоядные. Но к концу палеозойской эры они уступили первенство пресмыкающимся (рептилиям), среди которых на сцену вышли в первую очередь динозавры. Ключевым событием в эволюции жизни, которое благоприятствовало расцвету рептилий, было появление яйца, подобного яйцу современных рептилий и птиц, имевшего крепкую внешнюю оболочку и запас

питательных веществ, — яйца, которое не нужно было откладывать в воде. В сущности, яйцо рептилии имело свой собственный переносной водный бассейн, так что развивающийся в нем зародыш купался в благоприятной для него среде во время критических стадий своего развития. Это позволяло родителям вести гораздо менее ограниченный образ жизни.

Первые пресмыкающиеся появились в ископаемой летописи около 330 миллионов лет назад, в каменноугольный период (карбон). Задолго до этого и даже еще до появления амфибий сушу завоевали растения. Подобно своим животным коллегам они быстро распространялись, заполняя новую среду обитания. Следует отметить, что этот период назван каменноугольным по причине широкого распространения относящихся к нему месторождений каменного угля. — измененных остатков огромных масс растительного материала древних тропических лесов.

Древнейшие окаменелые остатки растений относятся к силурийскому периоду. Подобно земноводным и пресмыкающимся, растениям пришлось столкнуться с рядом трудных проблем при колонизации суши, в сущности, подобных тем, с которыми столкнулось и царство животных. Древнейшие растения суши размножались посредством спор, подобно современным папоротникам, и для воспроизводства им требовалась влага. Судя по всему, их распространение вначале ограничивалось прибрежными местностями, примыкавшими к водным бассейнам. Споровые растения достигли расцвета и широкого распространения в палеозое. Например, большая часть месторождений каменного угля в северном полушарии образовалась из остатков огромных споровых деревьев, которые росли на болотах. Характерной особенностью многих из этих месторождений является чередование в них пластов угля с морскими осадками. Очевидно,

низменные угольные болота периодически затоплялись морской водой — еще одно указание на частые колебания уровня моря в палеозое. Имеются признаки наличия в конце палеозоя оледенения в приполярных областях, и многие геологи полагают, что широкое распространение на земной поверхности таких сочетаний (ассоциаций) перемежающихся пластов каменного угля и морских осадков представляет собой результат повторяющихся разрастаний и таяния полярных ледовых шапок с сопровождающими их колебаниями уровня моря.

Подобно животным, растения — по мере их переселения из водной среды на континенты — также столкнулись с необходимостью укрепления своих несущих структур, которые удерживали бы их собственный вес. Это в конце концов привело к развитию толстых стволов и древесины. Величайшее значение имело развитие в растениях системы транспортировки воды и питательных веществ по стволу — так называемой васкулярной, или сосудистой, системы, а также развитие некоего аналога яйца рептилий — событие, которое позволило растениям широко и быстро распространиться по всем континентам. Мы имеем в виду возникновение семени. Семена появились в девоне. Они позволяли растениям размножаться не обязательно в водной среде или в условиях высокой влажности. Очень скоро в результате эволюции возникли крупные семенные растения с толстыми, состоящими из древесины стволами и мощной корневой системой, а именно — деревья, и вид суши изменился. Впервые в истории нашей планеты с тех пор, как растения колонизировали континенты, появилось то, что мы сейчас называем почвой с ее высоким содержанием органического материала, обусловленным гниением растений. Хотя растения и животные конца палеозоя весьма отличались от современных, в конце этой эры

Земля стала гораздо более знакомым для нас местом, чем вначале.

Пожалуй, наиболее знакомой формой жизни, которую мы заметили бы в конце палеозоя, были бы насекомые. В ископаемой летописи они появляются в девонский период, вскоре после того, как появились первые сухопутные растения, но до того, как амфибии начали заселять континенты. Самые первые насекомые были бескрылыми, но к концу палеозоя уже существовали стрекозы, кузнечики и — хотите верьте, хотите нет — тараканы, которые, как и каменноугольные болота, процветали в карбоне. Образ жизни и среда обитания насекомых были весьма разнообразны уже в палеозое, а их эволюция, вероятно, тесно переплетается с развитием наземных растений и животных. В наше время насекомые являются самой многочисленной группой организмов на Земле.

Интересный аспект перемещения жизни на сушу связан с образованием, которое сейчас широко обсуждается в выпусках новостей, а именно — с озоновым слоем. Озон представляет собой вещество, молекула которого состоит из трех атомов кислорода. Большая часть кислорода в атмосфере — это O_2 , но сильная радиация со стороны Солнца в верхней части атмосферы разбивает этот кислород на отдельные атомы. Озон возникает, когда эти атомы соединяются с оставшимися молекулами O_2 , образуя O_3 . Важность озонового слоя верхней части атмосферы Земли определяется тем фактом, что молекула O_3 поглощает коротковолновую (ультрафиолетовую) радиацию Солнца. Без этого почти большая часть живых организмов суши подверглась бы разрушающему воздействию этого мощного ультрафиолетового излучения или вообще бы погибла. Жизнь в океанах гораздо менее чувствительна к нему, поскольку даже сравнительно тонкий

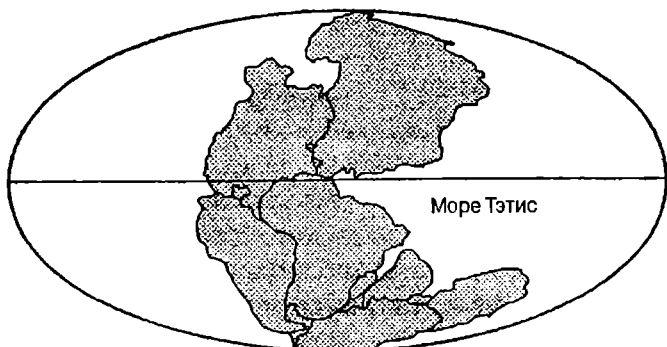
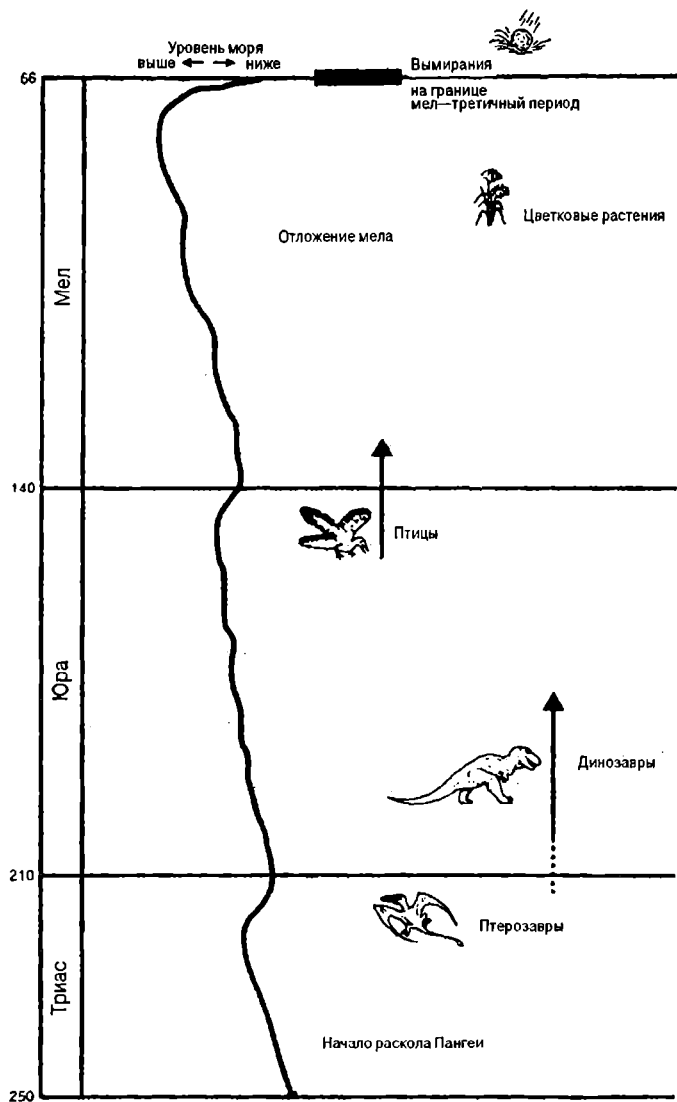


Рис. 8.4. В конце палеозоя все главные континенты соединились, образовав один гигантский массив суши, называющийся Пангея, который простирался от полюса до полюса. Приводится с изменениями по рисунку 20-17(а) из книги: Ф. Пресс и Р. Сивер. «Земля», 4-е изд., изд-во W. H. Freeman and Company, 1986.

слой воды создает надежный щит, защищающий от этого вредоносного излучения.

В главе 4 были описаны данные каменной летописи, указывающие на возрастание содержания кислорода в атмосфере около двух миллиардов лет назад. Тем не менее большинство геологов считает, что даже к началу палеозоя содержание кислорода в атмосфере составляло лишь малую долю его нынешнего содержания. Как выяснилось, максимальное количество озона в верхней части атмосферы образуется при условиях, когда содержание кислорода составляет приблизительно 10 % от нынешнего. При такой концентрации атмосферного кислорода озоновый слой обеспечивает наиболее эффективную защиту от смертельного ультрафиолетового излучения. Насколько нам сейчас известно, такая ситуация была на Земле в силурийский период, когда на суше появились древнейшие растения. Является ли это простым совпадением? Вероятно, нет.

Даже из обзора пикантных подробностей истории палеозоя, рассказанных в этой главе, видно, что данная эра явилась свидетелем революционных изменений в природе Земли. К ее концу жизнь колонизировала континенты, почти все из которых к этому времени оказались объединенными в гигантский массив суши, простиравшийся от полюса до полюса (рис. 8.4). Сборку этого гигантского континента сопровождали крупные эпизоды горообразования, воздвигшие такие горные системы, как Аппалачские горы и Урал. Была подготовлена почва для эволюции млекопитающих, динозавров и птиц в мезозойскую эру. Но палеозойская эра завершилась — приносим наши извинения Т. С. Элиоту — не хныканьем, а кое-чем гораздо более катастрофическим. Граница между палеозоем и мезозоем отмечается самым крупным массовым вымиранием, известным в каменной летописи. По оценкам специалистов, около 80 или 90 процентов (!) всех видов, обитавших в океанах в конце пермского периода, не вошло в мезозойскую эру, а поскольку геологическая летопись для сухопутных растений и животных менее полна, чем для морских, то очевидно, что первые пострадали более жестоко. Хотя есть много гипотез о причинах этого вымирания, по-прежнему нет полной уверенности в отношении значения этой катастрофы для жизни на Земле. Некоторые из предположений, выдвинутых для объяснения этого и других массовых вымираний, следы которых сохранились в каменной летописи, будут рассмотрены в главе 10.



Главные события мезозоя. Время — в миллионах лет назад.

Глава 9

ОТ ПАНГЕИ ДО (ПОЧТИ) СОВРЕМЕННОГО МИРА: МЕЗОЗОЙСКАЯ ЭРА

Когда началась мезозойская эра — около 250 миллионов лет назад, — почти все нынешние континенты были объединены в гигантскую массу суши — Пангею, о чем уже рассказывалось выше. Но к ее окончанию, 66 миллионов лет назад — не так уж давно, выражаясь геологически, — география мира выглядела гораздо более похожей на современную. Оставались еще, конечно, значительные различия: Индия представляла собой большой остров, располагавшийся к югу от экватора, и двигалась на север в сторону своего будущего столкновения с Азией, а Австралия все еще была прикреплена к Антарктическому континенту. Но в целом карта мира, каким он был 66 миллионов лет назад, была не такой уж неузнаваемой.

Мезозойскую эру иногда называют царством рептилий. Хотя в это время процветали многие группы рептилий, наиболее характерными, особенно в юрский период, были динозавры, что может подтвердить всякий, кто читал книгу «Парк юрского периода» или видел фильм с таким же названием. Конец этой эры, как и конец палеозоя, был отмечен крупным массовым вымиранием. Оно не было таким жестоким, как в конце палеозоя, но, поскольку оно захватило и динозавров, оно поразило воображение как ученых, так и неученых. Хотя динозавры достигли больших успехов в науке выживания, их конец был исключительно внезапным, более внезапным, чем большая часть остальных вымираний, отмеченных

в геологической летописи. Как будет рассказано в следующей главе, массовое вымирание конца мезозоя явилось, судя по всему, результатом неожиданной глобальной катастрофы. Если бы не это несчастье, то динозавры вполне могли бы существовать и поныне.

ПАНГЕЯ: КЛИМАТ И РАСКОЛ СВЕРХКОНТИНЕНТА

В каменной летописи сохранилось довольно много данных, указывающих на то, что в самом конце палеозойской эры, в пермский период, уровень моря сильно опустился. Поскольку континенты были спаяны в один материк Пангею, вдоль океанических хребтов образовалось сравнительно мало нового океанского дна. Молодые океанические хребты вздымались почти к поверхности океана, оттесняя океанскую воду на континенты. В противоположность этому более старое океанское дно опускается до более глубоких уровней, вызывая противоположный эффект, и это, возможно, и обусловило низкий уровень моря в течение пермского периода. Имеются также указания на то, что в конце палеозоя и в начале мезозоя климат был крайне сухой, особенно во внутренних частях континента Пангея. Часть этих данных дают нам фауна и флора, сохранившиеся в окаменевших остатках, а часть — типы осадочных пород, которые образовались в это время.

Какие особенности пород указывают на сухой и теплый климат? Важной особенностью является обилие песчаников, в частности, песчаников, представляющих собой окаменелые песчаные дюны. В современном нам мире песчаные дюны характеризуют жаркие и сухие условия пустынь; нет никаких причин считать, что в про-

шлом дело обстояло иначе. Песчаники могут образоваться в нескольких различных природных средах, но обычно легко различить те, которые были когда-то песчаными дюнами, и те, что отложились вдоль песчаных пляжей или в реках. Например, ветер плохо переносит крупные зерна и гальку, поэтому песчаные дюны отличаются мелкими зернами, которые откладываются гораздо более равномерно, чем в случае прибрежных или речных песков. Кроме того, слоистое строение, отражающее реальную последовательность отложения осадков, весьма различно в этих двух случаях. Но хотя дюнные отложения были весьма распространены в перми, они не являются единственным свидетельством сухости климата. Для этого времени характерны толщи эвапоритов, или солевых отложений, образующихся в условиях, когда бассейны морской воды оказываются изолированными от открытого океана и просто высыхают, оставляя после себя лишь отложения солей, которые были в них растворены. Как и песчаные дюны, отложения эвапоритов указывают на теплый и сухой климат.

Среди геологов имеются разногласия относительно значения только что рассмотренных фактов для понимания глобального климата в палеозое. Пангея пересекалась экватором, и многие эвапориты и дюнные отложения возникали в условиях низких широт. Может быть, климат того времени не был столь уж теплым, и их распространенность есть всего лишь результат географического расположения. Более того, огромная континентальная масса Пангеи имела, как полагают, во внутренних частях сухой климат с сильными перепадами температур — жаркое лето и холодная зима, независимо от средних глобальных условий. Поэтому вопреки имеющимся данным, следует быть осторожным в их интерпретации. Не так-то просто реконструировать детали климата Земли

четверть миллиарда лет назад со сколь-нибудь большой точностью.

Но независимо от деталей мы знаем, что континенты движутся медленно и распад Пангеи потребовал значительного времени. Влияние этого очень крупного массива суши на климат продолжалось еще в течение большей части мезозоя. Отложения эвапоритов, широко распространенные в перми, стали еще более обильными в триасовый период. Но триасовые эвапориты не только отмечают жаркий и сухой климат; они документируют начальные стадии раскола Пангеи. По мере того как этот суперконтинент медленно раздвигался вдоль длинной системы рифтов, море периодически вторгалось в развивающиеся рифтовые долины.

То ли благодаря изменению уровня океана, то ли потому, что доступ к морю был отрезан по иным причинам, затапливаемые рифты иногда высыхали, особенно если они располагались в жарких областях, оставляя после себя характерные соляные отложения. В более близкие к нам времена такой же процесс протекал в Красном море, которое представляет собой все еще довольно молодой рифт, разделяющий Египет и Саудовскую Аравию. На ранних стадиях своего развития этот рифт тоже время от времени затапливался океанскими водами, которые впоследствии испарялись. Запись о наступлениях моря осталась в виде серии соляных пластов, которые подстилают более нормального типа осадки на дне Красного моря.

Раскол Пангеи был главным географическим событием мезозойской эры. Хотя распад этого суперматерика происходил очень медленно, он был все же достаточно непрерывный. Все началось с раскола и деления Европы и Африки с востока на запад, который предшествовал постепенному раскрытию Северо-Атлантического

океана между Северной Америкой, Европой и Африкой, что в конце концов привело к отделению Южной Америки от Африки с образованием Южно-Атлантического океана. К концу этого процесса физический мир оказался преобразенным; новое географическое персраспределение континентов имело важные последствия как для климата, так и для хода биологической эволюции. Циркуляция воды в океанах — главный механизм переноса тепла от одного региона земной поверхности к другому — в результате перераспределения континентов радикально изменилась. Вновь образовавшиеся океанские бассейны стали барьерами на путях распространения растительной и животной жизни, в частности, для обитателей суши; воздействовали они и на морские организмы. Поскольку раскол и распад Пангеи оказался столь важным для нашего современного мира, повлияв на все его особенности от распределения животной жизни и до нашего нынешнего климата, стоит несколько более подробно проследить его ход. Моментальные снимки, или отдельные «кадры» географии мира через некоторые интервалы времени, показанные на рис. 9.1, позволяют проследить ход этого процесса.

В конце палеозойской эры часть окружающего сушу океана внедрилась в Пангею в направлении на запад в регионе, который мы сейчас называем Средиземным морем. В конце концов это вторжение распространилось дальше на запад, расколов Пангею и разделив Европу и Африку. Возникший в результате этого водный бассейн, простирающийся в широтном направлении, стал самостоятельным морем, известным среди геологов как океан Тэтис, или пролив Тэтис. Его образование оказало существенное влияние на мировой климат, поскольку позволило протекать через него океанским течениям широтного направления, и по мере того, как процесс рифто-

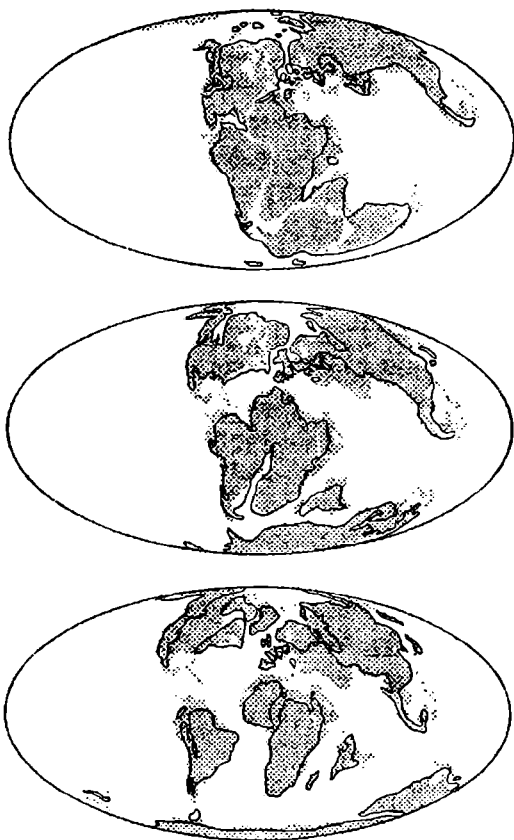


Рис. 9.1. Раскол Пангеи является главной особенностью географии мира в течение мезозоя. Приведенные выше три «моментальных снимка» показывают распределение континентов приблизительно 170, 120 и 70 миллионов лет назад (сверху вниз). Чтобы помочь читателю лучше представить себе этот процесс, серой растушевкой показаны современные континенты, а границы континентов, какими они были в мезозое, обозначены жирной черной линией. Диаграммы приводятся с изменениями из книги: А. Г. Смит, Д. Г. Смит и Б. М. Фаннелл. «Атлас мезозойских и кайнозойских береговых линий». Изд-во «Кембридж Юниверсити Пресс», 1994. Используется с разрешения.

образования продвигался еще дальше на запад, отделяя Южную Америку от Северной и Центральной Америки, водные бассейны, образовавшиеся на западе и на востоке Пангеи, наконец, соединились. Рифтовые бассейны, возникшие при раскрытии океана Тэтис, были расположены в теплых низкоширотных областях, и по мере того, как морская вода периодически затопляла их в ранние стадии их развития, а затем испарялась, формировались отложения солей. Эти триасовые эвапориты встречаются сегодня вдоль северо-западного края Африки и во многих областях Европы.

Эвапоритовые отложения мезозоя оказались полезным средством при прослеживании этапов распада Пангеи. С помощью определения их возраста геологи смогли установить последовательность образования рифтов и тем самым хронологию распада Пангеи. Связь между начальными этапами рифтообразования в Пангее и соляными отложениями была впервые установлена в 1975 году Кевинем Берком, работавшим тогда в Университете штата Нью-Йорк в Олбани. На рис. 9.2 приведена схематическая карта, показывающая размещение эвапоритов, образовавшихся, согласно Берку, в результате рифтинга Пангеи, и пути пропикновения в рифтовые зоны морской воды. Сначала вы должны представить себе склеенными в одно целое четыре континента, соответствующие современным Северной Америке, Европе, Африке и Южной Америке, как показано на рис. 8.4, без Атлантического океана и Средиземного моря. Как уже было разъяснено выше, такова была ситуация в конце палеозойской эры. Затем, после прорыва пролива Тэтис с востока на запад, начался раскол суперматерика. В узких рифтах, предшествовавших полному развитию этого пролива, откладывались эвапориты. Их возраст относят к раннему триасу; они принадлежат к древнейшим из солевых отложений

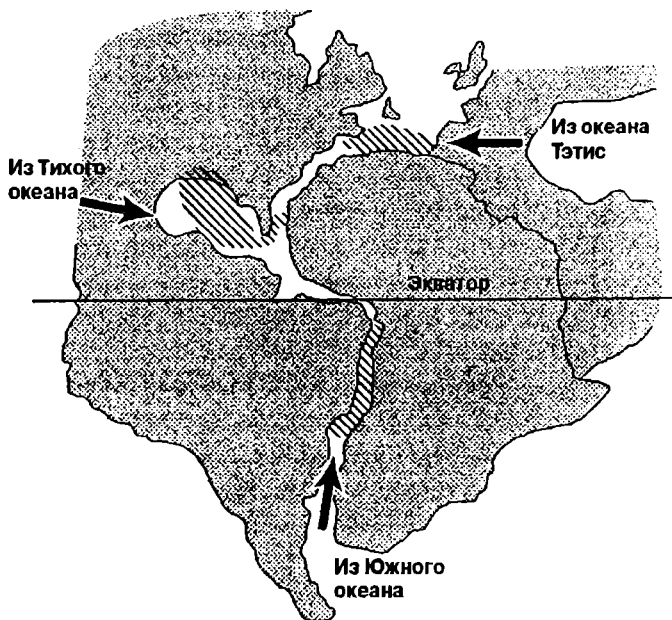


Рис. 9.2. Соляные отложения (участки на рисунке с косой штриховкой) образовались, когда морские воды хлынули в рифты, возникшие при расколе Пангеи. Приводится с изменениями по рисунку 1 из статьи К. Берка в журнале *Джиолоджи*, ноябрь 1975, стр. 614. Геологическое общество Америки.

мезозоя. Североамериканские аналоги этих отложений образовывались вдоль континентального шельфа восточной Канады в период, когда рифты начали отщеплять Северную Америку от Европы и Северной Африки.

С течением времени рифтообразование продолжало перемещаться на запад и на юг, пройдя через район Мексиканского залива и в конце концов отколов Южную Америку от Северной. И только к середине юрского периода образовались крупные месторождения солей

Мексиканского залива. Полагают, что вода, из которой отложились эти эвапориты, поступала в рифт с тихоокеанского края континента. Эти отложения встречаются как на территории самого Мексиканского залива, так и на прилегающей суше, будучи погребенными под морскими осадками Техаса, Луизианы и Мексики. Эвапориты Мексиканского залива особенно хорошо изучены геологами, поскольку в некоторых местах соль, в силу ее низкой плотности, поднялась в виде больших компактных масс сквозь окружающие осадочные породы, деформируя их и образуя структурные ловушки, в которых накапливались большие количества нефти. Эти так называемые соляные купола, погребенные ниже уровня дневной поверхности и обнаруживаемые только с помощью геофизических методов, являются поэтому притягательной мишенью при поисках нефти.

Еще одна группа эвапоритов образовалась из морской воды, затопившей ранние узкие рифты, с которых началось отделение Африки и Южной Америки. Эти отложения моложе, чем европейские или эвапориты Мексиканского залива, и относятся к началу мелового периода. Таким образом, возраст солевых отложений, располагающихся вдоль окраин современных континентов, дает нам очень точную и поучительную хронику постепенного распада на части Пангеи. Конечно, эвапориты не являются единственными памятниками континентального рифтообразования, но они особенно полезны, поскольку представляют собой морские осадки и их возраст обычно может быть определен довольно точно по окаменелостям, встречающимся в более нормальных осадках, с которыми эвапориты переслаиваются.

Не все континентальные рифты создавали условия для образования эвапоритовых отложений. Тем не менее даже очень древние рифты обычно могут быть иденти-

фицированы на основе типичной последовательности пород, которая встречается внутри них и позволяет проследить их эволюцию. По мере того как континентальная кора начинает разделяться и раздвигаться, в рифтах накапливаются осадки, характерные для каждой постепенно опускающейся долины с обрывистыми стенками, то есть мощные толщи материала, смытого со стенок долины, характерные породы типа конгломератов, представляющих собой смеси сравнительно крупных обломков разного размера и разных пород, скрепленных между собой более тонкозернистым цементом. Часто вдоль больших рифтов образуются озера, в конце концов оставляющие после себя участки относительно тонкозернистых осадков. Хорошим современным примером рифта, находящегося на этой стадии развития, является Восточно-Африканская рифтовая долина. Она отмечается длинной цепочкой озер, крупнейшими из которых являются Танганьика и Ньяса. Обычным явлением для рифтов является также вулканическая деятельность, поскольку в таких местах земная кора растянута и утончена, а вещество мантии поднимается кверху и начинает плавиться. Хороший современный пример — Восточно-Африканская рифтовая долина, усеянная вулканами, самый известный из которых Килиманджаро. Таким образом, набор характерных признаков каждого настоящего рифта, его, так сказать, автограф уникален и с высокой вероятностью включает конгломераты, озерные отложения, вулканические породы и, возможно (если рифт достаточно развит, чтобы оказалось возможным пропикновение в него морской воды), эвапоритовые отложения. Иногда рифту так и не удастся расколоть и раздвинуть континентальную кору; тогда образованный им большой шрам постепенно заполняется осадками, почти не оставляя на поверхности каких-либо явных следов своего существования.

Но если он продолжает расширяться, то спорадическое поступление в него морской воды в конце концов становится постоянным и рифт превращается в полноценное море или океан, как случилось с пангейскими рифтами, которые в конце концов стали Атлантическим океаном. Когда это случается, уникальная последовательность осадков, отмечающая ранние стадии развития рифта, сохраняется только в виде узких полосок вдоль противоположных берегов нового океанического бассейна, которые могут быть отделены друг от друга тысячами километров.

ДИКИЙ ЗАПАД

Из обзора событий, сделанного в главе 8, очевидно, что в геологическом смысле восточная часть Северной Америки была в палеозойскую эру очень активна. Аппалачский горный комплекс, образовавшийся во время объединения континентов в будущий суперматерик Пангею, — вот наследие событий, которые произошли в этой области. Но когда Пангея снова распалась, последующая история была уже совсем другой. Конечно, кое-какой вулканизм продолжался вдоль края подвергнувшегося рифтообразованию континента, но по мере расширения рифта континентальный край все дальше и дальше удалялся от границы плиты и тем самым от средоточия большей части геологической активности. Восточный берег Северной Америки превратился в пассивную окраину, а активность переместилась на запад.

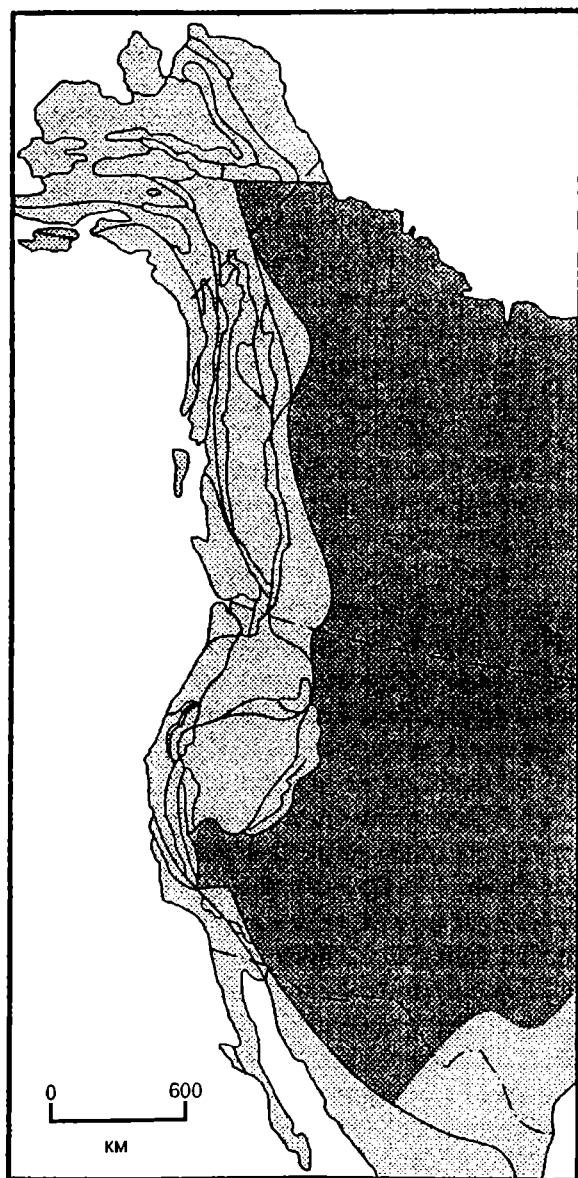
Вдоль западного берега от Мексики до Аляски за весь мезозой к Северо-Американскому континенту добавилась обширная масса осадочного материала. Это произошло не путем склеивания в один массив больших иден-

тифицируемых континентальных масс, подобно тому, как Африка, Америка и Европа объединились, образовав Пангею. Это произошло, скорее, путем постепенного присоединения множества мелких обломков корового материала. Если и существует современный пример такого процесса, то это скорее всего будет западная часть Тихого океана. Если бы все островные дуги и микроконтиненты этого региона от Камчатки и Японии до Андаманских островов сдвинуть на запад и прижать к азиатскому массиву суши, то результат был бы, вероятно, подобен тому, что произошло во время мезозоя с западной частью Северной Америки.

Геологи называли мелкие обломки континентальной коры, которые были собраны или сдвинуты вместе в крупные континентальные блоки, «экзотическими», «подозрительными» или «перемещенными» территориями. Все три названия говорят о необычной природе этих блоков. Впервые они были выделены по такому признаку, как резкие контакты со своим окружением, имеющим обычно и другой возраст, содержащим различные ископаемые остатки организмов и сложенным различными породами, отличными от пород, слагающих соседние части земной коры. Экзотические территории встречаются не только в западной части Северной Америки — они были обнаружены и в области Аппалачских гор, и во многих других регионах. Но Западная часть Северной Америки, где было выделено около 200 (!) таких фрагментов, — это классический пример. Большая часть этих экзотических континентальных обломков была присоединена к континенту в течение мезозоя. Рис. 9.3 показывает только некоторые из самых крупных блоков, которые были здесь выделены.

В силу наличия этого как бы лоскутного одеяла, сшитого из обломков континентов, геология западной части

Северной Америки очень сложна в деталях. Но главные черты ее истории нетрудно себе представить. В течение большей части мезозоя вдоль всего западного края континента располагалась зона субдукции. Дно океана, двигаясь на восток, погружалось под континент в глубины мантии, таща за собой все острова и микроконтиненты, которые там оказались. Но в отличие от океанской коры, эти обломки не имели достаточной плотности, чтобы погрузиться внутрь мантии, и они прибивались и припаивались к континенту, как только достигали западного края Северной Америки. Имеются признаки того, что временами здесь возникало одновременно несколько зон субдукции, ориентированных более или менее параллельно берегу, и каждая со своей связанной с нею цепью вулканических островов, создающих новые порции земной коры, которые в конце концов сталкивались с материком Северной Америки и прикреплялись к нему. Экзотические территории сложены самыми разнообразными породами, включая не только вулканические породы, подобные породам современных островных дуг, но и океанические осадки, щепки самой океанической коры, которые оказались зажатыми между двумя сходящимися плитами и вытолкнутыми к востоку на континент. Мост Золотые Ворота в Сан-Франциско опирается как раз на такую «щепку» или отщеп. Фактически в границах города Сан-Франциско можно наблюдать много интересных геологических фактов, указывающих на события, происходившие вдоль Западного Берега в мезозое. Геолог Клайд Вааргафтиг из Калифорнийского университета в Беркли написал небольшой путеводитель, в котором описываются некоторые из таких мест. Он назвал ее «На трамвае к субдукции». Официальный камень — символ штата Калифорния — серпентин, плотная, мягкая, эсленовато-серая порода, характерная для местностей,



в которых дно океана оказалось надвинутым на континентальную кору в зону субдукции. Эта порода хорошо представлена в местностях вокруг Сан-Франциско, которые описал Вааргафтиг в своем полевом путеводителе. Она образуется в результате взаимодействия воды с породами самой верхней части мантии; ее присутствие в зонах субдукции означает, что куски океанической литосферы, которые во время столкновения двух плит были надвинуты на континенты, имеют иногда достаточную толщину, чтобы сохранить в себе материал как коры, так и мантии.

В дополнение к процессу спайки, с помощью которого экзотические территории прикреплялись к континенту, западная часть Северной Америки получала новое вещество в мезозое в результате вулканической деятельности. Наряду с зоной субдукции, расположенной в море параллельно берегу, здесь существовал и связанный с нею материковый пояс вулканической активности, очень похожий на современные Анды. В течение юрского и мелового периодов этот вулканический пояс простирался от Аляски до Мексики, образовав широкую и величественную горную цепь. Последующие поднятие и эрозия стерли и снесли большую часть этих вулканических пород, оставив только небольшие участки — «карманы» — в качестве свидетелей их возраста и природы. Но корни этих высоких гор, огромные массы гранитной



Рис. 9.3. Западная часть Северной Америки почти целиком состоит из мелких кусков «экзотического» материала коры, которые были «пришиты» к континенту в течение мезозоя. Некоторые из более крупных фрагментов обозначены в левой части карты, закрашенной светло-серым светом. Более темный тон обозначает более древнюю кору (рис. 4.3). Приводится с изменениями по рисунку 16.25 из книги: В. Дж. Скиннер и С. С. Портер. «Динамическая Земля», изд-во «Джон Уайли и Сыновья», 1995. Используется с разрешения.

породы, которые кристаллизовались и отвердели глубоко внутри коры, ниже вершин активных вулканов, теперь выходят на поверхность. Одним из наиболее известных таких остатков являются горы Сьерра-Невада — большое пятно красного и розового цвета на геологической карте Калифорнии. Йосемитский Национальный парк, эта Мекка для туристов и альпинистов, находится в самом сердце Сьерра-Невады. Но хотя породы, слагающие Сьерра-Неваду и столь любимые натуралистом Джоном Мьюиром и поколениями последующих бродяг с рюкзаками, обязаны своим происхождением в конце концов событиям далекого мезозоя, их современный рельеф представляет собой гораздо более современное образование. Уже 40–50 миллионов лет назад, почти в середине кайнозоя, мало что оставалось от великой горной страны; в стремлении к морю большие реки пересекли гребень современной Сьерра-Невады. Среди геологов, изучающих эволюцию западной части Соединенных Штатов, ведутся жаркие споры о том, когда именно началось поднятие, создавшее современный хребет, но большая часть его произошла, по-видимому, чуть раньше последних пяти миллионов лет. Весь огромный блок коры, слагающий Сьерра-Неваду, поднялся и наклонился к западу в ответ на все еще продолжающуюся перегруппировку сил в западной части Северной Америки, связанную с изменениями на границе плиты — от зоны субдукции, проходящей вдоль берега, к трансформному разлому Сан-Андрэас, — которая началась около тридцати миллионов лет назад (см. рис. 5.6). Потрясающие глубокие долины и падающие каскадами водопады Сьерры еще моложе. Они были вырезаны из поднявшегося гранитного блока наступающими и отступающими ледниками в течение последних двух-трех миллионов лет. А через сто миллионов лет после нас увенчанные снегами вулканические вершины

Анд уже отойдут в далекое прошлое и, может быть, только эродированные гранитные ядра огромных вулканов останутся для раздумий будущих поколений разумных существ.

ИСТОРИЯ МЕЗОЗОЙСКИХ РЕПТИЛИЙ

В то время, когда Пангея распадалась на расходящиеся континенты и физический мир стал все более напоминать современный, в биологическом царстве также происходили важные изменения. В морях исчезли трилобиты и многие другие животные, столь характерные для большей части палеозоя. На суше стали преобладать леса семенных растений, таких как цикадовые и гинкго (последние, вероятно, уже не живут в диком состоянии, но во многих странах популярны как парковое дерево), так же как и более знакомые хвойные, а в конце эры получают широкое распространение и цветковые растения. Но главная часть истории жизни в мезозое — это история рептилий. Как никто ранее, они стали господствовать над землей, морем и даже воздухом.

В предыдущей главе уже отмечалось, что рептилии появились в конце палеозоя, развившись из амфибий. Самым важным аспектом их развития было появление яйца, которое можно было отложить вне воды — так называемое амниотическое яйцо, которое получило свое название по мембране (амнион), которая окружает и защищает эмбрион и жидкость, в которой он плавает. Это то самое знакомое нам яйцо, которое мы варим себе на завтрак. Цыплята, как, кстати, и все остальные птицы, являются потомками первых рептилий.

Развитие амниотического яйца, а также чешуйчатой кожи, которая обеспечивала гораздо лучшую защиту от

высыхания, чем кожа амфибий, позволили рептилиям распространиться вдоль и вширь по всем континентам и обитать в обстановке, не подходящей для амфибий. Многие из них были вегетарианцами; великое множество растений, которые к тому времени колонизировали континенты, обеспечивало их готовой пищей. Некоторые из ранних рептилий фактически вернулись в море и приспособились к постоянной жизни в нем, будучи, вероятно, искусными пловцами и хищниками. В силу морского образа жизни многие из этих рептилий оставили хорошие окаменелые остатки, которые часто выставляются в музеях. Некоторые из них были огромны, достигая размеров современных китов. Очень вероятно, что по крайней мере некоторые легенды о морских чудовищах являются продуктами воображения, стимулированного находками костей этих мезозойских созданий.

И все же главная часть истории рептилий разворачивалась на континентах. Но удивительно: хотя с середины мезозоя доминирующими рептилиями стали динозавры, благополучный исход истории обеспечила совсем другая группа, жившая в начале этой эры. Это были так называемые звероящеры, или звероподобные рептилии; именно из них развились настоящие млекопитающие и в конце концов человек. Они появились еще в пермский период; хотя их формы были весьма разнообразны, их количество сильно уменьшилось во время массового вымирания, которым завершилась палеозойская эра. И все же они вскоре оправились и достигли нового расцвета в триасовый период. Они, вероятно, были в основном травоядными животными, хотя некоторые вели хищный образ жизни и, вероятно, поедали амфибий, других рептилий и их яйца. Хотя некоторые из звероподобных рептилий были крупными животными — некоторые из них достигали размеров современного гиппопотама или даже больших, — их окаме-

целые остатки показывают, что это были довольно неуклюжие существа. В самом деле, их медлительность, по сравнению с динозаврами, оказалась, возможно, одной из причин их вымирания. Окаменелые скелеты показывают, что конечности звероподобных рептилий располагались по бокам их тел, что, видимо, делало их способ передвижения неуклюжим в сравнении с динозаврами, у которых ноги располагались прямо под туловищем.

Звероподобные рептилии откладывали яйца, но у них были некоторые особенности, не очень соответствующие нашему обычному представлению о пресмыкающихся. Некоторые из них, вероятно, были покрыты волосами и имели усы на морде, как кошки, — черты, свойственные млекопитающим, и представляется вероятным, что некоторые из них были теплокровными или, по крайней мере, имели какой-то механизм регулирования температуры тела. Однако эти животные почти полностью вымерли к концу юрского периода, хотя они все же оставили нам своих наследников, настоящих млекопитающих, которые хотя и выжили, но до конца мезозойской эры оставались мелкими и незаметными существами. К началу юрского периода другая ветвь семейства рептилий, включающая и динозавров, стала господствующей. Но хотя звероподобные рептилии далеко не так известны, как динозавры, стоит все же помнить, что к концу триасового периода они являлись самыми важными животными суши в течение почти такого же времени, как и динозавры позднее. Не будучи особенно красивыми существами, они все же являются нашими древними предками. Чтобы хорошо представлять свою генеалогию, рассмотрите внимательно своего триасового предка, изображенного на рис. 9.4.

Впервые кости динозавров были найдены в начале девятнадцатого столетия. Их название происходит от греческих слов, означающих «ужасный» (дино) и «ящер»

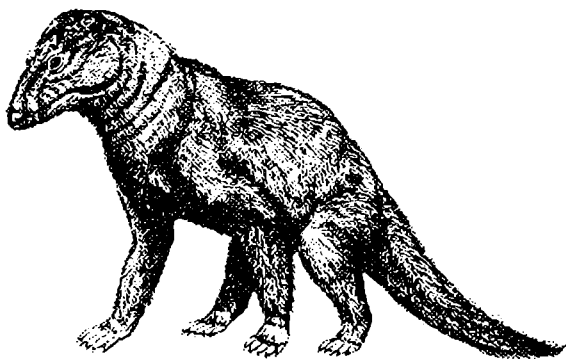


Рис. 9.4. Хищная, похожая на млекопитающее рептилия размером с волка, жившая в начале мезозойской эры. Рисунок приводится с любезного разрешения Отдела геологических наук Университета Саскачеван, Саскатун, Канада.

(завр). Очевидно, из воображаемый облик во плоти, хотя и основанный на этих первых ископаемых остатках, показался ужасным тем ученым, которые описали их. Но, как мы далее увидим, не все динозавры были большими, а многие из них были, вероятно, не страшнее многих обычных современных животных.

Древнейшие окаменелые остатки динозавров относятся к самому началу триасового периода и имеют возраст около 240 миллионов лет. Палеонтологи выделили по строению тела, в частности по способу прикрепления бедер к тазу, две главные ветви семейства динозавров. Так называемые ящеротазовые динозавры включали как гигантских хищников, подобных знаменитому тиранозавру, так и многих менее свирепых растительноядных рептилий. Вторая ветвь, так называемые птицетазовые динозавры, включала травоядных, в том числе многие знакомые формы, как, например, стегозавр и трицератопс.

В последние годы многие общепринятые представления о динозаврах были отброшены в сторону или, по крайней

мере, подверглись серьезному испытанию рядом новых фактов. Старое представление о том, что динозавры были медлительными и неуклюжими, тупыми и одинокими существами, вынужденными обитать, барахтаясь в болотах, поскольку ноги не могли якобы удерживать их массивные тела, было пересмотрено в результате современных исследований. На самом деле многие динозавры были очень подвижны и ловки. Очевидно, они легко распространились на суше, несмотря на свои размеры, а некоторые были даже общественными животными — передвигались стадами, строили гнезда и ухаживали за своим молодняком. Возможно, они были также теплокровными животными.

При своем первом появлении в триасе динозавры были очень мелкими животными, не крупнее кошки или небольшой собаки. Многие из них были двуногими, то есть были способны быстро перемещаться на двух задних ногах. В противоположность нашим предкам, звероподобным рептилиям, даже у самых первых динозавров ноги располагались прямо под корпусом, а не сбоку от него. Окаменевшие отпечатки следов динозавров часто располагаются в виде двух параллельных цепочек, подтверждая вывод, что они были способны к быстрому и ловкому передвижению.

Многие из мелких и подвижных первых динозавров были мясоедами, то есть охотились на других рептилий или амфибий, а может быть, и на некоторых из своих близких родственников среди травоядных птицетазовых динозавров. Многие из последних развили внушительные средства защиты от хищников — посмотрите только на щиты и устрашающего вида шипы у стегозавра или острые рога трицератопса (рис. 9.5). Даже в мезозое не существовало еще такой вещи, как бесплатные завтраки, — мясоедам приходилось здорово поработать ради пропитания.

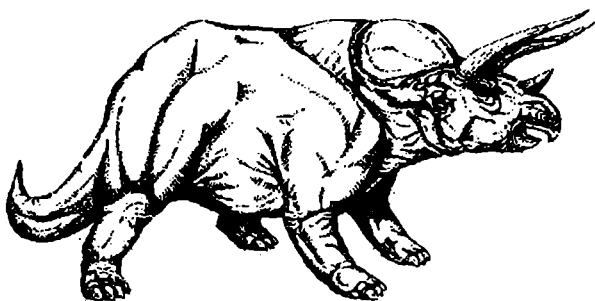
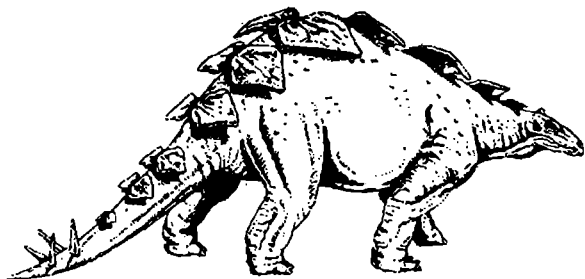


Рис. 9.5. Стегозавр (вверху) и трицератопс (внизу) — свирепые на вид представители травоядных динозавров, более знакомые читателям. Предполагается, что их рога, щиты и шипы защищали их от их хищных родственников. Пластины на спине стегозавра часто изображаются на реконструкциях стоящими вертикально, а не горизонтально, как они изображены здесь. Рисунки помещены благодаря любезности Отдела геологических наук Университета штата Саскачеван, Саскатун, Канада.

Одной из проблем, возникающих при реконструкции истории динозавров, является неоднородность и прерывистость каменной летописи. В отличие от морской среды обитания, где умершие организмы оказываются очень быстро погребенными и таким образом сохраняются, суша является гораздо менее гостеприимным местом для умирающих животных. Хищники и падальщики, вероятней всего, быстро очистят кости, а потом разбросают

скелет. Даже кости в конце концов разлагаются, если их надолго оставить на дневной поверхности во власти стихий, навсегда уничтожая свидетельства о прежней жизни их бывших владельцев. Ручьи и реки тоже нередко уносят остатки далеко от их первоначального местоположения, затрудняя тем самым реконструкцию среды, в которой эти существа обитали.

Несмотря на эти проблемы, палеонтологи все же узнали очень многое. Были открыты яйца и даже «гнезда» динозавров со скорлупой яиц и скелетами детенышей. Отпечатки следов динозавров дали важные свидетельства о способе их передвижения. Они также показали, что динозавры передвигались группами. В западной части Соединенных Штатов были найдены хорошо утопанные окаменевшие тропы, которые свидетельствуют о том, что по крайней мере некоторые динозавры были мигрирующими животными, которые в определенные сезоны передвигались большими стадами, как это делали буйволы еще несколько сот лет назад, или олени карибу в современной Арктике.

Одно из величайших из когда-либо найденных скоплений окаменевших остатков динозавров сохранилось в осадках большого низменного региона западной части Соединенных Штатов, в основном на территории современных штатов Юта, Вайоминг и Колорадо. Это континентальные осадки, отложившиеся в пресноводных озерах и реках, а не в море. За их отложением последовали складкообразование, поднятие и вулканизм, тесно связанные с субдукцией и припаиванием экзотических территорий к западному краю континента, которое уже рассмотрено выше в этой главе. В течение некоторого промежутка времени в юрский период большие массы грязи и песка, эродированные с этой поднятой страны на запад, были перенесены в низменные области, где обитали динозавры,

поставляя сырье для образования глинистых сланцев и песчаников. Сохранились многочисленные и разнообразные окаменелости; по ним палеонтологи много узнали об образе жизни этих огромных животных. Открывшаяся перед ними картина представляет собой юрский эквивалент восточно-африканского вельда: обширная область, кишущая разнообразной жизнью, со множеством пасущихся травоядных динозавров — аналогов современных жирафов, зебр и антилоп — и небольшая популяция хищников вроде тиранозавра, юрского «царя зверей».

На протяжении своего долгого царствования на Земле — почти 180 миллионов лет — динозавры разнообразились и эволюционировали. Динозавры конца мелового периода и не узнали бы своих триасовых предков. Но как это ни покажется удивительным, почти все их главные группы сохранялись вплоть до конца мела, подтверждая предположение, что их вымирание было вызвано каким-то катастрофическим кратковременным событием, а не постепенным эволюционным изменением.

Пожалуй, самой бросающейся в глаза тенденцией в ископаемой летописи динозавров является изменение размеров тела. Как уже говорилось, самые ранние их представители были в общем мелкими животными. Большинство знакомых нам огромных тварей из музеев и «Парка юрского периода» жили в конце юрского и в меловой период. Почему началась их эволюция в сторону увеличения размеров, неизвестно, хотя выдвигалось много предположений, начиная с того, что крупные тела и длинные шеи были необходимы, чтобы легче было добираться до пищи на высоких деревьях, и до мысли, что большой размер служил лучшей защитой от хищников (или наоборот, позволял доминировать над другими). Самые большие динозавры были поистине великанами, вес которых оценивается от 80 до 100 тонн!

Большие размеры, достигнутые многими из этих животных, имеет прямое отношение к спору, были ли они теплокровными, поскольку одним из следствий большого размера тела является термальная устойчивость. Животные теряют тепло через поверхность своего тела; хорошо известное соотношение между площадью их поверхности и объемом (который тесно связан с весом) объясняет тот факт, что, например, современная ящерица игуана приходит к термическому равновесию со своей средой гораздо быстрее, чем какой-нибудь восьми-десятитонный бронтозавр после внезапного изменения температуры. По той же причине крупному животному труднее избавиться от тепла, порождаемого обменом веществ, чем мелкому. Как следствие этих рассуждений было высказано предположение, что некоторые особенности анатомии динозавров, как, например, необычные треугольные пластины на спине стегозавра, столь хорошо видные на рис. 9.5, использовались в качестве охлаждающего устройства. Это предположение не кажется столь уж притянутым за уши, поскольку детальный анализ окаменелых остатков показал, что эти костные наросты были густо пронизаны кровеносными сосудами. И все же стегозавры отнюдь не были столь огромными, как многие другие динозавры, и ничего похожего на эти странные спинные плавники не появилось в других группах динозавров, так что их истинное назначение все еще неясно.

Тем не менее имеется существенное косвенное свидетельство того, что по крайней мере некоторые динозавры могли регулировать температуру своего тела. Одним из сильнейших указаний на это является расстояние между сердцем и мозгом. Очевидно, что у многих динозавров это расстояние было велико, достигая нескольких метров, и притом голова располагалась много выше

туловища. Поэтому кровяное давление, необходимое для доставки свежего кислорода к клеткам мозга — без чего они бы погибли, — должно было быть довольно высоким. Хотя мягкие части тела, содержащие кровеносную систему динозавров, не сохранились в окаменелостях, это косвенное свидетельство показывает, что они могли эффективно перекачивать кровь при низком давлении от сердца к легким, чтобы напитать ее кислородом, и при высоком давлении — от сердца к мозгу, чтобы доставить его к клеткам мозга. Короче говоря, у них должна была быть кровеносная система, похожая на систему теплокровных животных с высокой скоростью метаболизма. Тем не менее мы никогда не сможем быть уверенными в этом, поскольку — приносим наши извинения Майклу Кричтону — вряд ли кому-нибудь удастся измерить у динозавра температуру.

Но как ни удивителен был мир динозавров, их история не является единственно важной в течение мезозоя. Мы уже бегло касались звероящеров, появившихся еще до начала мезозоя. Но нашего внимания заслуживают еще три группы организмов, хотя в книге такого объема, как наша, невозможно уделить им (и многим другим, даже не упомянутым группам) то внимание, которого они заслуживают. Мы имеем в виду птиц, насекомых и цветковые растения.

ПТИЦЫ И ПЧЕЛЫ

Мы относимся к птицам, как к чему-то вполне естественному. Тем не менее никто из тех, кто наблюдал, как пеликан скользит по набегавшей океанской волне или как сокол на большой скорости срывается вниз за добычей, не может не восхищаться их полетом. Но этого не

было вплоть до конца юрского периода, между 140 и 150 миллионами лет назад, когда первые птицы устремились в небо. Насекомые к этому времени уже давно открыли преимущества полета; еще до появления птиц существовали летающие рептилии, но все остальные существа были либо привязаны к земле, либо жили в воде.

Первыми летающими позвоночными были рептилии, у которых один из пальцев на передних конечностях очень удлинился, играя роль опоры для кожной перепонки, служившей в качестве крыла. Это были птерозавры, что буквально означает «крылатые ящеры». Древнейшие из птерозавров появились в конце триасового периода, приблизительно за 70 миллионов лет до настоящих птиц и, по-видимому, господствовали в воздухе, пока их в конце концов не сменили птицы. Подобно динозаврам, некоторые птерозавры достигали гигантских размеров: у самого большого из открытых птерозавров размах крыльев достигал 50 футов (около 15 метров) или даже больше — больше, чем у многих самолетов! У этих летающих ящеров были большие, усеянные зубами челюсти, но тела их были небольшими и, вероятно, без мощных мускулов, необходимых для длительной работы крыльев. Они были опытными планеристами, а не мастерами полета, использующими для перемещения в воздухе силу ветра.

Птицы эволюционировали совершенно отдельно от птерозавров и достигли гораздо больших успехов в достижении господства в воздухе. Они могут служить примером общего мотива эволюции — более или менее параллельного развития различных типов структуры тела и различных функций для достижения одной цели — в данном случае для полета. Хотя ископаемая летопись, как и всегда, недостаточно полна для того, чтобы определить всю линию развития птиц — так, как этого хотелось бы,

она все же лучше представлена промежуточными звеньями, чем для многих других групп. Это произошло в результате необычайно хорошей сохранности в одном из известняковых карьеров южной Германии *археоптерикса* — ископаемого организма, который многие называли недостающим звеном между динозаврами и птицами. И действительно, если бы не превосходная сохранность этих остатков, их вполне можно было бы отнести к динозаврам. У них был череп и зубы рептилии, как и длинный, состоящий из позвонков хвост, но в тонкозернистом известняке, в котором были найдены эти останки, имеются тонкие отпечатки перьев и деталей строения скелета, которые ясно показывают, что *археоптерикс* был птицей. Все современные птицы, от огромных кондоров, парящих над Андами, до крошечного крапивника в вашем саду, ведут свое происхождение от мезозойских динозавров.

Находка *археоптерикса* была большой удачей для палеонтологов, поскольку остатки птиц встречаются нечасто. И тем не менее их набралось достаточно, чтобы установить, что птицы приняли первенство как мастера полета от птерозавров в течение мелового периода. Именно в это время они обрели крепкий, с полыми костями скелет, характеризующий современных птиц, позволив им стать гораздо более эффективными мастерами полета, чем были и птерозавры, и их собственные предки.

Менее бросающимися в глаза, но все же важными обитателями воздушной среде в мезозое были насекомые, которые вышли на сцену еще раньше — в палеозое. Однако насекомым пришлось плохо во время массового вымирания в конце пермского периода; к началу мезозоя их численность сильно сократилась. Впрочем, они быстро оправились; количество их видов и групп сильно увеличилось на протяжении мезозоя.

Насекомые находятся в сильной и взаимной зависимости от растений. Некоторые из них являются санитарами, питающимися остатками погибших растений, другие — вредители, истинное бедствие для некоторых типов растений. Некоторые насекомые являются симбионтами, выполняя важные функции для тех самых растений, которые служат им пищей. Мы часто ассоциируем насекомых с цветами или фруктами — черви внутри яблок, пчелы в цветах, — но в течение большей части мезозоя цветковых растений еще не было. И действительно, состоящий только из папоротников, цикадовых, гингко и хвойных ландшафт большей части мезозоя был приятно зеленым, но тем не менее однообразным. Несмотря на это, тщательное изучение ископаемых остатков показывает, что великое разнообразие способов и привычек питания у современных насекомых уже существовало еще до появления цветковых растений. Это было поразительное открытие, ибо долгое время считалось, что появление цветковых растений явилось важным стимулом в эволюции насекомых. Однако несмотря на тот факт, что между отдельными цветковыми растениями и насекомыми развились многочисленные и тесные взаимоотношения, кажется вероятным, что в целом от развития цветов больше выиграли растения, чем насекомые. Цветы привлекали насекомых, а те в свою очередь дали растениям то преимущество, что, перенося пыльцу с одного растения на другое, неминуемо оплодотворяли их.

Цветковые растения — так называемые покрытосеменные, или ангиоспермы, появились только 100 миллионов лет назад, в меловой период. Тем не менее они быстро стали господствующим типом растительной жизни на суше и остаются таковыми и по сей день. Они населяют различного типа местности от сухих пустынь до тропических дождевых лесов и встречаются от экватора и до

высоких арктических широт. Не все из них имеют цветы, которые вы можете найти в специализированном цветочном магазине, но все они имеют одну ключевую особенность, обеспечивающую процесс воспроизводства растений, а именно семя с защитной оболочкой, окруженное готовым запасом питательных веществ. Цветковые растения развили невероятное богатство окрасок, запахов и видов плодов и все это — в сложных и взаимных отношениях с животным миром. Не только насекомые принимают участие в опылении цветковых растений: птицы и млекопитающие тоже распространяют и рассеивают семена, часто на большие расстояния. Без обилия и разнообразия цветковых растений мир был бы гораздо беднее, чем теперь.

МЕЗОЗОЙСКИЕ ОКЕАНЫ

Мы завершаем это краткое путешествие по мезозойской Земле небольшим комментарием о жизни в океанах. Здесь, как и на суше, тоже произошли драматические изменения. Пожалуй, одно из самых важных случилось в конце эры среди мелких организмов, населяющих самый верхний, освещенный солнцем слой океанов — планктона. Термин «планктон» имеет широкое значение, обозначая всех мелких животных и растения, которые либо пассивно плывут, либо медленно перемещаются по морям. В меловой период произошел настоящий взрыв массы планктона, который откладывал скелетики или раковинки двух типов — сложенные кремнеземом и карбонатом кальция. Карбонат кальция, как мы уже отмечали, является главной составной частью известняка, а кремнезем имеет формулу SiO_2 , то есть это то же, что и кварц, и является главной составной частью породы, называемой

«черт» или кремнистый сланец. Этот взрыв массы планктона радикально изменил типы осадков, которые накапливались на морском дне, потому что в то время, как органические части планктона после смерти организмов разлагаются, их минерализованные скелеты часто сохраняются и опускаются на дно. Впервые за долгую историю Земли очень большие массы кремнеземных скелетов, которые впоследствии, затвердев, превратились в кремнистый сланец, начали накапливаться в отдельных областях глубоких морей. Мощные отложения ила, состоящие из крошечных остатков раковин из выделявшегося планктоном карбоната кальция, накапливались как никогда раньше. Знаменитые меловые утесы Дувра, в юго-восточной части Англии, являются одним из примеров огромного количества такого материала, накопившегося в течение мелового периода. На Земле их известно гораздо больше. Даже само название этого периода происходит от слова «мел», а европейские названия его — от латинского слова «крета», означающего тоже «мел». По какой причине кальциевый планктон так бурно развивался во второй половине мелового периода, все еще не совсем понятно. Такие мощные толщи меловых осадков никогда впоследствии за аналогичные по длительности периоды времени не отлагались.

Высокая биологическая продуктивность океанов мелового периода создавала идеальные условия и для накопления нефти. Она образуется в условиях, когда органический материал, захваченный осадками, медленно покрывается другими осадками и подвергается воздействию увеличивающихся температур и давлений, которые превращают исходный органический материал в нефть. Те осадки, которые откладывались вдоль окраин пролива Тэтис — тропического субширотного океана, возникшего в мезозое в результате раскола Пангеи — и сохранились

в мезозое, были богаты органическим материалом. Многие из современных важных нефтяных полей залегают в этих осадках — в России, на Среднем Востоке, в Мексиканском заливе и вокруг него, а также в Техасе и Луизиане.

Как уже указывалось, мезозойский период закончился какой-то глобальной катастрофой, которая стерла с лица Земли большое количество видов животных и растений, включая и всех динозавров. Как именно произошло это внезапное массовое вымирание, неизвестно, но имеются веские данные в пользу предположения, что хотя бы частичной его причиной было падение на Землю какого-то крупного объекта из космоса, о чем будет говориться в следующей главе. Как это ни удивительно, но, к счастью для нас, млекопитающие, очевидно, мало пострадали от этого всемирного кризиса. Мы, потомки этих выживших тогда млекопитающих, в конце концов, может быть, и соберем достаточно данных, сохранившихся в горных породах, чтобы ответить на вопрос — почему.

Глава 10

МИРОВЫЕ КАТАСТРОФЫ

Все границы между эрами, периодами и даже более тонкими подразделениями шкалы геологического времени определяются на основании резких изменений в каменной геологической летописи. Как мы уже видели в предыдущих главах, как палеозойская, так и мезозойская эры закончились крупными массовыми вымираниями, в которых большое количество существовавших видов было стерто с лица Земли. Трудно не прийти к заключению, что это были времена чрезвычайных условий для всей жизни на Земле. Хотя эти факты давно были известны геологам и много было написано о возможных причинах таких событий, вся тема массовых вымираний в целом получила неожиданный поворот в 1980 году. Именно тогда Луис Альварес, физик и нобелевский лауреат из Калифорнийского университета в Беркли, в совместной работе с рядом коллег-геологов, среди которых был и его сын, открыл доказательства в пользу внеземной причины массового вымирания, происшедшего в конце мелового периода.

УДАР ПО ЗЕМЛЕ НА ГРАНИЦЕ МЕЛОВОГО И ТРЕТИЧНОГО ПЕРИОДОВ

Дымящееся ружье, которое они обнаружили, могло сначала показаться несколько неясным. Альварес и его сотрудники обнаружили в океанских осадках, отложив-

шихся точно на границе мезозойской и кайнозойской эр, аномально высокое содержание редкого элемента иридия. Хотя фактическое количество обнаруженного ими иридия было невелико, оно оказалось в 100 раз больше, чем было обнаружено непосредственно выше и ниже этой границы.

Но какое это имеет отношение к внеземной причине вымираний? Оказалось, что самое непосредственное. Подобно своим более известным родственникам золоту и платине, иридий относится к «благородным» металлам и не очень охотно реагирует с другими веществами. Он, кроме того, очень редко встречается в земной коре. Его редкость связана с тем фактом, что он легко образует сплавы с железом, так что когда формировалось земное ядро, большая часть иридия, существовавшего на нашей планете, была захвачена погружающимся расплавленным железом, и сейчас главная его масса находится в ядре. Но вспомним, что большая часть метеоритов, падающих на Землю, относится к типу хондритов, о которых говорилось в главе 2, — кусков мелких астероидов, которые никогда не подвергались всепланетному процессу перестройки с образованием ядра. В силу этой особенности своей истории хондриты сохранили свое изначальное содержание иридия. Концентрация этого элемента в них приблизительно в 10 000 раз больше, чем в большинстве частей земной коры. Столь огромное содержание иридия в хондритах делает этот металл очень чувствительным индикатором поступления на поверхность Земли внеземного материала. Во время столкновения с Землей крупные метеориты полностью испаряются, в результате чего содержащийся в них иридий рассеивается во все стороны. За очень короткое по геологическим масштабам время он вымывается из атмосферы и оседает на морском дне, оставляя узкую полосу осадков с высоким содер-

жанием иридия, которые медленно накапливаются на дне океанов. В силу относительной химической инертности иридия эта запись в геологической летописи сохраняется без особых искажений даже на протяжении геологических эр.

Массовое вымирание в конце мезозоя отмечает границу между меловым и третичным периодами, часто сокращенно называемую «К–Т»-границей (буква «К» давно используется в качестве символа отложений мелового периода на геологических картах и схемах. Она происходит от немецкого названия мелового периода — Kreidezeit — и служит для различия этого периода и других, название которых также начинается с латинской буквы С, как, например, кембрий — Cambrian). Именно в относящихся к этой границе отложениях из нескольких различных, далеко удаленных друг от друга местностей Альварес и его коллеги обнаружили высокое содержание иридия. Основываясь на своих первоначальных измерениях, они вычислили, что такое обогащение иридием мог вызвать только астероид (или, может быть, комета) диаметром около 10 километров, и высказали предположение, что последствия столкновения Земли с таким космическим телом и могли вызвать массовое вымирание на границе мела и третичного периода. Это открытие поразило научный мир — а также популярную прессу — словно взрыв бомбы. Во-первых, что могло быть более захватывающим и «научно-фантастическим» явлением, чем массовая гибель динозавров в результате столкновения Земли с астероидом? Во-вторых, хотя десятикилометровый астероид и не кажется особенно большим в сравнении с Землей, последствия такого удара являются просто умопомрачительными.

Теоретики весьма подробно рассчитали последствия падения астероида на Землю. К счастью, до сих пор за историческое время не было отмечено падения на землю

объектов, даже отдаленно приближающихся к 10 километрам в диаметре. Эти вычисления основываются на экспериментах с телами гораздо меньшего размера, а также на наблюдениях над разрывами бомб. Хотя без них человечество было бы гораздо богаче, все же иногда оружие массового поражения приносит науке кое-какую пользу.

Что касается причин вымирания, то Альварес с коллегами указали только на одно последствие падения крупного объекта — окружающее всю землю облако пыли, выброшенное в результате столкновения. Они отметили, что эта пыль закрыла бы поверхность Земли от света Солнца и на несколько лет прекратила бы фотосинтез, что привело бы к гибели растений и большей части пищевой цепочки, то есть всего, чье питание зависит от него. Оно вызвало бы также резкое охлаждение затененной поверхности нашей планеты. Но кроме того, последовали бы и другие, не менее серьезные явления. Например, сейсмические волны, возбужденные сначала самим астероидом, а затем падением скалистых выбросов, вызванных ударом, пройдя через атмосферу, вызвали бы быстрое нагревание последней и сильнейшие атмосферные бури. Азот и кислород — два самых главных по объему компонента нашей атмосферы, — соединившись в результате реакции, обусловленной высокой температурой, образовали бы окислы азота, которые, в свою очередь, растворившись в атмосферной воде, привели бы к выпадению азотнокислого дождя, более едкого и повсеместного, чем все, что вызвано человеческой деятельностью. Нагревшаяся в результате удара атмосфера обусловила бы сильнейшее высыхание растительности в мировом масштабе, сделав ее весьма восприимчивой к огню или даже создав источники воспламенения. Эдуард Андерс и его коллеги из Университета Чикаго обнаружили большое количество частиц сажи в осадках, относящихся

к границе К—Т, которые они интерпретируют как результат почти повсеместных, может быть и глобальных, пожаров, непосредственно связанных со столкновением. В осадках сохранились и свидетельства о грандиозных цунами — огромных океанских волнах, которые в принципе могли достигать нескольких километров в высоту, если удар пришелся на океан. Фактически возможные последствия удара астероида на границе мел—третичный период являются до такой степени разрушительными, что некоторые геологи вслух удивляются тому факту, что так много видов животных и растений смогло пережить эту катастрофу. И неудивительно — по оценкам специалистов, энергия, освобожденная при столкновении, была приблизительно в 10 000 раз больше энергии всего мирового арсенала оружия.

Честно говоря, следовало бы отметить, что есть ученые, не принимающие гипотезу о столкновении Земли с астероидом. Но эта оппозиция все больше отступает по мере накопления новых фактов за годы, прошедшие со времени открытия Альвареса. Оказалось даже возможным определить с некоторой уверенностью тот кратер, который образовался в результате столкновения. Это оказался кратер Чикхулуб на полуострове Юкатан в Мексике. Этот кратер в настоящее время нелегко узнать с поверхности, поскольку за 66 миллионов лет, прошедших с конца мелового периода, он был заполнен осадками. Тем не менее геофизические исследования очень четко показывают существование большого погребенного кратера круглой формы, а бурение в этом районе обнаружило когда-то расплавленные и частично расплавленные породы, типичные для ударных кратеров. Определение абсолютного возраста проб из этого материала показало, что столкновение приходится точно на одно из самых крупных вымираний на границе между мелом и третичным периодом. Это

совпадение во времени оказалось слишком точным, чтобы его можно было признать случайным.

Поскольку кратер Чикхулуб не выходит на поверхность, точные его размеры остаются пока неизвестными, но недавние исследования гравитационного поля в кратере и его окрестностях показывают, что размеры его достигали 300 километров в диаметре. Конечно, обломки его центральной части были выброшены на окружающие территории. Крошечные зерна мелко раздробленных минералов, обладающие явными особенностями пород, окружающих район кратера Чикхулуб, были найдены в слоистых осадках, соответствующих К–Т-границе, в местах, удаленных от кратера на тысячи километров.

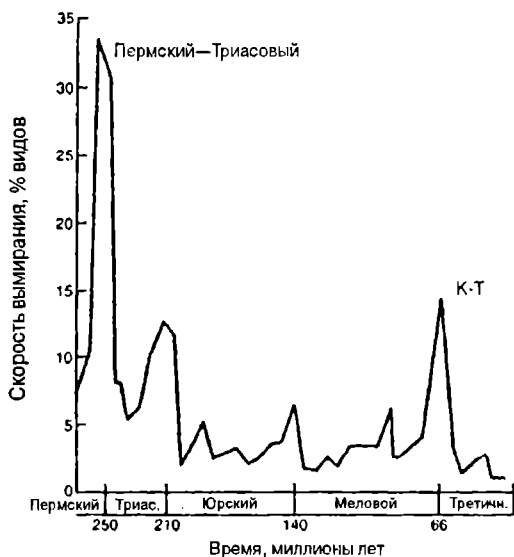
Таким образом, есть много фактов, подтверждающих гипотезу столкновения. Но, по-видимому, самым сильным доводом в ее пользу остается избыток иридия, обнаруживаемый глобально во всех достаточно полных разрезах, проходящих через указанную границу. Эту особенность геологического разреза очень трудно объяснить, не прибегая к гипотезе о внезапном и мощном поступлении на Землю внеземного вещества. Независимо от того, является ли столкновение с космическим телом причиной некоторых или всех зафиксированных вымираний на границе К–Т, кажется неизбежным вывод, что в самом конце мелового периода, или около 66 миллионов лет назад, Земля столкнулась с каким-то большим космическим телом.

ДРУГИЕ ФАКТОРЫ ВЫМИРАНИЯ

Хотя гипотеза о столкновении привлекла много внимания к вымиранию на границе мела и третичного периода, по количеству вымерших видов это событие кажется не таким значительным на фоне вымираний, произошедших

в конце палеозоя. Палеонтологи давно признали их огромный масштаб, но волнение, вызванное спорами вокруг границы К–Т, привело к возобновлению интереса к явлениям массового вымирания вообще и к вымираниям, случившимся на границе перми и триаса в частности. Как это ни кажется невероятным, но около 90 процентов видов, живших в конце пермского периода, исчезли уже в начале триаса. В то время жизнь на Земле не отличалась таким разнообразием, как в конце мезозоя, и ископаемые остатки организмов менее полны, но последние работы показали, что обитатели суши не были так уж безразличны к опустошению. В частности, насекомые — группа, которая не так сильно пострадала на границе между мелом и третичным периодом, как другие, — обнаруживает резкое уменьшение разнообразия на границе перми и триаса. И тем не менее, несмотря на тщательные поиски, не было обнаружено признаков падения астероида в то время. Следовательно, причиной этого вымирания должны были быть другие процессы. Кажется, что жизнь на Земле является в некоторых отношениях весьма хрупким образованием и может быть уничтожена несколькими способами.

Полезно вспомнить, что крупные массовые вымирания, подобные случившимся на границах мела и третичного периода или перми и триаса, происходят на фоне текущих вымираний, являющихся нормальной особенностью эволюции. Что отличает события массового вымирания, так это драматическое возрастание *скорости*, с которой происходит вымирание, и их глобальный характер. Границы между подразделениями шкалы геологического времени, определенные первыми геологами, фиксируют моменты в истории Земли, когда произошли крупные по масштабу, резкие и широко распространенные изменения. Они определялись чисто качественным



Скорость вымирания морских организмов (в процентах от количества вымерших биологических семейств) очень резко колебалась на протяжении последних нескольких сот миллионов лет. Наибольшая скорость совпадает с границами между геологическими периодами. Приведено с изменениями по рисунку 1 из статьи Д. М. Рауп и Дж. Дж. Сепкоски в журнале «Сайенс», том 231, стр. 832. Американская ассоциация за прогресс в науке. Используется с разрешения. •

образом: старые формы исчезали, новые занимали их место, а граница проводилась посередине. Современный, более строгий анализ ископаемой летописи использует статистику для оценки скоростей, с которыми появляются и исчезают группы животных и растений. Эти исследования осветили пять или шесть действительно крупных вымираний, каких следовало бы ожидать, если бы столкновение с каким-нибудь космическим телом, которое представляет собой поистине мгновенное событие, играло роль в вымираниях. И если причины большинства

массовых вымираний являются гораздо более земными, чем столкновение с внеземным объектом, то, может быть, кое-что можно узнать о них путем изучения того, что известно о подоплеке «нормальных», постоянно происходящих вымираний. В отношении последних существует целый ряд примеров из настоящего и из сравнительно недавнего прошлого, которые дают нам совершенно однозначную информацию о причинах. Прежде всего здесь играют роль климатические изменения, даже очень тонкие. Например, в наши дни в пустынях южной Калифорнии существуют виды мелких рыб, которые выживают только в нескольких изолированных оазисах. Если они не будут защищены человеком, то они скоро вымрут. Несколько тысяч лет назад, в более водообильные для этого региона времена, эти рыбы процветали в больших озерах, существовавших там, — как и индейцы племени кахуилла, кочевавшие в окрестностях этих озер.

Существуют сильные косвенные доказательства того, что в основе некоторых крупных вымираний прошлого лежат климатические изменения. Конкуренция, особенно конкуренция из-за пищи, является второй причиной вымирания, хотя вряд ли она являлась преобладающей причиной при массовых вымираниях. Некоторые ученые возражали против того взгляда, что конкуренция явилась причиной подчиненной роли млекопитающих в течение мезозоя. Хотя их эволюция как бы приостановилась в начале этой эры, они смогли захватить господствующее положение только после исчезновения динозавров, то есть почти 200 миллионов лет спустя. В историческое время неизбежное или даже планируемое внедрение чуждых видов человеком часто приводило к упадку, а иногда и к полному исчезновению туземных популяций как растений, так и животных из-за конкуренции. Стоит привести здесь в качестве примера почти полное вымирание

туземных австралийских сумчатых, начавшееся, когда человек впервые появился на этом континенте.

Список возможных факторов массового вымирания является довольно длинным. Он содержит различные механизмы, начиная с экзотических и кончая обычными. В качестве примеров укажем на возможный взрыв ближайшей сверхновой звезды, в результате которого Земля получила сверхдозу смертельной радиации; последствия тектоники плит, выразившиеся в движении континентов в благоприятные или неблагоприятные климатические пояса, а также поднятия и опускания уровня океанов. Вероятно, одним из наилучших способов исследовать возможное значение некоторых из них является более подробное изучение уже установленных вымираний и, в частности, определение типов вымерших организмов, а также поиски независимых свидетельств любых изменений среды обитания во время вымирания.

ДОКЕМБРИЙСКОЕ ВЫМИРАНИЕ?

Первое событие, которое по крайней мере некоторыми палеонтологами считается массовым вымиранием, произошло в докембрийское время. Его точное время с определенностью не установлено, но произошло оно где-то в конце протерозойской эры. Организмы, которые оно затронуло, относятся к эдиакаранской фауне, упоминавшейся в главе 7, хотя некоторые виды водорослей тоже, кажется, исчезают примерно в это же время. Среди палеонтологов идут довольно жаркие споры, где именно эдиакаранские животные подключаются к общей схеме эволюции, и особенно по вопросу, связаны они или нет с фауной типа поздних сланцев Берджесс-Шэйл. Но независимо от их связей с другими организмами эдиакаранские

ископаемые остатки широко распространены в отложениях позднедокембрийского мелководья; их находят на большинстве современных континентов. Относительно хорошая сохранность, несмотря на отсутствие у них минерализованных скелетов или раковин, и их очевидно быстрое исчезновение были загадкой. И действительно, было выдвинуто возражение, что эти животные вовсе не подверглись массовому вымиранию; их внезапное исчезновение в ископаемой летописи обусловлено изменением условий их сохранности как окаменелостей. Наиболее часто упоминаемой причиной таких изменений является резкое увеличение числа падальщиков, донных, живущих в иле животных или окисляющих бактерий, которые — порознь или все вместе — быстро бы уничтожили хрупкие остатки эдиакаранских животных. Однако не было найдено никаких независимых свидетельств того, что увеличение количества любых из этих организмов действительно совпало с исчезновением эдиакаранских животных. Кроме того, имеется много примеров более поздних отложений, не содержащих эдиакаранских окаменелостей, которые в других отношениях очень похожи на них. В них не обнаружено никаких признаков резких изменений среды их отложения. Таким образом, исчезновение этой весьма разнообразной по количеству форм фауны вместе с признаками вымирания некоторых типов водорослей приблизительно в это же время показывает, что в конце протерозоя действительно произошло массовое вымирание.

Но если такое событие действительно произошло, то какова была его причина? Отложения, относящиеся к этому периоду времени, были тщательно изучены на предмет повышенного содержания иридия, но таковые не были обнаружены. На основании имеющихся (по общему

признанию скудных) данных, лучшее объяснение состоит в том, что предпочтительная среда обитания эдиакаранских животных — мелководье — резко сократилась по площади в результате падения уровня моря. Анализ осадков, сохранившихся от позднего докембрия, говорит о повторяющихся циклах подъема и спада уровня воды. Одно из крупнейших понижений уровня океана (называемых также регрессией — отступанием) в течение этого времени совпадает как будто с вымиранием эдиакаранской фауны.

Действительно, очень многие исследователи считают, что изменения уровня моря, особенно понижение его, явилось главным фактором многих отмеченных в каменной летописи массовых вымираний. Поскольку результатом выветривания и эрозии является размывание гор и холмов, снижающее общее превышение суши над уровнем морей, то всегда существуют и, вероятно, всегда были обширные пространства континентов, имеющие малую высоту над уровнем моря. В этих регионах даже сравнительно умеренные изменения уровня моря имеют драматические последствия. Биологическая активность является, как правило, высокой в мелких морях, и времена с высоким уровнем моря создают обширные пространства, благоприятные для морской жизни, но когда море отодвигается, многие из этих организмов вымирают. Общий размах колебаний уровня моря за последние 600 миллионов лет, по-видимому, был очень широк и составил по крайней мере 200 метров.

Несмотря на возможную роль изменений уровня моря при массовых вымираниях, очевидно все же, что они могли воздействовать только на морскую среду обитания. Вымирания, захватывающие также и большие количества обитателей суши (такие, как вымирание на границе мела и третичного периода), нельзя объяснить

действием только таких изменений. Более того, не все известные колебания уровня моря, в том числе довольно значительные, совпадают с крупными вымираниями.

ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕВОДА ДАННЫХ В КОЛИЧЕСТВЕННУЮ ФОРМУ И ПОНИМАНИЕ МАССОВЫХ ВЫМИРАНИЙ

Геологи и палеонтологи, пытающиеся определить и понять вымирания, сталкиваются с рядом трудностей, которые заслуживают хотя бы беглого рассмотрения. Их легко потерять из вида, когда мы многословно рассуждаем о вымираниях, подобных пермо-триасовому, которое уничтожило 90 процентов морских видов. Действительно ли мы знаем это? И насколько надежны данные?

В сущности, мы знаем на основании изучения жизни в современных океанах, что тысячи видов не оставляют никаких или практически никаких сохраняющихся остатков. Это особенно верно в отношении беспозвоночных животных, например для червей, которые тем не менее являются многочисленными и важными членами морской фауны. Вероятно, что в пермский период еще меньшая доля морских организмов могла оставить после себя окаменелые остатки. Более того, только какая-то неизвестная нам доля этих организмов, которая действительно сохранилась в виде окаменелостей, была обнаружена и изучена. На динамической, постоянно изменяющейся Земле содержащие окаменелости осадочные породы могли подвергнуться субдукции, метаморфизму, подняты и начисто эродированы — и чем древнее порода, тем менее вероятно, что она могла избежать воздействия этих процессов. С другой стороны, существуют места, в которых

осадки, богатые окаменевшими остатками живых организмов времен перми и триаса, сохранились, и в результате тщательного и подробного изучения именно этих местностей были получены данные о массовых вымираниях. Как уже было отмечено, в современных исследованиях применяются статистические методы, и хотя старая шутка о статистике, который утонул в реке со средней глубиной в четыре дюйма, подчеркивает тот факт, что статистические исследования не раскрывают всей истории, тем не менее очень большое число биологических семейств и родов, которые были изучены в связи с проблемой вымирания, гарантирует, что экстраполяция полученных выводов на все живые организмы является разумной процедурой.

Но даже к очень большим базам данных, документирующим, какие именно организмы пережили определенную границу, а какие исчезли, следует подходить с осторожностью. Неприятным, но вполне понятным аспектом палеонтологии — а в сущности и большинства наук — является специализация. Ее практическим результатом является то, что большинство палеонтологов являются специалистами по ископаемым остаткам только одного конкретного тонкого среза геологического времени — например, для перми или триаса или даже еще более ограниченной части временной шкалы. Так, специалист по перми может распознать некоторую группу организмов, которые исчезли из каменной летописи в конце этого периода. Но специалист по триасу может поместить одного выжившего члена этой группы в совершенно другую триасовую группу. В определенном смысле это будет ложное вымирание, по крайней мере для рассматриваемой группы: она «исчезает» только в силу принятой схемы классификации, а не в действительности.

Еще одним аспектом вымирания, к которому всегда следует подходить критически, является вопрос о причине и следствии. Трудно не поверить, что столкновение с космическим телом, происшедшее на границе мела с третичным периодом, повлияло на некоторые вымирания конца мела в силу того, что время этого события точно совпадает с независимой, на основе окаменелостей, определенной границей. Но это не является однозначным доказательством для установления причинного отношения. Проблема причины и следствия является еще более трудной для пермо-триасового и других вымираний, для которых нет указаний на связь с почти мгновенной катастрофой. Мы можем доказать, что изменения уровня моря, климатические изменения или другие какие-нибудь факторы совпадают с конкретным вымиранием, но только тогда, когда можно будет показать однозначно, что вымершие организмы были наиболее чувствительны именно к таким изменениям, эта связь может считаться установленной с некоторой уверенностью.

ВЕЛИКИЙ ПЕРМО-ТРИАСОВЫЙ КРИЗИС

Грандиозный характер событий, происшедших на границе мела и третичного периодов, несколько затмил подавляющее значение пермо-триасовых вымираний, когда нашли свой конец большинство видов, существовавших тогда в океанах. Опустошение суши было чуть менее тотальным. Характер жизни на Земле радикально изменился; последствия этого изменения все еще воздействуют на нас в форме всех живущих теперь растений и животных. Причины этого события — или событий — неясны, но принято считать, что для уничтожения столь большой

части жизни на Земле должны были существовать весьма суровые причины.

Картина, вырисовывающаяся в результате исследования границы перми и триаса, очень отличается от условий, существовавших на границе мела и третичного периода. Данные, относящиеся к пермо-триасу, рисуют нам ряд сложных закономерностей вымирания перед лицом сложных и взаимосвязанных изменений среды обитания. Не был установлен какой-либо четкий, ясный и определенный виновник этих изменений, но зато ученые много узнали о механизмах вымирания. И тем не менее связи между причиной и следствием все еще остаются очень тонкими и неопределенными.

Граница между пермским и триасовым периодами определялась первыми геологами на основе больших изменений, наблюдавшихся ими в морских окаменелостях. Но где находят океанские осадки, относящиеся к этим обоим периодам? Вспомним, что в течение пермского периода сформировалась Пангея и что на границе между пермью и триасом она представляла собой по существу единый континент, простиравшийся от полюса до полюса (рис. 8.4). Атлантического океана не существовало. Большая часть морских осадков, сохранившихся от этого времени, отложилась вдоль окраин океана Тэтис — восточного моря, которое в конце концов надвинулось на запад, отделив Европу от Африки и Северную Америку от Южной, как это было описано в главе 9. Сегодня эти отложения можно найти частично в южных Альпах, на Ближнем Востоке, в Пакистане, Индии и Китае. Геологическая летопись в этих регионах осложнена тем фактом, что к концу пермского периода произошло довольно быстрое понижение уровня моря, которое сильно сократило область континентальных шельфов, где отлагались осадки. И тем не менее путем тщательного изучения

сохранившихся последовательностей осадочных пород и сопоставления разрезов от одной географической местности к другой оказалось возможным сложить вместе по крайней мере некоторые фрагменты целого и восстановить картину великого пермо-триасового кризиса. В упрощенном и сокращенном виде процесс вымирания можно охарактеризовать следующим образом. Морские организмы пострадали в целом больше, чем обитатели суши, а среди морских — жившие на мелководье, особенно те, которые были прикреплены к субстрату. При этом процесс вымирания происходил географически неравномерно. Существуют хорошие доказательства того, что многие типы организмов еще до вымирания находились в упадке уже в течение миллионов лет пермского периода, но также общепризнано, что очень значительное увеличение скорости вымирания произошло в течение последних нескольких миллионов лет перми. В зависимости от точки зрения несколько миллионов лет может рассматриваться либо как очень короткий, либо как очень долгий период времени. Однако совершенно ясно, что пермо-триасовые вымирания произошли за существенно большее время, чем те, что приурочены к границе мела и третичного периода.

Что же могло послужить причиной этих избирательных, неравномерных и все же опустошительных вымираний, которые привели к почти полному уничтожению всей жизни на Земле? Самую тесную связь их можно установить с понижением общего уровня моря в конце пермского периода, которое должно было сильно сократить площадь морских мелководий. Но это само по себе не могло быть столь катастрофическим, чтобы объяснить все наблюдения, особенно постепенный упадок сухопутных организмов. Для этого требуется гораздо более сильное ухудшение среды обитания; очевидно, пермо-

триасовый мир обеспечил его. Например, понижение уровня моря было не изолированным событием, а частью нескольких циклов повышения и понижения уровня моря в конце пермского периода, что должно было вызвать смуту и опустошение жизни в обширных мелководьях на континентальных окраинах. Когда падал уровень моря, то не просто прекращали существование обширные мелководные обиталища жизни; огромные количества органического вещества, остатки мелководных организмов оказались открытыми воздействию атмосферы. Окисление этого материала приводило к образованию углекислоты, которое, как нам часто напоминают в наши дни, вызывает «парниковый» эффект. Углекислота атмосферы задерживает излучение тепла в космос и удерживает его около земной поверхности. При возрастании ее концентрации растет и средняя температура. Таким образом, изменения концентрации углекислого газа в атмосфере могут сильно влиять на климат.

Более того, на границе пермского и триасового периодов окисление органического вещества вдоль континентальных шельфов было не единственным источником углекислого газа. Сравнительно недавно была открыта странная группа соединений, которая встречается в отложениях континентального шельфа — так называемые газогидраты. Они содержат большие количества газов — таких, как углекислота и метан, — а последний тоже представляет собой парниковый газ. Они могут образовываться и существовать только в очень узких пределах условий — например, они образуются при умеренно высоких давлениях и распадаются при нормальном атмосферном давлении, свойственном земной поверхности. Резкое падение высокого давления, связанное с удалением 50–100-метрового слоя моря, покрывающего такие отложения, должно было вызвать их разложение

и поступление газов — продуктов их распада — в атмосферу. Наконец, существовал еще один источник парниковых газов — очень близко во времени к пермо-триасовой границе произошел один из крупнейших в истории Земли эпизод континентального вулканизма. Излившиеся тогда на поверхность Земли породы составляют так называемые сибирские траппы, покрывающие сейчас слой за слоем чередующимися лавовыми потоками и вулканическими обломками значительную часть центральной Сибири. (Название этих и других подобных толщ базальтовых потоков — траппы — происходит от шведского слова, обозначающего ступени. Часто, особенно после эрозии, накладываются друг на друга горизонтальные потоки имеют вид ступеней лестницы.) Многие геологи считают, что воздействие сибирского вулканизма на среду обитания было очень сильным, хотя их аргументы зависят от скорости излияния этих огромных количеств лавы. Главным следствием этого излияния, которое можно было бы связать с вымираниями, являлся выброс в атмосферу больших количеств вулканических газов — таких, как сернистый газ (SO_2) и углекислота (CO_2). Интересно отметить, что имеются хорошие доказательства того, что в другие периоды высокой скорости вымирания произошло еще несколько эпизодов мощного континентального вулканизма, из которых самым крупным было излияние траппов в Декане — огромного нагромождения лавовых потоков в центральной и западной Индии, очень похожее на сибирские траппы. Определение возраста этих пород показало, что их излияние приблизительно совпадает во времени с вымираниями на границе мела и третичного периода. Связаны ли прямо эти эпизоды массового излияния лавы на поверхность Земли с вымираниями, неизвестно, но совпадение во времени тех и других событий заставляет задуматься.

Хотя в наше время датировка изверженных пород, связанных с такими событиями, как излияние деканских или сибирских траппов, есть дело довольно простое, гораздо труднее в силу технических трудностей определить абсолютный возраст осадочных пород, о чем уже говорилось в главе 6. Поэтому существует значительная неопределенность относительно точного определения некоторых событий, которые можно связать с пермо-триасовыми вымираниями. Например, поскольку в конце перми Пангея простиралась от полюса до полюса, создались благоприятные условия для возникновения полярных ледяных шапок, и действительно существуют признаки наличия оледенений в пермский период. Вопрос в том, что неизвестно, когда именно это событие достигло своего пика и не было ли в то время глобального похолодания. Возможно, что сильные и быстрые колебания уровня моря в конце перми были частично обусловлены наступлениями и отступлениями ледников. В любом случае ясно, что за сильным падением уровня моря в конце перми последовало довольно быстро общее мировое потепление и новый существенный подъем уровня моря.

Почти все обобщенные компьютерные модели реакции климата на глобальное потепление предсказывают гораздо большую его изменчивость, чем та, которую мы сейчас переживаем. Следовало бы ожидать больших различий между средними температурами лета и зимы, а также периодических коротких наплывов как сильной жары, так и крайнего холода. Можно предположить, что такие флуктуации характеризовали потепление климата в конце пермского периода. Огромность континента Пангеи еще более подчеркивала эту тенденцию, особенно в его внутренних частях. Таким образом, даже при отсутствии мгновенной глобальной катастрофы, такой, как падение астероида, нетрудно представить себе, что при

мощных вулканических излияниях, климатической изменчивости и резких изменениях уровня моря наш мир в конце пермского периода был очень суровым местом для многих форм жизни.

ПРИЧИНЫ ВЫМИРАНИЙ НА ГРАНИЦЕ МЕЛА И ТРЕТИЧНОГО ПЕРИОДА

Как это обычно происходит после всех массовых вымираний, группы, пережившие пермо-триасовый кризис, в течение мезозоя быстро размножились и увеличили количество своих форм. Хотя и было несколько моментов, когда скорость вымирания снова увеличилась по сравнению с обычным, средним уровнем, следующее действительно крупное вымирание, зафиксированное в каменной летописи, произошло на границе мела и третичного периода. Как отмечено выше, вымирания, приуроченные к этой границе, привлекли широкое внимание, поскольку они включали исчезновение динозавров, а также по причине сильных доказательств столкновения с Землей, как раз в это время, крупного внеземного объекта. И действительно, научные встречи, на которых обсуждаются события, связанные с этой границей, как правило, привлекают необычайно разнообразный круг исследователей, от биологов, геологов, геофизиков и до химиков.

Летопись осадочных пород для границы мел—третичный период гораздо более полна и доступна, чем для более ранних вымираний, и совместное исследование ее представителями разных научных дисциплин сделало эту границу, пожалуй, наиболее тщательно изученной по сравнению с другими границами, связанными с крупными вымираниями. Некоторые из лучших свидетельств

были получены из керна скважин, пробуренных в дне океанов. Наличие распределенных по всему земному шару образцов осадков, отложившихся вдали от сферы влияния континентов, было важным фактором при сборе информации о мировых изменениях жизненной среды, происшедших на границе мел—третичный период. К сожалению, поскольку субдукция уничтожила все площади морского дна, возраст которых превышает около 200 миллионов лет, в современных океанах не сохранилось равноценных разрезов толщи осадочных пород, относящихся к границе пермь—триас. Все отобранные в морях образцы пород этого периода представляют осадки, отложившиеся на краях континентов, которые сейчас уже подняты и обнажены; последовательность пород в этих скважинах прерывается временами отсутствия осадкоотложения, вызванными колебаниями уровня океана.

Палеонтологи, изучающие керны тонкозернистых осадков из глубоководных частей океана, довольно легко идентифицируют границу мел—третичный период. Она отмечается очень резким снижением содержания ископаемых остатков планктона, особенно мелких организмов, которые живут в приповерхностных водах и образуют свои раковинки из карбоната кальция. Выше границы эти животные постепенно восстанавливают свое преобладание, но состав видов уже большей частью другой. Во многих регионах эта граница распознается по присутствию тонкого слоя граничной глины, почти лишенной карбоната кальция, но переслаивающейся с мощными толщами более молодого и более древнего известняка. Насколько можно установить, эта закономерность исчезновения планктона является глобальной, и переход от обильной выработки известковых раковин к фактически нулевой был глобальным и быстрым. Верхняя,

освещенная солнцем часть океанов, в которой обитал планктон, подверглась, очевидно, какому-то сильному воздействию, и общая биологическая активность в океанах резко упала.

На суше, помимо исчезновения динозавров, происходили и другие изменения. Одно, которое можно даже связать с исчезновением динозавров, произошло в растительном царстве. Большая часть данных из этого времени происходит не от остатков самих растений, а в результате изучения цветочной пыльцы или спор.

Страдающие от сенной лихорадки, возможно, и не согласятся со мной, но пыльца оказывается весьма полезной не только для растений, но и для людей. Вырабатываемая семенными растениями, она отличается широким разнообразием различаемых форм. Ее крошечные зернышки с помощью ветра и животных переносятся на большие расстояния от источника. Они, кроме того, обладают довольно высокой прочностью, которая предохраняет их от разрушения. Они накапливаются в медленно отлагающихся осадках озер или мелководных внутренних морей, сохраняя для нас непрерывную и часто удивительно полную запись о флоре семенных растений окружающей местности. В западной части Северной Америки эта запись была подробно изучена; вблизи от границы мел—третичный период она обнаруживает очень резкие изменения, которые дают нам ценную информацию о состоянии мира в конце мела.

Наиболее явной особенностью пыльцевой летописи является крутое падение относительного содержания пыльцевых зерен сравнительно со спорами, притом прямо на границе мела и третичного периода. Споры образуются папоротниками; это изменение показывает, что в данный момент произошла внезапная гибель семенных

растений, которая сопровождалась увеличением количества папоротников. Даже в наши дни папоротники быстро захватывают районы, где по той или иной причине были истреблены семенные растения, только чтобы потом снова уступить дорогу более «высокоразвитым» растениям, расположенным выше на более длинной временной шкале. В начале третичного периода пыльцевая летопись снова обнаруживает постепенное увеличение содержания пыльцы по сравнению со спорами по мере того, как семенные растения оправляются от последствий кризиса на границе мел—третичный период. Точное время, в течение которого произошло это восстановление, неизвестно, но похоже, что в геологических масштабах оно было невелико. Некоторые из семенных растений мелового периода так и не сохранились, оказавшись жертвами вымирания, но все же за относительно короткое время общее содержание пыльцы в осадках снова достигло прежних уровней.

Интересным аспектом этой летописи является тот факт, что резкость падения содержания пыльцы была, по-видимому, гораздо большей на юге, чем на севере. Многими палеонтологами это было интерпретировано как признак общего похолодания климата: северные виды, уже приспособившиеся к холоду, пострадали меньше. Вымирания среди планктонных организмов в океанах следуют той же закономерности — тропические формы обнаруживают признаки более сильных вымираний, чем те, которые жили в умеренно теплых водах.

Связь между микроскопическими зернышками пыльцы и гигантскими рептилиями определяется тем, что самые большие динозавры были травоядными и зависели в своем питании от растений. Резкое уменьшение количества и разнообразия семенных растений должно было

сделать их жизнь очень тяжелой; то же относится и к хищникам, которые питались ими. Тем не менее вопросы причинно-следственных связей, связанных с вымираниями на границе мела и третичного периода, все еще являются предметом жаростных споров. Стали ли и семенные растения и динозавры одновременно жертвой глобального катаклизма, вроде столкновения Земли с астероидом, или же сначала пострадали растения, обрывав пищевую цепь? Было ли столкновение причиной похолодания климата, подтверждаемого закономерностями вымирания как на суше, так и в морях, или эта общая тенденция является результатом вулканических излияний в Индии, а может, здесь действовала какая-то более банальная причина? На такие вопросы трудно ответить, но с поступлением все новой обильной и подробной информации, получаемой сейчас в результате исследования осадков того времени, в которых записаны события на границе мела и третичного периода, мы сможем в конце концов прийти к однозначному решению.

Стоит отметить, что хотя мы не раз подчеркивали внезапность вымираний на границе мела и третичного периода, в отношении которой есть неопровержимые доказательства, все же кажется, что некоторые виды, включая некоторых динозавров, находились в упадке уже значительное время перед этой границей. Для этих видов ископаемая летопись показывает, что их численность постепенно сокращалась, а их географическое распространение уменьшалось. Но как бы это ни казалось невероятным со статистической точки зрения, многие палеонтологи пришли к убеждению, что некое крупное событие на границе мела и третичного периода, вероятно, столкновение с астероидом, нанесло последний смертельный удар многим видам, жившим в мире,

который сам испытывал уже значительный биологический стресс.

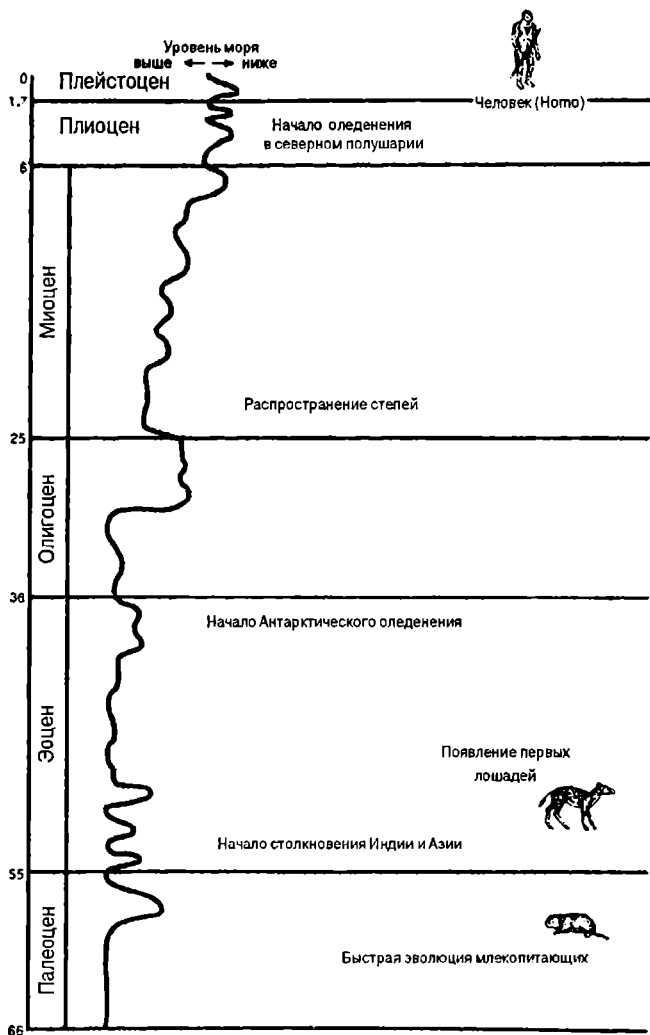
Если действительно был нанесен финальный, в геологическом смысле мгновенный удар, который закончил меловой период, то весьма вероятно, что это произошло либо в результате столкновения Земли с астероидом, либо по причине мощного вулканизма, связанного с излиянием деканских траппов. Конечно, все последние исследования по точной датировке как излияний, так и столкновения дают значения возраста, практически совпадающие с временем биологических вымираний. Поэтому вполне возможно, что *оба* эти события сыграли свою роль в вымираниях. Некоторые из предсказанных последствий крупного столкновения — глобальные облака пыли, кислотные дожди, гигантские оксанные волпы, пожары — уже были описаны, и данные геологической летописи показывают, что все эти явления происходили на границе мела и третичного периода.

Кратер Чикхулуб на Юкатане имеет в точности тот же возраст, что и граница мел—третичный период. Эта ныне погребенная структура очень велика и является свидетельством больших размеров — вероятно, около 20 километров в диаметре или больше — того объекта, который столкнулся с Землей. Но особенно интересным аспектом этого кратера является то, что он был вырыт, по крайней мере частично, в осадочных породах, состоящих из известняка и гипса — CaCO_3 и CaSO_4 . Сильнейшее нагревание этих материалов в момент столкновения должно было вызвать их химическое разложение, выбросив в атмосферу огромные количества окислов серы, а также углекислого газа. Хорошо известно, что выброс в атмосферу SO_2 из промышленных источников и вулканов вызывает образование в атмосфере аэрозолей (крохотных

взвешенных в воздухе капелек раствора SO_2 в воде). Когда их становится много, такие капельки аэрозолей создают в воздухе легкий туман, или дымку, которая частично задерживает падающие на Землю солнечные лучи и охлаждает ее. Этот эффект был прекрасно продемонстрирован, хотя и в гораздо меньшем масштабе, чем это было на границе мела и третичного периода, небольшим, но вполне измеримым уменьшением средней температуры Земли, которое последовало за выбросом большого количества серы во время извержения вулкана Пинатубо на Филиппинских островах в 1991 году. Более холодные температуры (около 0,5 градуса Цельсия) были отмечены в течение последующих приблизительно двух лет, после чего они снова возросли до предшествующих значений. Расчеты показывают, что выброс серы в результате падения метеорита при образовании кратера Чикхулуб мог вызвать понижение интенсивности солнечного излучения, достигающего земной поверхности, на 10–20 процентов. И если бы в это же время происходили обильные излияния лав в Декане, выбросив в атмосферу дополнительные количества SO_2 , то общее понижение температуры могло быть еще более значительным. Если принять во внимание, что столкновение должно было поднять глобальное пылевое облако, то кажется очень вероятным, что на Земле тогда царил сумрак и было значительно холоднее, чем сейчас, по крайней мере в течение нескольких лет после столкновения. Более того, при соединении SO_2 с водой образуется серная кислота. Частички атмосферных аэрозолей должны были быть очень кислыми, и по мере того, как они постепенно удалялись из атмосферы в результате осаждения, должны были вызвать окисляющие, кислотные дожди. Все одно к одному, так что конец мелового периода был поистине неприятным временем.

За исключением нескольких случаев, массовые вымирания происходили в каждом геологическом периоде, начиная с кембрийского. Мы довольно подробно рассмотрели два из них, самых крупных. Это были главные вымирания, выделенные первыми геологами, когда они еще грубо разделили геологическое время при создании шкалы, ибо на этих вымираниях основывалось выделение границ между палеозоем и мезозоем и между мезозоем и кайнозоем. Мы также рассмотрели, хотя и не так подробно, массовое вымирание, которое произошло в конце докембрия, уничтожив загадочную Эдиакаранскую фауну. Есть ли нечто общее в этих внезапных и резких перерывах развития жизни на Земле? В данное время ответом на этот вопрос будет, видимо, квалифицированное «нет». Квалифицированное, поскольку вполне возможно показать влияние изменений климата практически на все эти вымирания, хотя детали этих изменений не обязательно одинаковы во всех случаях. Действительно, граница между мелом и третичным периодом представляется уникальной в том смысле, что ни одна из других границ, основывающихся на массовых вымираниях, не дает однозначных признаков столкновения. Может быть, одним из самых интригующих совпадений, если это действительно совпадение, является тот факт, что два самых крупных вымирания в течение фанерозоя — на границах перми и триаса, мела и третичного периода — совпадают, каждое с крупнейшим эпизодом континентального вулканизма. Излияния базальта на континенты, подобные сибирским и деканским траппам, сравнительно редки в геологической истории, и тем не менее два таких особенно значительных эпизода совпадают с двумя самыми крупными массовыми вымираниями. Есть ли между ними отношения причины и следствия? Хотя некоторые геологи доказывают, что это

именно так, еще слишком рано выносить окончательное суждение. Не все эпизоды с излиянием базальтов достаточно точно датированы, чтобы провести убедительный анализ их возможных соответствий. Более того, хотя всегда возможно, что пропущен какой-нибудь неизвестный фактор, кажется невозможным, чтобы последствия даже очень широкого и мощного вулканизма (главным образом, выброс в атмосферу углекислого газа и SO_2) были настолько суровыми или быстрыми, чтобы сами по себе могли привести к массовым, глобальным вымираниям.



Главные события кайнозоя. Время — в миллионах лет назад. Обратите внимание, что характер изменения уровня моря в плейстоцене сильно упрощен: на самом деле на протяжении последних нескольких миллионов лет происходили многочисленные флуктуации уровня моря, о чем рассказывается в главе 12.

Глава 11

МЛЕКОПИТАЮЩИЕ, ГОРЫ И ЛЕД: КАЙНОЗОЙСКАЯ ЭРА

Кайнозойская эра по стандартам предшествующих очень коротка. Тем не менее, поскольку она является последним взмахом косы геологического времени, мы многое знаем о пей. Все еще сказываются географические последствия движения литосферных плит, а растительная и животная жизнь, развившаяся в течение кайнозоя, — это знакомые нам фауна и флора современных равнин, лесов и морей. Короче говоря, мир кайнозоя легко распознаваем и удобен, с ним легче иметь дело, чем с более удаленными от нас во времени мирами с их незнакомыми нам обитателями и беспорядочно передвинутыми континентами и океанами.

Одной из причин того, что мы так много знаем о кайнозое, является то, что океанические бассейны в своих отложениях содержат полную хронику ее истории. Все океанское дно старше 200 миллионов лет, а значительная часть более молодого подверглась субдукции, снова погрузилась в мантию Земли. Однако большая часть океанического дна, образовавшегося в кайнозойскую эру 66 миллионов лет назад, все еще доступна для изучения. И хотя мы знаем, что глубокое море это не такое уж спокойное место, как когда-то думали, с медленным дождем остатков, оседающих на дно и накапливающихся там без каких-либо нарушений их залегания, оно тем не менее дает нам замечательно полную хронику событий, отразившихся в осадках, за всю эру. Одним из великих

достижений наук о Земле в двадцатом веке явились организация и выполнение Проекта глубоководного бурения — огромного по масштабам научного предприятия, выполненного частью и для того, чтобы записать эту хронику. Сегодня, более четверти столетия спустя после его начала, этот проект получил уже другое название и цели его еще более расширились, чем в начале, но задачи его в главном остались те же — получить непрерывную серию образцов керна из океанского дна, которые помогут нам понять историю Земли. Сотни геологов со всего мира соперничают друг с другом за возможность провести на море два месяца на борту бурового судна, работая по часам, чтобы изучить, описать и проанализировать образцы керна по мере их поступления на палубу. В конце концов этот керн доставляется в одно из трех хранилищ в Соединенных Штатах — в Калифорнийском университете в Ла-Джолла, в Колумбийском университете в Нью-Йорке и в Техасском университете Эй-энд-Эм в Коллидж-Стэйшн, где они подвергаются дальнейшему изучению и хранятся в замороженном виде для будущих исследований. Эти керновые «библиотеки» являются бесценным источником материалов, документирующих историю Земли и находящихся всегда под рукой, когда появляются новые идеи или методы анализа. Хорошим примером может послужить вопрос о том, что произошло на границе мела и третичного периода. Как рассказывалось в предыдущей главе, открытие избытка иридия в отложениях, соответствующих этой границе, привело к предположению о столкновении Земли с крупным небесным телом 66 миллионов лет назад. Но показать, что это событие имело глобальный характер, а не было какой-то местной геохимической аномалией, не имеющей отношения к столкновению, можно было только на основании исследования керна скважин по всему миру. И большая часть

этого материала была получена в результате выполнения Проекта глубоководного бурения.

Независимо от точной природы событий, которыми закончилась мезозойская эра, они отметили крупнейший поворотный момент в истории Земли. Как на суше, так и на море радикально изменился весь ход эволюции. И хотя кайнозойская эра занимает только полтора процента истории Земли, действие тектоники плит, даже с присущей ей медлительностью, значительно изменило физическую географию нашего мира в течение кайнозоя. В начале ее все еще существовал пролив-океан Тэтис, о котором рассказывалось в главе 9, служа проводником для циркуляции воды в широтном направлении. Ни Гималаев, ни Альп еще не было. Климат был гораздо теплее, чем сейчас: имеются ископаемые остатки организмов, свидетельствующие о субтропических условиях на широте северного полярного круга. Млекопитающие, хотя они и существовали на протяжении всей мезозойской эры, все еще играли второстепенную роль в биологическом царстве. И все же это положение должно было вскоре измениться.

Одной из поистине удивительных особенностей кайнозоя является возможность — в силу столь обильной информации — проследить причинно-следственные связи с гораздо большей убедительностью, чем это было в отношении предыдущих эр. Совершенно ясно, что даже скромные перемещения литосферных плит в течение кайнозоя вызвали изменения климата мирового масштаба, которые, в свою очередь, оказали воздействие на ход биологической эволюции. В учебниках по исторической геологии о более ранних подразделениях геологической шкалы времени рассказывается часто в виде отдельных рассказов о важнейших физических и биологических событиях, помещенных в разных разделах, — тут о горо-

образовательных процессах, там о вулканизме; в океанах достигли расцвета такие-то и такие-то организмы, на суше такая-то группа вымерла, а такая-то пришла ей на смену. Но для кайнозоя взаимосвязи между биологическим и физическим мирами, хотя и не всегда очевидные, стали, по крайней мере в целом, более ясными — а кроме того, очевидно, что они стали играть очень важную роль. Даже те события, которые с точки зрения глобального целого кажутся совершенно второстепенными — как, например, образование Панамского перешейка около трех миллионов лет назад, соединившего обе Америки и закрывшего циркуляцию вод в широтном направлении между Атлантическим и Тихим океанами, — должны были иметь важные последствия как для климата, так и для всего биологического царства. Хотя и маловероятно, что мы когда-нибудь будем знать все детали более ранних отделов геологической истории так же ясно, как мы знаем кайнозой, все же в этом нашем знании содержится урок, который не следует забывать при рассмотрении этих древних эпох. И здесь снова, в самом широком смысле, принцип актуализма служит нам полезной опорой при рассмотрении прошлого.

ВОЗВЫШЕНИЕ МЛЕКОПИТАЮЩИХ

Кайнозойскую эру называют иногда веком млекопитающих. От земляного волка до слона, от китов до вомбатов и, конечно, включая нас, млекопитающие стали господствующей формой жизни на Земле. Они включают весь диапазон размеров — от крошечных существ вроде землероек, весом всего в несколько граммов, до гигантских голубых китов, вероятно, самых больших из когда-либо живших на Земле животных. Хотя мы не часто раз-

думываем над этим, жизни человека и других животных тесно переплетены как в нашей истории, так и в повседневной жизни. Значительную часть нашей пищи, а также немалую часть нашей одежды мы так или иначе получаем от наших одомашненных животных. Многие важные успехи в медицине были достигнуты в результате лабораторных исследований животных. И первоначальные исследования полярных океанов, а также Северной Америки и Сибири проводились с целью поисков китов и покрытых ценным мехом млекопитающих, соответственно, — к сожалению, часто с катастрофическими последствиями для существ, бывших предметом охоты.

Самые первые из настоящих млекопитающих, о которых нам известно по их окаменелым остаткам, жили в конце триасового периода, почти в начале мезозойской эры. Еще раньше существовали звероподобные рептилии, как мы уже видели (рис. 9.4). Но очень долгое время после их появления — более 150 миллионов лет — млекопитающие оставались мелкими и малозаметными животными. Согласно общему мнению, это их положение было обусловлено как наличием хищных динозавров, так и конкуренцией со всеми типами динозавров. Однако после того, как массовое вымирание на границе мела и третичного периода устранило этих конкурентов, количество и многообразие млекопитающих росло буквально со скоростью взрыва. Недавние тщательные исследования каменной летописи показали, что за приблизительно 10 миллионов лет после катастрофы на границе мел—третичный период уже существовало около 130 родов млекопитающих (род — это группа близко родственных видов), столько же, сколько существовало в любое время после этого. Летучие мыши, приматы, грызуны, киты — эти и другие предшественники современных животных уже существовали. Хотя с того времени многие

виды животных вымерли и появились новые виды, общее количество родов осталось тем же, в среднем около 90*. Это показывает, что первоначальный взлет эволюции млекопитающих довольно быстро дал устойчивую популяцию, по крайней мере устойчивое количество родов, которое впоследствии уже не изменялось коренным образом. (Следует повторить замечание, сделанное выше в этой книге, что выражения вроде «довольно быстро» всегда следует понимать в геологических описаниях и рассуждениях в соответствующем контексте. В этом случае увеличение разнообразия млекопитающих за *десять миллионов* лет можно считать быстрым только по сравнению с более ранней историей этих животных, которая заняла в пятнадцать раз больше времени.)

Млекопитающие отличаются от других животных наличием волосяного покрова на теле и привычкой ухаживать за своими детенышами. Они теплокровны, что позволило им приспособляться к изменяющимся условиям обитания с большей легкостью, чем животным, у которых ее нет, например, рептилиям. Тем не менее ни одна из этих особенностей не оставляет следов в окаменелых остатках, поэтому классификация млекопитающих на протяжении геологической истории основывается на особенностях строения скелета, особенно на строении челюстей и типах зубов. Как оказалось, именно по зубам можно многое узнать о среде обитания древних животных и особенно об их диете.

Почти все ныне живущие млекопитающие заботятся о своих малышах. Единственное исключение составляет редкая группа так называемых однопроходных, которые

* Эта цифра невероятно мала. В настоящее время одних родов грызунов насчитывается больше ста. Очевидно, автор, не являясь специалистом в систематике, спутал термин «род» (genus) и «семейство» (family). — *Прим. переводчика.*

откладывают яйца. Эти странные животные, которые включают утконоса, найдены только в Австралии. К сожалению, ископаемые остатки однопроходных почти отсутствуют, и поэтому место, которое занимают их ныне живущие представители в общей схеме эволюции млекопитающих, не совсем ясно. Но несмотря на то, что это весьма специализированные животные, однопроходные сохранили много примитивных черт и представляют собой, вероятно, ответвление от древних звероподобных рептилий. Наибольшего успеха среди млекопитающих достигли плацентарные млекопитающие, которые включают нас и большинство знакомых нам животных, как домашних, так и диких: собак, кошек, лошадей, медведей, слонов, оленей и многих других. Плацентарные млекопитающие рожают детенышей только после долгого периода беременности, и новорожденные (в большинстве случаев) готовы встретить мир лицом к лицу вскоре после рождения. Сумчатые — вторая группа млекопитающих — рожают своих детенышей на гораздо более ранней стадии их индивидуального развития и поэтому вынуждены для защиты носить их во внешнем кармане, или сумке, в течение самой ранней стадии их жизни.

СУМЧАТЫЕ

Современное распространение сумчатых дает нам интересный пример взаимосвязи между биологической эволюцией и тектоникой плит. Эти животные наиболее распространены и разнообразны в Австралии и на соседних островах (наиболее известны из сумчатых этого континента кенгуру и коала), и в меньшей степени в Южной Америке. Вероятно, вследствие биологической ценности способа рождения детенышей плацентарные млеко-

питающие имеют, видимо, некоторое преимущество перед сумчатыми всякий раз, когда они вступают в прямое соревнование. Каменная летопись показывает нам, что эти две группы, исходя от общего предка, разошлись в стороны в меловой период и первоначально сумчатые появились в Южной Америке. В конце мелового периода — незадолго до удивительного взрыва разнообразия плацентарных млекопитающих — глобальный климат был теплым и Антарктический континент был еще соединен с обеими Америками и Австралией — уцелевший остаток прежнего южного мегаконтинента Гондваны (рис. 9.1). Из Южной Америки сумчатые мигрировали через Антарктиду в Австралию. Но к концу кайнозоя Австралия стала отодвигаться от Антарктиды и перемещаться к северу, в сторону Азии. Южная Америка стала островным континентом и оставалась таковой в течение большей части кайнозоя, отделенная от Антарктиды проливом Дрейка, а ее островной мост к Северной Америке распался, как показано на рис. 11.1.

Таким образом, особенно в Австралии сумчатые получили возможность развиваться без особого влияния со стороны плацентарных млекопитающих. Сравнительно быстро они заняли все ниши, которые были присвоены плацентарными млекопитающими в других частях света. Сумчатые, которые выглядели и вели себя, как, например, волки, кошки и мыши, процветали. Некоторые из них, подобно кенгуру, не имели никаких подобных себе на других континентах, но заняли эквивалентные экологические позиции, соответствующие позициям других групп животных, в данном случае жвачных плацентарных животных. К несчастью, многим из австралийских сумчатых сейчас угрожает опасность в результате внедрения человеком на австралийский континент ряда плацентарных животных.

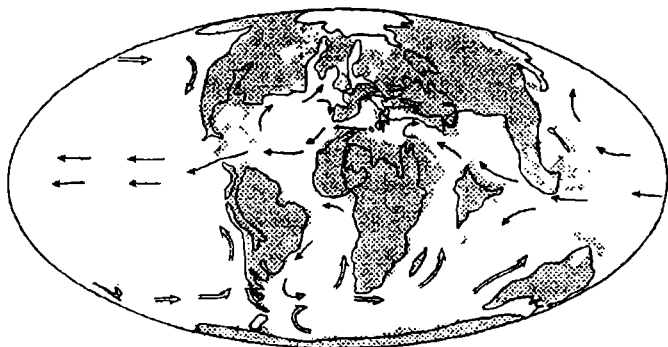


Рис. 11.1. Распределение континентов в начале кайнозоя (приблизительно 60 миллионов лет назад). Как и на рисунке 9.1, современные очертания континентов показаны серым тоном, а береговая линия начала кайнозоя обозначена сплошной линией. Обратите внимание на то, что Австралия и Южная Америка только что отделились от Антарктиды, а круговое околополярное течение еще не развилось. Сплошные стрелки обозначают теплые течения, а полые — холодные течения. Приводится с изменениями по карте 9 из «Атласа мезозойских и кайнозойских береговых линий» А. Г. Смита, Д. Г. Смита и Б. М. Фаннелла. Издательство «Кембридж Юниверсити Пресс», 1994. Использовано с разрешения.

На изолированном Южно-Американском континенте сумчатые тоже в течение кайнозоя развили большое разнообразие форм и даже, несмотря на большое количество сосуществующих с ними видов плацентарных, стали там главными хищниками. Как и в Австралии, здесь появились формы, похожие на соответствующие формы плацентарных, живших на других континентах, — например, волкообразные или кошкообразные сумчатые хорошо представлены в каменной летописи. Но когда Южная Америка воссоединилась с Северной около трех миллионов лет назад через Панамский перешеек, соревнования выиграли иммигранты с севера. Хотя и можно бы

привести несколько историй об успехе некоторых сумчатых, например опоссума — сумчатого, которому удалось выжить и даже распространиться на север, все же бывшая долго изолированной фауна южноамериканских млекопитающих (как сумчатых, так и плацентарных) была большей частью истреблена хищниками из плацентарных млекопитающих, которые вторглись с севера через Панамский перешеек.

Чтобы подробно рассказать об эволюции млекопитающих в Южной Америке и Австралии, потребовалось бы несколько книг. В них можно было бы проиллюстрировать такие темы, как параллелизм в эволюции, влияние конкуренции и климата и особенно роль тектоники плит в развитии млекопитающих, которое привело к их сегодняшним формам. Этот анализ показал бы, что медленное и неодолимое движение континентов может как создавать, так и уничтожать барьеры на путях миграции животных, оказывая глубокое влияние на ход эволюции.

ТРАВЫ, КЛИМАТ И ЛОШАДИ

Среди млекопитающих лошади в человеческом воображении занимают особое, нередко с романтическим оттенком, место. Разговор о лошадях вызывает в памяти образы диких мустангов американского Запада, монгольских всадников, мчащихся через степи центральной Азии, прекрасных арабских скакунов, идущих рысью по полям в туманное английское утро. Лошади были одомашнены тысячи лет назад. Но что мы знаем об их предшествующей истории? Когда они появились и как они эволюционировали? Ответы на эти вопросы — повторяя то, что может уже показаться знакомым припевом, — включают в себя сложное переплетение биологических

и физических влияний. К счастью, ископаемая летопись лошадей является одной из самых полных в палеонтологии и большая часть важных изменений, которые произошли в промежутке времени от появления самых древних лошадей и до их современных потомков, хорошо документирована. Их история является поистине учебной иллюстрацией процесса развития, которую учат все студенты-палеонтологи. Однако в этой классической последовательности форм есть также и предостережение, как было убедительно отмечено палеонтологом С. Дж. Гулдом. Верно, что мы можем непосредственно проследить все «улучшения» в линии развития лошадей, начиная от древнейших ископаемых и до современной лошади. Но этот путь развития, который обрисован в общих чертах в этом очерке, является лишь одним из многих возможных в сложнейшем многоветвистом дереве эволюционных изменений, а не прямолинейным и предопределенным курсом. Другие ветви уже вымерли, но не было никогда способа, позволяющего предсказать этот конечный результат.

Это может показаться неожиданным, но в начале кайнозоя не существовало никаких знакомых нам прерий, или травяных степей, в том виде, как мы знаем их, — не было никаких равнин с высокими травами, мягко колышавшимися под ветром. Растительноядные динозавры мезозоя объедали деревья, кусты и другие широколиственные растения. Травы появились только в начале кайнозоя как часть продолжающейся эволюции цветковых растений, но они занимали только очень ограниченные участки среды вплоть до середины эры, когда на континентах стали появляться широкие травяные степи. Было высказано много предположений о причинах и следствиях этого широкого распространения трав, начиная от влияния климата и до предположения, что только

появление трав с их непрерывно растущими листьями и стеблями позволило прокормить растущую массу жвачных животных. Но независимо от причин распространение степей оказало значительное влияние на эволюцию лошадей, а также других жвачных животных.

Самые древние из окаменелых остатков лошадей дошли до нас от эоценовой эпохи, и эти лошади столь значительно отличаются от современной их версии, что вначале ученые не видели между ними никакой связи. «Рассветная» лошадь, или *эогиппус* (*Eohippus*) — от греческих слов «эос» — утренняя заря и «гиппос» — лошадь, — как ее называли (хотя ее правильное название *хиракотерий* (*Hyracotherium*)), была открыта в Европе и Северной Америке. *Эогиппус* представлял собой крошечное, величиной с небольшую собаку, существо, жившее, очевидно, в залесенных областях. Хотя у этих животных были копытца, в отличие от современных лошадей их у него было несколько — по четыре на передних и по три на задних ногах, и копыта были с мягкой подушечкой (рис. 11.2). *Эогиппус* имел также приплюснутый нос по сравнению с современной лошастью, а его зубы показывают, что он питался, объедая листья и молодые побеги с ряда растений. Но хотя он был полностью травоядным животным, эта маленькая лошадка обладала собачьими зубами — напоминание о том, что многие из ее предков среди мезозойских млекопитающих были хищниками. Удлиненная морда современных лошадей является, как мы увидим ниже, прямым следствием развития зубов и челюстей, которое потребовалось для того, чтобы справиться с диетой из жестких и колючих трав.

На протяжении эоценовой и олигоценовой эпох (эоцена и олигоцена) потомки *эогиппуса* развивались в одном направлении, что хорошо документируется по их окаменевшим остаткам. Постепенно они становились крупнее;

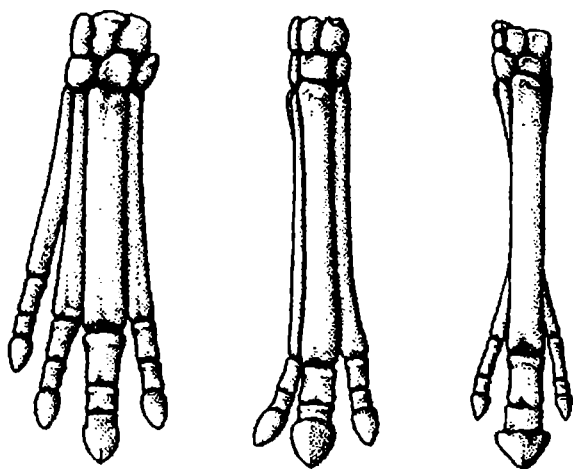


Рис. 11.2. Начиная от эгиппуса и до современной лошади, ноги лошадей эволюционировали очень значительно. Здесь показано изменение строения задней ноги — от раздельных четырех копыт у эгиппуса (слева) до одного копыта у современной лошади (справа). Приблизительный возраст для каждой из этих четырех конфигураций ноги соответствует (слева направо) нижнему эоцену, олигоцену, верхнему миоцену и современной эпохе. Параллельно шло и значительное увеличение размеров животных (не показанное здесь). Репродуцировано с рисунка 319 из книги: А. С. Ромер «Палеонтология позвоночных», изд. 2-е. Авт. право © 1945, Университет города Чикаго. Использовано с разрешения изд-ва «Юниверсити оф Чикаго Пресс».

средний палец, который в конце концов стал единственным копытом на ноге современной лошади, становился сильнее и длиннее по сравнению с остальными, а разжевывающая поверхность зубов увеличилась; на ней появились сложной формы выступающие бугорки. Но сходство с эгиппусом еще отчетливо сохранялось. И только в миоцене, параллельно с распространением травяных степей, произошли резкие изменения, в результате чего появилось несколько различных линий развития лошадей,

из которых сейчас сохранилась только одна — современная лошадь. Многие другие эксперименты природы в области эволюции лошадей зашли в тупик и не оставили форм, доживших до наших дней.

Рекламный лозунг «вы есть то, что вы едите» можно было бы применить к лошадям: несколько физических особенностей современных лошадей в конечном счете обусловлены их травяной диетой. Среди миоценовых модификаций, которые привели лошадей к их современному облику, главными были изменения зубов и формы головы. Трава имеет сильные истирающие свойства; ее гораздо труднее разжевать и перетереть, чем сочные листья тропических растений, которые служили кормом для некоторых из предшественников лошадей. Она содержит кремнезем и способна затупить даже лезвия сенокосилки за сравнительно короткое время. Ответом на этот вызов природы со стороны миоценовых лошадей было развитие зубов с гораздо более прочными и усовершенствованными по своей структуре истирающими поверхностями и с гораздо более широкими концами, часть которых, по крайней мере, могла дорастать по мере их износа. Эти изменения означали, что голова лошади должна была удлиниться так, чтобы в ней могли поместиться длинные ряды растирающих пищу зубов, расположенных вдоль щек. Приблизительно в это же время ноги и стопы предков нынешней лошади стали лучше приспособленными к быстрому бегу по все более распространяющимся степям. Это произошло путем слияния нескольких независимых костей в нижней части ног, что придало им прочность, а также путем все большей роли центрального, заканчивающегося копытом пальца, который теперь один выдерживал весь вес животного. Вместо ступни у лошадей на конце каждой ноги осталось только по одному пальцу, как это видно из рис. 11.2.

К середине миоцена многие из существовавших тогда лошадей были уже, по крайней мере внешне, похожи на современную лошадь. Эволюционные изменения продолжались, конечно, вплоть до нынешнего времени, но вы без всяких усилий распознали бы лошадь в этих миоценовых животных. Если судить по сохранившимся ископаемым остаткам, то может показаться, что все их развитие происходило в Северной Америке, но к эпохе плейстоцена уже по всему миру распространился род современной лошади, *Equus*. Затем необъяснимым образом, всего лишь восемь-десять тысяч лет назад лошади исчезли из Северной Америки. Причины этого вымирания неизвестны. Некоторые считают, что оно произошло в результате проникновения человека на континент через мост суши, соединявший Аляску с Сибирью. Другие предполагают, что какая-то эпидемия уничтожила всех лошадей. Но какова бы ни была причина, остается факт, что равнины Северной Америки тысячи лет обходились без этих изящных животных, пока лошади, завезенные из Европы первыми испанскими завоевателями, не убежали от своих хозяев и не стали вновь заселять обширные травяные равнины.

Из изложенного ясно, что многие из знакомых нам особенностей лошади — ее скорость, форма головы, ее копыта и даже широкое распространение в мире — все они прямо или косвенно были связаны с ее диетой и предпочитаемым ею характером среды — травяными степями. Но как и почему стали развиваться сами травяные степи? Как указывалось выше, на этот счет существует несколько конкурирующих гипотез, но лишь немногие соответствуют фактам. Большая их часть признает в качестве важного, может быть, главного фактора изменение глобального климата. В частности, степи стали быстро расширяться по мере того, как климат внутренних областей континентов становился все более холодным и сухим.

По сравнению с современным, климат конца мезозойской эры был мягким и оставался таким в течение части кайнозоя. И действительно, в начале эоцена средняя годовая температура, очевидно, повысилась, что сделало время около 55 миллионов лет назад самым теплым за последние 70–80 миллионов лет. Но вскоре после этого климат резко похолодал. Несмотря на наступавшие время от времени довольно длинные периоды сравнительно устойчивых температур, Земля с тех пор стала все более охлаждаться. Откуда мы об этом знаем? Температуры не могут окаменеть, но изобретательность ученых нашла несколько вполне качественных «палеотермометров», которые позволили с успехом реконструировать климаты прошлого, в частности климаты кайнозоя. Наряду с более количественного характера данными, например, наблюдениями над распределением по широтам некоторых животных или растений, которые, как нам известно, предпочитают определенные температурные границы, эти индикаторы позволили составить очень полную летопись глобальных флуктуаций температуры в течение кайнозоя.

В принципе, все, что реагирует на изменения температуры окружающей среды предсказуемым образом и сохраняет «запись» об этой реакции как часть окаменевшей летописи, может быть использовано в качестве палеотермометра. Как оказалось, две серии записей температур кайнозоя включают такие радикально разные характеристики ископаемой летописи, как очертания листьев растений и содержание изотопов кислорода в известняке.

Но как же могут очертания листьев указывать на температуру? Как ни удивительно, но они делают это очень хорошо. То, что существует определенная связь между

очертаниями листьев и климатом, было установлено еще в начале двадцатого столетия, но в 1978 году Джек Уолф, работавший в Геологической службе Соединенных Штатов, поставил эту связь на количественную основу. Пользуясь данными, относящимися к современным лесам восточной Азии, он показал, что существует замечательная корреляция между средней годовой температурой и очертаниями листьев. Особенностью листьев, которая, по видимому, наиболее показательна в этом отношении, является форма контура листа (рис. 11.3). В тропических областях, отличающихся высокой температурой и обилием осадков, растения, в общем и целом, обладают крупными листьями с плавными очертаниями, без зубцов, и часто имеют узкий и удлинённый кончик — называемый иногда капельницей (*a drip tip*), — облегчающий стекание воды с листа. В противоположность этому в более прохладных областях листья в общем имеют меньшую величину и более узкую форму, обычно с зазубренными краями. В современных лесах эти особенности характеризуют климатические различия во всем мире и не совпадают с фаунистическими особенностями различных областей. Кажется вполне разумной экстраполяцией допустить, что такие же отношения между формой листьев и климатом существовали и в более древние времена, и детальная хроника изменения среднегодовых температур в кайнозое, реконструированная палеонтологами на основе изучения окаменевших остатков и отпечатков листьев, с уверенностью подтверждает это допущение.

Кислородно-изотопный палеотермометр очень отличается по лежащему в его основе принципу от предыдущего, но он рассказывает нам ту же историю, что и остатки листьев, давая нам значительную степень уверенности в правильности нашего понимания климатических колебаний в течение кайнозоя. Этот метод был придуман

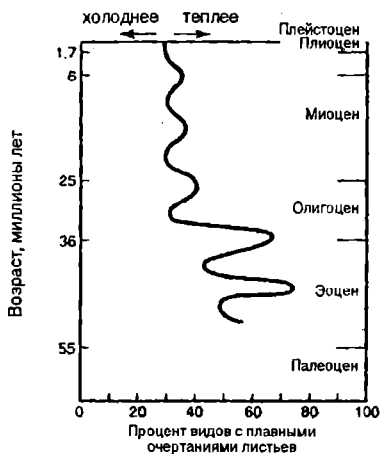


Рис. 11.3. Листья растений могут иметь плавно изогнутые или зубчатые очертания, что иллюстрируется рисунком вверху слева. В современных лесах преобладают виды с плавными очертаниями листьев, что соответствует высоким значениям средней температуры, как это видно на верхнем графике, построенном на основе фактических наблюдений. Применяя эту закономерность к очертаниям ископаемых листьев по территории Тихоокеанского Северо-Запада Северной Америки, можно реконструировать температурную историю кайнозоя (нижний график). Наблюдаемые флуктуации средней температуры, особенно ее резкое падение около границы эоцен—олигоцен, очень похожи на флуктуации, выведенные из совершенно независимых данных, например показанных на рисунке 11.4. Приводится с изменениями по рисункам 1, 2 и 3 из статьи Дж. А. Вольфа в журнале «Американ Сайентист», том 66, стр. 695, 696, Sigma Xi, 1978.

Харолдом Юри, химиком и лауреатом Нобелевской премии, которого мы уже упоминали в главе 3 в связи с его экспериментами, проведенными совместно со Стэнли Миллером, по происхождению жизни. Как уже разъяснялось в главе 6, различные изотопы одного элемента ведут себя одинаково в химических реакциях, но слегка различаются по массе составляющих их атомов. В результате один изотоп может чуть-чуть накапливаться или теряться в некоторых химических реакциях или в некотором физическом процессе, например при испарении.

Хорошим примером действия этого принципа является влияние испарения на содержание изотопов кислорода в воде. Как мы уже объясняли выше в этой книге, кислород имеет три изотопа, из которых изотоп 16 является наиболее распространенным в природе, составляя более 99 процентов обычного кислорода. Однако всякий природный кислород содержит небольшое количество изотопа 17 и изотопа 18. Таким образом, молекула воды, весьма вероятно, имеет вид $\text{H}_2\text{O}-16$, но может также быть и $\text{H}_2\text{O}-17$ или $\text{H}_2\text{O}-18$. Во время процесса испарения более легкие молекулы воды — те, которые содержат кислород 16, — имеют большую вероятность испариться. Таким образом, в этом процессе изотопы кислорода разделяются на фракции — части, отличающиеся содержанием составных частей. По мере испарения пар обогащается более легким кислородом 16 и становится (в пересчете на жидкость) легче, а остающаяся жидкость, с большей долей кислорода 17 и кислорода 18, становится тяжелее.

Юри изучал процесс фракционирования (разделения) изотопов в различных химических реакциях и знал, что точное значение степени фракционирования исходной смеси изотопов контролируется температурой, при которой протекает реакция. Затем ему пришла в голову блестящая мысль. Он понял, что когда обитающие в океане

организмы образовывали свои раковинки из карбоната кальция, используя растворенные в морской воде компоненты в качестве сырья, то относительное содержание изотопов кислорода в раковинах зависело от температуры воды. Открывались захватывающие перспективы возможных дальнейших исследований. В принципе, это был метод, позволяющий расшифровать летопись изменения температур моря во времени, просто измеряя содержание изотопов в крошечных раковинках давно погибших организмов в кернах океанских осадков. Но поскольку сохранились остатки как обитателей поверхностных слоев, так и обитателей дна, то открывалась возможность что-то узнать о разнице температур между поверхностными и донными водами древних океанов. И более того, путем анализа образцов одного возраста, но взятых на низких и на высоких широтах, можно было определить температурный градиент, то есть изменчивость температур, от полюса до полюса, что, как оказалось, представляет собой важный параметр для понимания мирового климата.

Как часто происходит с научными открытиями, внедрение в практику палеотермометра Юри оказалось не таким простым делом, как представлялось. Например, снег, образующий полярные снеговые шапки, состоит из воды, испарившейся из океанов, — этот процесс, как мы видели, изменяет содержание изотопов кислорода в остающейся морской воде. Поэтому в периоды оледенения изменения в содержании изотопов кислорода в морской воде в результате образования приполярных ледников могут быть не меньше обусловленных флуктуациями температуры. Но в определенном смысле это всего лишь проблема интерпретации. Это не меняет того факта, что флуктуации содержаний изотопов кислорода происходят реально и постоянно фиксируются в раковинах

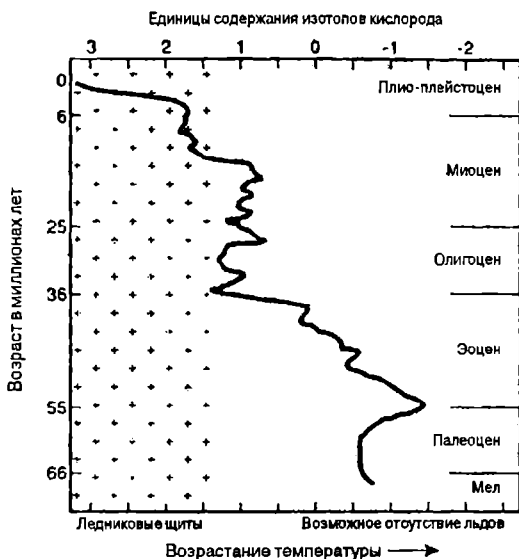


Рис. 11.4. Содержание изотопов кислорода в раковинках планктона из керна глубоководных скважин, пробуренных в Атлантическом океане, можно пересчитать в температуры воды в прошлые эпохи. Обратите внимание на резкое падение средней температуры около границы эоцена и олигоцена, а также за несколько последних миллионов лет, которое, вероятно, указывает на начало постоянного оледенения в северном и южном полярных регионах соответственно. Содержание изотопов кислорода свыше 1 (в использованных здесь единицах), по-видимому, соответствует эпохам значительного глобального оледенения. Приводится с изменениями по рисунку 1 из книги: К. Г. Миллер, Р. Г. Фэрбенкс и Г. С. Маултин. «Палеоокеанография», том 2, стр. 3. Американский геофизический союз, 1987.

ископаемых организмов. Даже если точные значения температур остаются несколько неопределенными, то время температурных сдвигов может быть определено очень точно. В наши дни изучение содержания изотопов кислорода стало твердо установившимся методом познания климатов прошлого.

Изменения температуры в кайнозой, о которых упоминалось выше, определенные по результатам исследований содержания изотопов кислорода, показаны на рис. 11.4. Данные, полученные из наблюдений формы листьев, очень хорошо подтверждают эту температурную хронику — особенно высокие температуры начала эоценовой эпохи и очень резкое падение температур на границе эоцена и олигоцена. Это совпадает с началом оледенения Антарктиды и развитием полярной ледяной шапки. Тенденция к мировому похолоданию в течение эоцена очень подробно документируется в Западной части Северной Америки на основе исследования ископаемых остатков листьев. Эти данные говорят не только о понижении среднегодовых температур, но и об увеличении разницы между температурами зимы и лета и усилении сухости климата. Леса отступали, процветали травяные степи. Параллельно шло развитие лошадей и других жвачных животных.

Хотя на климат влияют многие факторы, все же представляется, что две самых больших, очень резких флуктуации в течение кайнозоя — причем обе представляют собой падение средней температуры — произошли, по крайней мере частично, под влиянием движения плит на атмосферную циркуляцию. В конце мезозоя и в начале кайнозоя те самые перешейки, которые соединяли Австралию, Антарктиду и Южную Америку и позволили сумчатым распространиться и в Австралии, стали препятствием для круговой широтной циркуляции морских течений вокруг Антарктического континента. В результате этого холодные воды устремились на север в Индийский, Тихий и Атлантический океаны, смешиваясь с водами тропиков, а обратные потоки теплой воды к югу обусловили относительно теплый климат полярной области — и сохранение ее свободной ото льда (рис. 11.5).

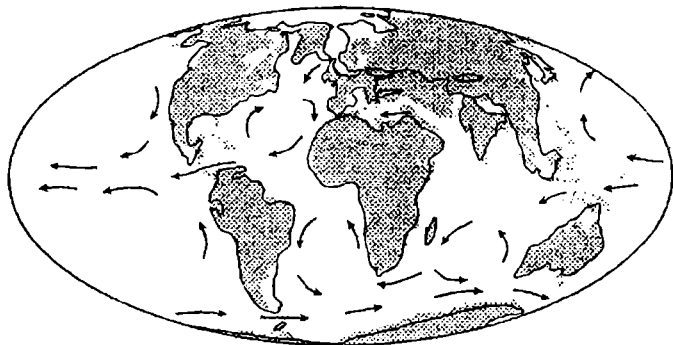


Рис. 11.5. К началу эоцена Антарктида была уже изолирована от остальных континентов и вокруг нее образовалось круговое течение. На этой карте показано расположение континентов приблизительно 30 миллионов лет назад. Как и на других картах этого типа, сплошные линии обозначают очертания континентов в то время, а серый тон — их современные контуры. Приводится с изменениями по карте 5 из «Атласа мезозойских и кайнозойских береговых линий», авторы: А. Г. Смит, Д. Г. Смит и В. М. Фанселл. Изд-во «Кэمبرидж Юниверсити Пресс», 1994. Использовано с разрешения.

Однако после того как Австралия, а в конце концов и Южная Америка отделились в кайнозое от Антарктического континента, холодные полярные воды уже могли циркулировать вокруг него, как это происходит и сейчас, изолируя его от более теплых водных масс, находящихся ближе к экватору (рис. 11.5). Антарктида становилась все холоднее, на ней образовалась постоянная ледяная шапка — особенность, которая сама по себе оказывала заметное охлаждающее влияние на глобальный климат. Начало оледенения в Антарктиде, как следует из других фактов, тесно совпадает с резким понижением температуры морской воды близ границы эоцена с олигоценом (показанным на рис. 11.4), которое следует из данных кислородно-изотопного анализа.

Второе резкое падение температуры, которое видно на рис. 11.4, произошло 3–4 миллиона лет назад, в то время, когда еще один сдвиг литосферных плит повлиял на циркуляцию воды в океанах. Приблизительно в это время появившийся Панамский перешеек закрыл зазор между Южной и Северной Америками, заблокировав проникновение теплых вод Атлантического океана на запад, в Тихий океан, как было перед этим. В результате этого усилился Гольфстрим, неся больше сравнительно теплых вод вдоль восточных берегов Северной Америки. При ее уже холодном климате это теплое течение несло с собой много влаги, которая выпадала в северных областях, что довольно скоро привело к развитию ледяной шапки вокруг северного полюса, а это в свою очередь понизило температуры в других частях земного шара. Как и при резком падении температуры в эоцене, это изменение температуры оказало заметное воздействие и на биологическое царство. Таким образом, геологическая история кайнозоя четко показывает нам, что и климат, и тектоника плит, и эволюция жизни на Земле неразрывно связаны.

ГОРЫ В ЕВРОПЕ И АЗИИ

Я знаком с несколькими геологами-альпинистами, но многие люди, которые увлекаются таким времяпрепровождением, не осознают, вероятно, насколько они обязаны своим удовольствием тектонике плит. Такие горы, как Монблан и Эверест — если назвать наудачу всего два знаменитых среди альпинистов пика, — обязаны своим существованием в конечном счете расколу Гондваны, медленному движению с юга на север нескольких обломков континентов и их последующему столкнове-

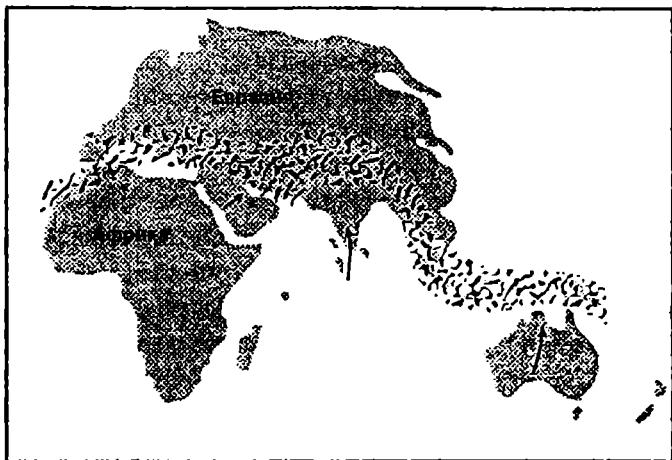


Рис. 11.6. По мере того как континенты, составлявшие прежнее Гондвану, двигались на север и сталкивались с Европой и Азией, формировались гигантские горные цепи (показано особым узором на сером фоне), простирающиеся от северо-западной Африки и Альп до Гималаев и далее до Индонезии. Приводится с изменениями по рисунку 15.29 из книги: Р. Х. Дотт, мл., и Д. Р. Протэро, 5-е изд., изд-во «Мак-Гроу-Хилл», 1994. Использовано с разрешения.

нию с лежащими на севере массивами суши. Эти столкновения, породившие обе эти горные вершины, произошли в кайнозое. Таким образом, кайнозой вполне можно было бы назвать и эрой гор, а не только эрой млекопитающих. На протяжении ее сравнительно короткого — всего 66 миллионов лет — временного промежутка произошло огромное по масштабам горообразование.

Карта рельефа земных полушарий показывает, что на Земле имеется практически непрерывная полоса, которая протянулась от Испании и Северной Африки через Европу и Ближний Восток в Индию, Китай и даже в Индонезию. Этот горный пояс в схематизированной форме показан на рис. 11.6. Хотя отдельные части этого

огромного горного региона имеют разные названия — Пиренеи, Альпы, Кавказ, Памир, Гималаи и другие, — все они возникли, когда континенты древней Гондваны столкнулись с Европой и Азией.

В меловой период, уже в конце мезозойской эры, южнее Европы и Азии располагался океан Тэтис. Берега его омывались теплым биологически продуктивным мелководьем. Осадки, которые здесь накапливались, содержали много органического материала, который сейчас обеспечивает значительную часть мировой потребности в нефти. Но дни этого океана уже были сочтены. В ответ на раздвиг океанского дна в Атлантическом океане и южных океанов вокруг Антарктиды Африка устремилась на север, к Европе. В общем смысле можно сказать, что Альпы и связанные с ними горы всей Европы, Северной Африки и восточной части Средиземноморья образовались в результате столкновения между Африканским блоком и Евразией. Однако в природе редко все бывает просто и ясно, и процесс образования Альп не является исключением. Даже те геологи, которые изучали Альпы всю свою жизнь, были озадачены некоторыми аспектами их геологии. Но если несколько отступить назад и начать мазки широкой кистью, можно понять общую линию.

В регионе, находящемся южнее Европы, Тэтис никогда не был широким морем. Как отмечалось в главе 9, этот океан образовался в течение мезозоя в результате прогрессирующего раскола Пангеи, продвигавшегося с востока на запад. Помимо главной африканской плиты, в то время существовало, по-видимому, еще несколько микроплит, мелких осколков континентов, в пределах океана Тэтис между Африкой и Европой — осколков процесса, который расколол эти две континентальные массы. Первоначальные стадии образования Альп относятся к началу кайнозойской эры, когда эти микроплиты

столкнулись с Европой, сжимаясь и напolzая па свои же более северные континентальные части вместе с фрагментами бывшего здесь раньше морского дна и отложениями континентального шельфа. Два из таких микроконтинента образуют регионы, которые мы сейчас знаем как Италию и Испанию.

Формирование Альпийского пояса продолжалось, когда Африканская плита стала непреклонно нажимать на север, в сторону Евразии, закрывая постепенно пролив Тэтиc. Поскольку приблизительно в то же время северные части Атлантического океана все больше открывались, благодаря раздвигу морского дна, то между Африканской и Европейской плитами происходило также движение (сдвиг) в широтном направлении, приводя к вращению и дроблению обеих микроплит и окраин континентов и тем самым значительно осложняя задачу геологов, пытающихся раскрыть историю возникающих в результате этих событий горных систем.

Столкновения между континентами обычно происходят в растянутой временной шкале, даже в геологическом смысле. Частично это обусловлено медленностью движения плит, а также тем, что очертания континентального края обычно имеют неправильную форму, и даже если они прямолинейны, то во время столкновения они чаще всего не параллельны. Процесс столкновения, образовавший Альпы и связанные с ними горы Европы, Северной Африки и восточного Средиземноморья, не является исключением. Он продолжался в течение большей части кайнозоя, закончившись меньше десяти миллионов лет назад. Это было сложное, многоаспектное событие, но по причине своей относительной молодости образовавшиеся горы весьма способствовали постижению разнообразных процессов, происходивших раньше во время аналогичных процессов столкновения плит, в результате

которых возникли более древние, ныне значительно эродированные горные цепи вроде Аппалачских гор в восточной части Соединенных Штатов.

Одним из наиболее захватывающих аспектов геологии Альп является наличие в них так называемых покровов. Эти структуры являются немymi свидетелями огромных сжимающих сил, действующих в процессе столкновения континентов. Можно предложить хороший способ представить себе, что такое тектонический покров, не наблюдая его непосредственно. Вообразите, что с помощью длинной палки вы приподняли прямоугольный ковер за его центр, так что часть его свисает вертикально, имея двойную толщину, в то время как остальная часть ковра лежит плоско на полу. Затем сдвинем палку в сторону, слегка покачивая ею из стороны в сторону и опрокинув складку на лежащую на полу часть ковра. Бóльшая часть ковра окажется в складках. Покровы представляют собой огромные складки, образованные слоями твердых пород, лежащими сейчас более или менее горизонтально, так что длина их от основания до замка во много раз превышает их толщину. Эти гигантские складки часто протягиваются в направлении поперек их общего простираия на десятки километров поверх толщ пород совершенно иного происхождения. В древних коллизионных (от «коллизия» — столкновение) горных поясах, в которых, вследствие эрозии или метаморфизма, сохранились только фрагменты таких структур, их расположение относительно окружающих пород нередко бывает очень загадочным. Даже в Альпах покровы очень часто являются частично разрушенными эрозией, но обычно их можно проследить от пика до пика через эродированные долины.

И в наши дни в средиземноморском регионе все еще продолжается субдукция как результат общего движения Африки на север и продолжающегося столкновения

между Евразийской и Африканской плитами. В этом процессе часть дна Средиземного моря заталкивается под Европу. Отличительным признаком зоны субдукции является череда, или дуга вулканических островов над нею. Активные вулканы островов, лежащих напротив северного берега Сицилии, таких как Стромболи и Вулькано, а также греческие острова в северной части Эгейского моря, — все они обязаны своим существованием тому же процессу, который образует вулканы Алеутских островов, Индонезии и Анд: вода, захваченная погружающейся частью плиты и затягиваемая вместе с последней в глубины Земли, понижает точку плавления уже горячей мантии и вызывает плавление ее.

Если Африканская плита будет продолжать движение на север, то Средиземное море в конце концов ожидает та же судьба, что и его предшественника — океан Тэтис, и когда Африка и Европа далее сблизятся, оно в конце концов исчезнет. И действительно, существуют данные, полученные в результате работ по Проекту глубоководного бурения, что в прошлом уже были периоды, когда Средиземное море переставало существовать, хотя и не вследствие спайки Европы с Африкой. Обнаружены мощные (местами до километра) толщи солевых отложений, погребенные под нормальными осадками морского дна. Возраст этих отложений около шести миллионов лет; очевидно, приблизительно в это время Гибралтарский пролив временно закрылся, заблокировав обмен водой с Атлантическим океаном, и Средиземное море просто испарилось, оставив после себя только соль, которая была растворена в его водах.

Поскольку содержание соли в морской воде хорошо известно, то было простым делом рассчитать, сколько соли должно было отложиться после высыхания Средизем-

ного моря. Однако оказалось, что наблюдаемая мощность толщ соли намного больше той, что должна была образоваться за время этого одного эпизода с высыханием моря. Отсюда можно предположить, что барьер, препятствовавший проникновению вод Атлантического океана в область Средиземноморья, был довольно хрупок и периодически прорывался (образуя грандиозные водопады, низвергавшие массы воды в Средиземноморский бассейн) и что мощные солевые отложения являются результатом неоднократных циклов наполнения и испарения этого бассейна.

Далеко к востоку от Средиземного моря и Альп располагается другая замечательная особенность рельефа Земли — Тибетское плоскогорье и Гималаи. Этот регион является самым крупным и высоким поднятием на нашей планете, родиной «противного снежного человека» и (в лучшие времена) Далай-Ламы. Он также возник в результате раскола Гондваны и столкновения континента с континентом — в данном случае столкновения между Индией и Азией.

Индия представляет собой часть той же литосферной плиты, которая несет на себе континент Австралию, как это видно на рис. 5.2, но при расколе Гондваны она отделилась от Антарктиды гораздо раньше, чем Австралия. К тому времени, когда сумчатые переселились сюда из Южной Америки, Индия уже отодвинулась от Антарктиды и на ее территории не было найдено никаких ископаемых остатков сумчатых. В течение десятков миллионов лет Индия буквально мчалась (выражаясь геологически) на северо-запад, в сторону Азии, со скоростью более десяти сантиметров в год. Но с точки зрения тектоники плит это требует, чтобы находящееся между ними морское дно подверглось субдукции, и действительно, существуют доказательства этого, которые находятся

в породах Гималаев. Здесь найдены метаморфизованные, но тем не менее распознаваемые остатки вулканических дуг, красноречивые признаки наличия зоны субдукции вдоль южного края Азии.

Около 55 миллионов лет назад — точное время события является предметом споров — началось великое столкновение. В течение длительного времени еще до него мелкие обломки коры — экзотические территории, если воспользоваться ранее применявшимся жаргоном, — были выдвинуты на Азию или вытолкнуты поверх погружающегося под нее морского дна. (Произошло расщепление надвигающейся с юга плиты: нижняя ее часть была задвинута под Азиатскую плиту, то есть подверглась субдукции, а верхняя часть, разбитая на обломки, была надвинута поверх края Азиатской плиты, образовав несколько «экзотических» блоков. — *Прим. переводчика.*) Теперь эти экзотические территории являются частью Тибетского плоскогорья. Но первый контакт с Индией произошел, видимо, в той области, которая сейчас образует его северо-западный угол, после чего этот континент стал медленно поворачиваться против часовой стрелки, закрыв оставшееся пространство океана Тэтис, подобно гигантской челюсти. В ходе этого процесса мелкие куски морского дна, которые не подверглись субдукции, были надвинуты на сушу и сейчас их можно найти в Тибете. Некоторые из высочайших вершин Гималаев частично сложены океанскими осадками, происходящими из окраин пролива Тэтис, которые во время столкновения плит были оторваны и надвинуты на материк Азию.

Хотя хронология столкновения плит и может быть в какой-то степени установлена с помощью абсолютного датирования образцов горных пород из Гималаев с помощью методов, основывающихся на радиоактивном распаде, как это описано в главе 6, все же не всегда можно

определить, были ли эти породы образованы во время столкновения или же определенный их возраст фактически отражает более ранние события, а может быть и то, что геологические часы были заново заведены метаморфизмом. К счастью, существуют и дополнительные ключи к определению времени событий. Поскольку Индия с конца мезозойской эры была островным континентом, то есть еще до наступления века млекопитающих, то прибытие разнообразных групп континентальных млекопитающих, развившихся в Азии, представляет собой четкую границу в ископаемой летописи Индии. Это произошло 45 миллионов лет назад, что указывает на то, что в это время уже был установлен подходящий миграционный путь по суше между Азией и Индией.

Несмотря на тот факт, что столкновение между Индией и Азией началось более 50 миллионов лет назад, поднятие, которое привело к возникновению современных Гималаев, произошло гораздо позже. Как уже упоминалось, столкновение континентов — это событие, растянутое во времени, и долгое время Индия вращалась своей северной частью на северо-восток, заперев моря вдоль всего своего северного края, прежде чем завершилась спайка континентов. Первые указания на развитие больших горных цепей получены из осадков, отложенных в Аравийском море, Бенгальском заливе и на самом Индийском континенте. Горы создают весьма своеобразные осадки. Независимо от типов встречающихся пород крутые горные склоны и быстрые сбегające вниз потоки означают, что эродированные остатки пород, отлагаемые ими, будут, как правило, грубозернистыми. Такие осадки вначале появились в океане напротив устьев Ганга и Инда — главных рек, собирающих воду с Гималаев, — приблизительно в середине миоцена, около 20 миллионов лет назад. Аналогичные осадки появляются примерно

в это же время в отложениях мелководных морей, которые в то время покрывали часть Индийского континента.

Скорость перемещения Индии на север резко снизилась, когда началось ее столкновение с Азией, но сжатие между этими континентами продолжается и по сей день. Силы, участвующие в таком столкновении, невообразимо велики. Кора Индии, состоящая из типичных континентальных пород с низкой плотностью, не может погрузиться глубоко в мантию — она слишком плавучая. Но по мере того как она дробилась об Азию, она все же попыталась следовать движению морского дна, которое погружалось в зону субдукции. При этом часть ее проскользнула под Азию, образовав там континентальную кору вдвое более мощную, чем где-либо еще в мире. Сопровождавшие этот процесс огромные напряжения неизбежно вызвали раскол и растрескивание коры. Большая часть поднятия Гималаев за последние несколько миллионов лет происходила в форме выпячивания отщепов коры, которые в условиях двустороннего бокового сжатия были выжаты кверху вдоль круто падающих сбросов, когда Индия безжалостно нажимала в северном направлении в сторону Азии. Этот процесс был спорадическим, но непрерывным, шел внезапными рывками и сопровождался сильными землетрясениями: он включается, когда напряжения, действующие в трещинной зоне, становятся слишком большими и два соседних блока проскальзывают мимо друг друга.

Ближайшие окрестности Гималаев не являются единственным местом, где происходят разрушительные землетрясения, связанные со столкновением между Индией и Азией. По мере того как Индия продвигалась на север, кора утолщалась, части ее были задвинуты под кору Азии, а другие части вытеснены вверх вдоль плоскостей взбросов. Но это не могло погасить продолжающееся

движение плит. Кроме того, части Азии были сжаты и повернуты к востоку, в сторону от направления все еще продолжавшегося движения Индийского континента. Большая часть этого движения происходила вдоль сбросов широтного направления, и оно все еще продолжается, поскольку Индия все еще продолжает свое движение на север. Последствия этих движений ощущаются за тысячи километров от этого района. Землетрясения, погубившие сотни тысяч жизней в Китае, произошли вдоль линий сбросов, связанных с этим столкновением. Также и озеро Байкал в южной Сибири, самое большое пресноводное озеро в мире, лежит в рифте, который образовался, вероятно, когда Азия подверглась сжатию со стороны Индии и повернулась под этим нажимом.

Прежде чем оставить тему горообразования в кайнозое, стоит вкратце коснуться воздействия таких событий на климат Земли. Мы уже видели, что движение континентов, изменяя пути циркуляции воды в океанах, может влиять на климат, как произошло, когда после раскола Гондваны Антарктида оказалась изолированной околополярным течением и на ней образовалась ледяная шапка. С другой стороны, на циркуляцию атмосферы влияют горы. Иногда они действуют как барьеры для приповерхностных потоков воздуха и могут сильно влиять на распределение атмосферных осадков. Это наблюдается вдоль западного берега Северной Америки, где влажный тихоокеанский воздух направляется вверх через хребты, подобные горам Сьерра-Невада в Калифорнии, заставляющие его терять большую часть своей влаги. В результате этого к востоку от лыжного региона, где обычно зимние снега толщиной до 3–4 метров, лежит сухая пустыня Долина Смерти. Гималаи и Тибетское плоскогорье оказывают еще более драматическое воздействие, поскольку они играют огромную роль в распределении индийских

муссонов — части системы мировой циркуляции воздуха, которая влияет на распределение климата на всей планете. При приближении лета солнце нагревает высокое Тибетское плоскогорье и воздух над ним, вызывая изменения в общей схеме атмосферной циркуляции, которые притягивают влажный тропический воздух и способствуют выпадению осадков с юга на запад в сторону Индийского субконтинента. Тщательное изучение ископаемой летописи из этого района показало, что сильные сезонные муссоны, которые отличают современный климат этой области, появились только после поднятия Гималаев и Тибетского плоскогорья.

ОХЛАЖДАЮЩАЯСЯ ЗЕМЛЯ

Мы уже видели, что различные индикаторы климата, такие как края листьев и содержание изотопов кислорода, показывают, что начиная с раннего эоцена, средние температуры на Земле все время понижаются (рис. 11.4). В конце концов на Земле стало настолько холодно, что в приполярных областях зимние снега стали лежать круглый год; Земля вошла в новый век оледенения. Такие периоды время от времени встречались в истории Земли, но все же довольно редко. Они оставляют ясный след в геологической летописи в форме отложений гравия, содранных льдом и отложенных вдоль краев ледника, или в виде ленточных глин, описанных в главе 4, или в виде ледниковых царапин и штрихов, сделанных в коренных породах при движении ледяных масс.

Кайнозойский ледниковый эпизод преобразовал ландшафт на большей части северного полушария. Косвенным образом он подарил нам одно из самых ценных полезных ископаемых — отложения песка и гравия. Он

также сформировал кое-где захватывающие дух пейзажи, а также породил мириады озер, которые усеивают северные области России, Европы, Канады и Соединенных Штатов. На ход эволюции в кайнозое — в частности, эволюции человека — сильно повлияли наступления и отступления полярных ледников. И несмотря на тот факт, что мы сейчас живем в межледниковую эпоху — временно теплый период, нет никаких причин подозревать, что текущий эпизод оледенения подошел к концу. Еще каких-нибудь 15 000 лет назад места, где сейчас располагаются многие современные североамериканские города, были погребены под мощной толщей льда, а в будущем продвижение в сторону экватора полярных ледяных шапок может покрыть их льдом снова. В следующей главе мы завершим наше путешествие по геологическому времени, рассмотрев, что думают современные ученые об оледенении, климатических изменениях, а также об истории и последствиях «плейстоценового» оледенения.

Глава 12

ВЕЛИКОЕ ОЛЕДЕНЕНИЕ

Пусть спорят жители Бомбея или Риада, но Земля в данное время находится в тисках оледенения. Верно, данный момент — это промежуток относительного потепления, межледниковый период, но в течение нескольких прошедших миллионов лет наша планета была, в среднем, холоднее, чем на протяжении большей части своей истории. Сегодня на ней существуют ледяные шапки около северного и южного полюсов размером с континент. Всего лишь в 300 километрах от экватора на горе Килиманджаро находится постоянный ледник пятикилометровой ширины. Причины периодических сильных похолоданий, которые переживала Земля, по-видимому, довольно сложны и еще не вполне ясны, несмотря на десятилетия изучения этого явления. Но детали самого последнего Ледяного Века, в котором мы и сейчас живем, становятся все более документированными. Такие явления, как колебания объема ледяной массы, изменения уровня океана, реакция растительности на суше на изменения климата и даже фактические температурные флуктуации за последние несколько миллионов лет — все это уже довольно хорошо известно. История, которую поведали нам эти данные, чрезвычайно увлекательна, и она вдвойне увлекательна, поскольку эволюция человека пришлась как раз на этот период и на нее сильно повлиял меняющийся климат. Геологическая летопись показывает, что местные и даже глобальные климатические

режимы иногда очень быстро изменялись на временных шкалах, коротких даже по человеческим стандартам. Это наводит на мысль, что малые изменения факторов, которые сами по себе кажутся не очень важными, могут путем взаимодействия с другими влияниями и в результате действия механизмов обратной связи вызвать значительные сдвиги в климате. Многие из таких внезапных сдвигов оказали хорошо документированные воздействия на развитие человеческой цивилизации. Даже без вызванных человеком изменений климата мы должны быть готовы к крупным изменениям его в будущем. По аналогии с предсказанием одного знаменитого американского банкира относительно биржевого курса акций, климат, по всей вероятности, будет колебаться.

РАСПОЗНАВАНИЕ ПЕРИОДОВ ОЛЕДЕНЕНИЯ

Интересно порассуждать на тему о том, можно ли было бы узнать об оледенениях континентального масштаба по страницам каменной летописи, если бы не сегодняшнее наличие на Земле многочисленных ледников. В начале девятнадцатого столетия некоторые европейские ученые поняли, что ледники, которые они могли исследовать в Альпах и других местах, когда-то в прошлом могли иметь гораздо большие размеры. Они пришли к этому заключению после того, как обратили внимание на то, что в районах, весьма отдаленных от современных ледников, встречаются отложения, очень похожие на те, которые можно наблюдать на краях активных ледников. В 1795 году Джеймс Хаттон, шотландский геолог, первый сформулировавший принцип актуализма, — печатно высказал предположение, что странные «эрратические» (случайно разбросанные) валуны окрестностей

Женсвы были, вероятно, принесены на свои нынешние места залегания и отложены там ледниками. Ближайшие к ним ледники находятся, как он писал, на расстоянии в десятки километров. (Хотя Хаттон этого не знал, но эти валуны были принесены с еще более удаленных ледников.) Но человеком, который более других ассоциируется с общим принятием идеи об оледенении континентального масштаба, является Луи Агассиз, швейцарский ученый, собравший информацию о ледниковых отложениях по всей Европе, а впоследствии и в Северной Америке. Скептик вначале, Агассиз убедился под давлением фактов, что значительная часть Северной Европы была в прошлом погребена под толстым покровом льда. Очень немногие из его современников согласились с этим — хуже того, несколько почтенных ученых того времени, давая — как им казалось — добрый совет сбившемуся с правильного пути молодому ученому, предложили ему вернуться к исследованиям ископаемых рыб, благодаря которым он уже успел заслужить репутацию первоклассного палеонтолога, прежде чем обратился к изучению ледников. Но Агассиз не отступил. Вместе со своим помощником он взбирался на неприступные горы, чтобы лучше видеть ледники, измерял скорость их движения, изучал морену (нагромождения гравия и валунов), отлагавшуюся на краях ледников. Собранные им факты оказались настолько убедительными, что в конце концов он одержал верх даже над сомневающимися. В 1847 году Агассиз переехал в Соединенные Штаты и стал там преподавателем в Гарвардском университете. Во время своих путешествий по северо-востоку этой страны он обнаружил множество признаков ледниковой активности. Агассиз страстно увлекся новой областью исследований. Он был прекрасным, полным воодушевления лектором и самоотверженным учителем, призывавшим своих студентов

учиться не только по книгам, но также и у природы, и хотя он продолжал работать и в области палеонтологи, но всеобщее внимание привлекли его популярные лекции о континентальных ледяных щитах. В знак признания его заслуг в этой области большое озеро ледникового происхождения, образовавшееся вдоль края отступавшего ледника около 12 000 лет назад, было названо озером Агассиз (рис. 12.3). Центр его располагался как раз в том месте, где сейчас находится озеро Виннипег, в канадской провинции Манитоба, и при своем наибольшем распространении оно занимало площадь, более чем в четыре раза превышавшую озеро Верхнее.

Работы Агассиза и других ученых показали, что Северная Европа, большая часть Великобритании, Канада и северная половина Соединенных Штатов были погребены под слоем льда толщиной в несколько *километров* в не слишком далеком геологическом прошлом (рис. 12.1). Эти первые исследователи не имели под рукой радиоактивных хронометров и других современных инструментов анализа, и они смогли прийти к заключению, что некогда на Земле был один грандиозный ледяной покров, вероятно, простирающийся от Северного полюса до обитаемых широт Европы и Северной Америки. Они указали на Гренландию как на аналог тех условий, которые они увидели в прошлом для окрестностей Эдинбурга или Монреаля. Сейчас мы знаем на основании деталей геологической летописи, что Ледяной Век прошлых нескольких миллионов лет был гораздо более сложным явлением. Мысль о том, что когда-то существовал единый ледяной щит, простирающийся на юг от полюса, была, конечно, неверной. На самом деле в Северном полушарии было много центров накопления льда в Северной Америке, Европе и Азии, от которых толща льда растекалась во всех направлениях. Мы знаем также, что происходили много-

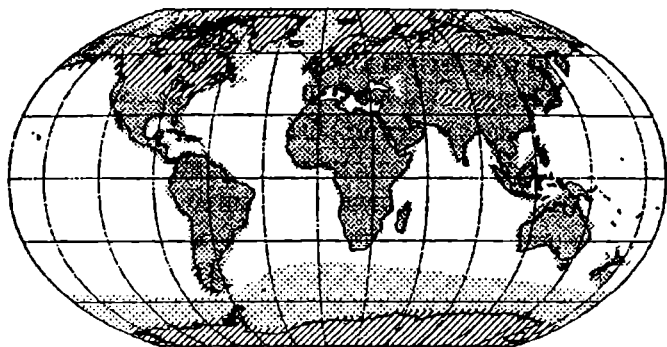


Рис. 12.1. Карта мира, на которой показана область максимального распространения льдов во время последнего оледенения. Протяженность суши за пределами современной береговой линии во время этого пика оледенения, когда уровень океана был на 120 метров ниже, чем теперь, показана серым тоном. Обратите внимание на мост суши между Азией и Северной Америкой. Толстый ледяной покров над континентами показан косой штриховкой, а ледяной покров над водой — точками.

численные наступления и отступления льда, причем через удивительно правильные интервалы, и что климат в высоких широтах колебался соответствующим образом — от близкого к теперешнему до крайне холодного. В северном полушарии растительные пояса — тундра на севере на границе со льдом, далее к югу — еловые леса, затем листопадные леса, шагающие по континентам то на север, то на юг, подобно многочисленным армиям, то наступающим, то отступающим по мере того, как в битве отступали или наступали ледники. Около экватора изменения были гораздо менее заметны, но в средних широтах они были поразительны. Самое последнее наступление ледников достигло своего максимума всего лишь около 20 000 лет назад. В это время льды простирались южнее Великих озер в Северной Америке и покрывали

Скандинавию, Северную Европу, отдельные части северной России и большую часть Великобритании. Почти треть всей современной суши была под покровом льда. Такие же условия могут возобладать в не слишком отдаленном будущем, поскольку если прошлое может служить проводником в будущее, то наш современный теплый период скоро закончится. Тем не менее, поскольку мы точно не знаем, что именно вызывает оледенение, эта возможность все еще остается в значительной степени умозрительной.

ЛЕДНИКОВАЯ ЛЕТОПИСЬ СУШИ

Как мы видели в предыдущей главе, содержание изотопов кислорода в морской воде зависит как от температуры океанов, так и от объема ледников на континентах. К счастью, как понижение температур, так и образование льда изменяют содержания изотопов в одном направлении, так что даже если оба этих воздействия нельзя разделить в деталях, время наступления ледниковых колебаний очень хорошо документируется. Внезапные изменения, которые произошли около 35 миллионов лет назад, близ границы эоцена с олигоценом, и снова в последние несколько миллионов лет (рис. 11.4), интерпретировались как отражение появления и быстрого роста полярных шапок в антарктическом и арктическом районах соответственно.

Лучше всего, конечно, документировано последнее оледенение в северном полушарии. Данные кислородно-изотопного анализа образцов из глубокого моря показывают, что оно началось уже всерьез около трех миллионов лет назад, и другие данные подтверждают этот вывод. Хотя геология ледниковых эпох уже давно имеет

горячих почитателей, только в течение нескольких последних десятилетий были привлечены очень широкие по масштабу и международные силы, чтобы подробно изучить те климатические изменения, которые произошли во время «Великого Ледяного века», и понять их причины. Если существует хоть какая-нибудь надежда предсказать будущий климат и пертурбации его, вносимые деятельностью людей, то очень важно для этого понять хотя бы недавнее прошлое.

Продолжая традицию своих предшественников, геологи, впервые начавшие изучать ледниковые отложения Европы и Северной Америки, пытались организовать свои наблюдения в виде геологических последовательностей. У них еще не было радиоактивных часов, появившихся в последующие годы, и им приходилось полагаться на корреляцию (сопоставление) разных характеристик ледниковых отложений от одной местности к другой, чтобы создать основу в виде относительной временной шкалы. В большинстве мест каждая фаза наступающих ледников стирала признаки предыдущего оледенения, но в некоторых местностях исследователи смогли найти повторяющиеся слои ледниковых отложений, между которыми они нашли почвы, развившиеся в течение свободных ото льда межледниковых эпох, чтобы затем оказаться снова погребенными под нагромождениями обломков, оставленных во время следующего наступления ледника. В Европе и Северной Америке подробная запись этих событий указывала, по-видимому, на существование в прошлом четырех или пяти отдельных периодов, когда льды покрывали большую часть северного полушария. Каждый из них был назван, согласно освященной временем геологической традиции, по местности, где соответствующий геологический разрез особенно хорошо сохранился. Однако в противоположность более

древним частям геологической временной шкалы, в Европе и Северной Америке были сохранены различные названия для, видимо, одних и тех же периодов времени — частично по той причине, что в ледниковых отложениях окаменелости встречаются редко и поэтому трудно было осуществить корреляцию отдельных эпизодов через всю Атлантику. В Северной Америке самое последнее наступление ледника названо Висконсинским оледенением; для большей части Европы одновременное с ним оледенение называется Вексельским. Оно началось около 130 тысяч лет назад, а конец его условно помещается на 10 000 лет назад, хотя, как показали данные кислородно-изотопного анализа (рис. 12.4), объем льда начал резко падать вскоре после ледникового максимума около 20 000 лет назад и продолжает уменьшаться вплоть до настоящего времени. Теперь мы знаем, что в течение современного Ледяного века было намного больше отдельных эпизодов наступания и отступления льда, чем четыре или пять, установленные первыми исследователями. По керну глубоководных скважин было установлено целых двадцать циклов. Этот керн, в отличие от ледниковых отложений на континентах, содержит практически непрерывную запись изменений климата на протяжении длинных периодов времени.

Выяснение последовательности последних нескольких наступлений и отступлений ледников на суше было трудным и кропотливым делом. Оно потребовало детального картирования отложений, оставленных ледниками, и поскольку, очевидно, было очень много местных вариаций поведения льдов — например, наступление в одном районе и одновременно отступление в другом, — не всегда легко, оказывается, коррелировать события на больших пространствах. Методика датирования, описанная в главе 6, оказала серьезную помощь, но даже и она не

является панацеей, поскольку самый полезный метод — датирование с помощью изотопа углерода 14 — ограничен возрастом около 50 000 лет, который охватывает менее половины последнего ледникового цикла. Что касается большинства других методов, то остается вечная проблема датировки по осадкам, описанная в главе 6: в ледниковых отложениях, как правило, отсутствуют компоненты, образовавшиеся во время выпадения осадка. Это значит, что показатели возраста, измеренные, скажем, для галек в ледниковой морене, не имеют ничего общего со временем оледенения, а представляют время образования материнской (коренной) породы. Но геологи — народ изобретательный, и ими был найден целый ряд других методов, позволяющих измерять возраст ледниковых образований. В западной части Соединенных Штатов вулканы Каскадного хребта (Каскэйд-Рэйндж), например гора Святой Елены, за последние несколько миллионов лет периодически извергались, и тучи пепла, выброшенные во время крупных извержений, оставляли тонкие слои в ледниковых отложениях всего Запада и Среднего Запада Соединенных Штатов. Эти прослои можно датировать с помощью обычных методов и даже проследить их до их материнских вулканов. Было также открыто, что та самая бомбардировка космическими лучами, которая образует в атмосфере углерод 14, достигает и земной поверхности, хотя и в более слабой форме, и образует радиоактивные изотопы в горных породах. Когда свежерасчищенная коренная порода выходит на дневной свет после погребения под толстым слоем льда, она подвергается облучению этим космическим излучением, и то количество радиоактивных изотопов, которое накапливается в таких образцах породы, является мерой времени, прошедшего после того, как порода освободилась от ледяного покрова. Впоследствии было разработано

несколько других более тонких методов датировки, в результате применения которых была построена точная хронология циклов оледенения.

Но что собой конкретно представляют те особенности каменной летописи, которые картируются и датируются, чтобы определить степень и время оледенения в далеком прошлом? Среди них наиболее распространены отложения продуктов разрушения пород ледниками, как, например, ледниковая морена, валунные глины и эрратические валуны — то, что можно наблюдать и сейчас около современных ледников. Эрратические валуны, как показывает их название, сложены горными породами, не имеющими никакого сходства с коренными породами данной местности, в которой они найдены, — например, большие обломки гранита в регионе, где встречаются только известняки. Первые наблюдатели, понимая, что такие валуны должны были иметь свой источник вдали от своего теперешнего местоположения, думали, что они были принесены водой во времена библейского потопа. Джеймс Хаттон, как уже указывалось, одним из первых предположил, что они были принесены ледниками. Валунная глина, или тиль, — это общий термин, обозначающий неотсортированную смесь обломков пород разного размера — от тонкозернистой почвы и глины до гравия и валунов, — принесенных и отложенных ледниками. Тиль очень распространен по всей северной Европе, северной части Соединенных Штатов и в Канаде и особенно там, где он был рассортирован водными потоками, является источником ценного побочного продукта ледников — песка и гравия, используемых в строительстве. Морена представляет собой тиль, нагроможденный в виде отчетливых насыпей, образовавшихся вдоль краев ледника. Их размеры позволяют представить себе огромность ледников: например, большая часть острова Лонг-Айленд

в Нью-Йорке сложена мореной. Эти созданные ледником насыпи определяют и приятный пологий рельеф местности, столь обычный в большей части района Великих озер в Северной Америке.

Большая часть тила, отложенного огромным континентальным ледяным щитом, происходит из весьма отдаленных источников. Ледники, медленно расплывающиеся во все стороны из регионов с максимальной толщиной ледяного покрова, соскребали по пути всю существовавшую тогда почву и даже часть коренных пород. Таща под собой гравий и обломки пород, они действовали наподобие гигантских листов наждачной бумаги, протягиваемых по местности, сглаживая рельеф в одних местах и подчеркивая его в других, где более мягкие породы были содраны и унесены, а более твердые остались на месте. Оставшиеся после такой обработки ледниковые царапины и штрихи все еще видны на обнаженных поверхностях твердых пород или в рельефе и в наши дни; их размеры колеблются от нескольких сантиметров до нескольких километров или даже больше. Используя аэрофотоснимки и спутниковые фотографии, геологи нанесли на карты ориентировку этих отметок и длинные насыпи моренных отложений, некоторые из которых протягиваются на сотни километров, чтобы выяснить направления течения льда и определить территории с наибольшей толщиной ледяного щита. Такого рода исследования показали, что существовало множество центров — даже в пределах одного континента, например Северной Америки. Когда в каждую межледниковую эпоху льды начинали таять и отступали к таким центрам, они оставляли после себя свой груз песка, гравия и «муки» из дробленых обломков пород и эрратических валунов, а многие местности, находившиеся до этого под покровом ледника, оказывались погребенными под слоем тила.

В качестве интересного примечания к изучению ледниковых тилей, или валунных глин, отметим, что в нескольких местах на территории Соединенных Штатов они, как оказалось, содержат алмазы. В штатах, расположенных непосредственно к югу от Великих Озер, близ южной границы распространения великих ледяных щитов, в ледниковых отложениях было найдено около восьмидесяти алмазов разного размера. Первые из них были открыты болсе ста лет назад и очень скоро был сделан вывод, что их принесли ледники откуда-то с севера. Алмазы образуются в глубинах Земли, на глубине 200 километров или более, и выносятся на поверхность вместе с редкими магматическими породами, называемыми кимберлитами. Существование алмазосодержащих тилей говорит о том, что где-то к северу от области Великих Озер существуют выходы кимберлитов — вероятно, поблизости от Гудзонова залива или залива Джеймса. Хотя с тех пор здесь были проведены тщательные поиски на большой территории, никаких признаков кимберлитов не было найдено. Так что где-то в Канадской тундре ждут своего открытия месторождения алмазов.

Лед — не особенно твердый материал, тем не менее трехкилометровая толща льда создает огромную нагрузку на земную кору. Подобно тому как удаление вещества путем эрозии с горных областей вызывает поднятие земной коры (см. об этом в главе 4), увеличение их веса заставляет кору погружаться. Поверхностные породы центральной Гренландии в наши дни грузом лежащей на них ледяной шапки опущены вниз до уровня моря. Плотность льда составляет приблизительно одну треть от плотности пород мантии, поэтому добавление трехкилометрового слоя льда к коре должно вызывать в качестве компенсации опускание ее приблизительно на один километр в нижележащую мантию. В действитель-

ности это воздействие может быть и не таким значительным, поскольку мантия, хотя и поддается, является очень вязкой. Поэтому реакция на изменение массы ледникового льда как при погружении, так и при всплывании будет медленной. Тем не менее в Скандинавии, в Северной Америке, вокруг Гудзонова залива, и в других областях с толстым ледяным покровом во время максимума накопления льда кора находилась под особенно большим давлением. По мере отступления льда во время нынешнего межледникового периода кора снова начала подниматься, но медленно. В некоторых местах это поднятие, связанное с отступлением ледника, все еще продолжается. Хотя по мере таяния больших ледниковых щитов уровень океана также быстро поднимался, в большинстве местностей суша освобождалась ото льда быстрее и продолжала подниматься даже после исчезновения льдов, часто образуя при этом ряд приподнятых террасообразно пляжей, прежних береговых линий, которые сейчас располагаются высоко над уровнем моря. Подобно другим характеристикам оледенения, эти бывшие береговые линии были тщательно нанесены на карту и прекрасно показывают, где находились места с наибольшей толщиной ледяного покрова, поскольку они представляют собой области наибольшего погружения, которые именно поэтому оказались наиболее приподнятыми над уровнем моря. Во многих случаях эти приподнятые берега были датированы с помощью изотопа углерод 14 и кусков дерева или другого органического материала, который был на них найден, и по этим данным оказалось возможным рассчитать скорость поднятия. Классическим примером, показанным на рис. 12.2, является Скандинавия. С помощью карт приподнятых берегов и других особенностей были построены овальной формы изолинии высоты

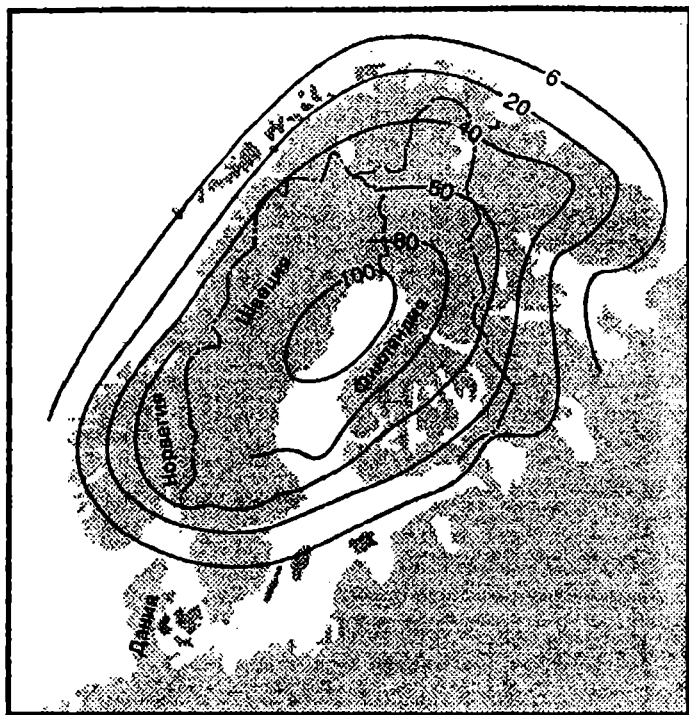


Рис. 12.2. Приподнятые над уровнем моря древние береговые линии и другие признаки указывают на то, что земная кора на территории Скандинавии значительно поднялась за счет таяния ледяного покрова после последнего ледового максимума. Изолинии показывают величину поднятия в метрах и ясно показывают области, где накопление льда было наибольшим. Приводится с изменениями по рисунку 19-30 из книги: Ф. Пресс и Р. Сивер. «Земля», 4-е изд. Изд-во «В. Х. Фримэн и Компания», 1986.

поднятия коры, которое произошло после таяния здесь всего льда, что произошло около 10 000 лет назад и все еще продолжается.

Заслуживают упоминания еще два дополнительных следствия самого последнего оледенения, которые

сформировали облик суши. Одним из них является широкое распространение лёсса — тонкозернистого, отложенного ветром осадка, который покрывает значительные части континентов, а вторым — странные ландшафты, указывающие на гигантские по масштабу наводнения.

Происхождение лёсса — задача сложная, но все отложения этого своеобразного осадка, которые были тщательно изучены, произошли, по-видимому, в периоды наибольшего похолодания. Некоторые лёссы представляют собой просто переотложенную ветром каменную муку из пород, раздробленных ледниками, другие имеют иное происхождение. Во время оледенений внутренние части континентов, расположенные в средних и даже низких широтах, были холоднее и более безводны, чем сейчас, и во многих случаях беднее растительностью. Системы ветров также были, вероятно, более мощными. В результате мы имеем более сильную эрозию и перенос больших количеств тонкозернистого материала. Мы знаем, что увеличение содержания пыли в атмосфере по своей интенсивности носило глобальный характер, поскольку исследование керна скважин, пробуренных во льду в Антарктиде и Гренландии, показало, что слои, соответствующие ледниковым максимумам, являются более «пыльными», чем другие части разреза скважин. Самые знаменитые лёссовые отложения встречаются в Китае, где служащие жилищами людей пещеры были вырезаны в толще лёсса мощностью в несколько сот метров. Детали флуктуаций тонкослоистой текстуры лёсса при ледниковом климате, очень похожие на текстуры глубоководных морских осадков, рассматриваются в следующем разделе.

По мере отступления ледяных щитов северного полушария после максимума Висконсинского оледенения

вдоль их южных окраин образовались озера талой воды, как, например, озеро Агассиз. Их сток постоянно изменялся по мере отступления льда (а иногда на короткое время и возобновляющегося наступления) и компенсационного поднятия коры в ответ на исчезновение ледников и образования новых русел рек, прорезывающих барьеры из коренных пород. Время от времени глубокие озера прорывались через естественные плотины или другие препятствия, находя себе новые русла для стока, результатом чего были катастрофические наводнения. Одно из таких событий образовало ледниковое озеро на территории нынешней восточной части штата Вашингтон на западе Соединенных Штатов. Здесь в промежуток от 16 до 12 тысяч лет назад большое озеро Миссула прошло через несколько циклов наполнения, прорыва ледяного барьера и излияния огромных масс воды на запад через базальты Колумбийского плато и в реку Колумбия. Во время этих событий мощные потоки прорыли каньоны в коренных породах, вырезали огромные котловины и оставили после себя формы рельефа, похожие на гигантскую рябь с «волнами» высотой свыше 5 метров, разделенными промежутками в 100 метров. Этот район, подвергшийся воздействию ледниковых наводнений, получил название Ченнэлд-Скэйблэндз (Channeled Scablands), что приблизительно означает «земля, изрытая каналами и покрытая струпами» — название, которое отражает уникальный характер рельефа. Его особенности долгое время ставили в тупик геологов, особенно тех, кто были до такой степени привержены идеям Хаттона об актуализме, что не были в состоянии понять периодически развивающиеся события катастрофического характера, формирующие ландшафт, но в конце концов их происхождение было разгадано. Впоследствии были открыты следы и других

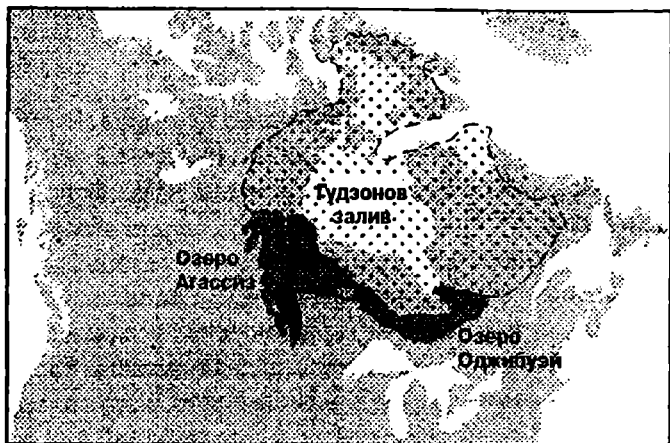


Рис. 12.3. Карта, показывающая расположение отступающего Северо-Американского ледяного щита (точечный узор), каким он был 8500 лет назад. Огромное сплошное озеро (темно-серый фон), включающее воды озера Агассиз и других более мелких озер, было подпружено вдоль южного края ледяного покрова. Около 8000 лет назад эти воды прорвали распадающийся ледник и влились в Северную Атлантику через Гудзонов залив. Расположение льдов и озера показаны на основе информации из книги А. Г. Дausона «Оледенение Земли». Изд. «Раутледж», 1992.

сверхнаводнений, связанных с отступлением ледовых шапок, как в Евразии, так и в Северной Америке. Вероятно, самое крупное из таких наводнений произошло около 8000 лет назад, когда озеро Агассиз, к тому времени соединившееся с другими озерами, располагавшимися вдоль края таявшего Канадского ледяного щита (рис. 12.3), внезапно прорвало ледяную преграду и вылилось на север в Гудзонов залив. Хотя скорость этого процесса неизвестна, объем вылившейся воды был огромен: по оценкам ученых, в результате этого наводнения уровень *всего Мирового океана* повысился на 20–40 сантиметров!

ХРОНИКИ ОЛЕДЕНЕНИЯ В ГЛУБОКОМ МОРЕ — И В САМОЙ ТОЛЩЕ ЛЬДА

Как уже отмечалось выше, именно в океанах сохранилась наиболее непрерывная хроника изменений климата в ледниковый период. Даже в тропиках, вдали от прямого влияния полярных ледяных шапок, осадки обнаруживают особенности, которые тесно связаны с циклами наступления и отступления ледников. В сущности, только после того, как длинные керны морских осадков стали доступными для исследования, стало возможным расшифровать истинные подробности Великого Ледяного века. Хотя в этих осадках заключено много указаний на изменения ледникового климата, пожалуй, наиболее ценным признаком является хроника кислородно-изотопного состава морской воды.

Живущие в океане организмы, строящие свои раковины из карбоната кальция, запечатлевают в изотопном составе кислорода особенности окружающей их морской воды, тем самым регистрируя сигнал, отражающий как температуру воды, так и количество воды, которое было связано ледниковыми льдами. Графики, подобные приведенному на рис. 11.4, показывают, что последние несколько миллионов лет были временем постоянного уменьшения как объема Мирового океана, так и его температуры. Но в то же время, как видно из графика на рис. 12.4, хроника событий оказывается гораздо более сложной, если горизонтальный масштаб растянуть, чтобы увидеть подробности последних нескольких сотен лет.

В этом рисунке есть несколько интересных особенностей. Первой из них является закономерность: содержание изотопов кислорода в воде в последние полмиллиона лет повторяется удивительно систематическим образом, отражая существование циклов наступания и отступления

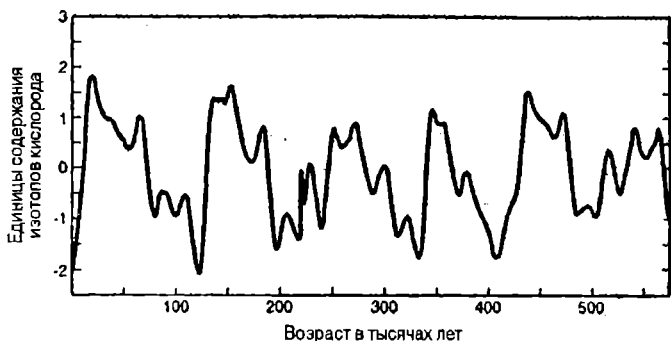


Рис. 12.4. Регулярные изменения изотопного состава кислорода в раковинах донных организмов отражают изменения температуры океана и объема льда за последние 600 000 лет. Положительные значения на этом графике соответствуют холодным, ледниковым периодам, а отрицательные — межледниковым эпохам. Фактические данные, полученные из кернов глубоководных скважин, позволяют продлить график влево гораздо дальше, чем показано здесь, и свидетельствуют о существовании в прошлом многочисленных дополнительных ледниково-межледниковых флуктуаций.

льдов. Здесь показано только пять ледниковых периодов, но если этот график продлить в прошлое до почти трех миллионов лет, то оказывается, что характер графика сохраняется. Он указывает на существование периодического чередования холодных и теплых периодов. Длина (продолжительность) циклов, показанных на рис. 12.4, составляет по грубой оценке 100 000 лет. Для более древних частей графика эти циклы оказываются несколько короче, но несмотря на это, очевидно, что какой-то фактор очень регулярно влияет на климат Земли. Есть определенный ритм в последовательности ледниковых периодов, который должен управляться влиянием какого-то фактора, который изменяется сходным образом. Насколько сейчас известно науке, единственное

объяснение, которое кажется приемлемым, состоит в том, что эта причина находится вне Земли и, вероятно, связана с колебаниями количества энергии, получаемой Землей от Солнца.

Второе важное наблюдение, которое можно сделать, рассматривая рис. 12.4, состоит в том, что последние пять похолоданий были значительно длиннее по своей продолжительности, чем межледниковые эпохи, и что начало теплых периодов обычно очень резко следовало за временем наибольшего распространения льда. Если современный нам межледниковый промежуток следует закономерности последних нескольких таких интервалов, нам не придется долго ждать следующего ухудшения климата, несмотря на тот факт, что Висконсинский ледниковый максимум произошел всего лишь 20 000 лет назад. Причины внезапного начала и короткой продолжительности межледниковых эпох неизвестны.

Вплоть до этого момента в нашем обсуждении проблем чередования оледенений и потеплений принималось, что изменения содержания изотопов кислорода надежно документируют изменения средней мировой температуры и величины площади ледников. Но так ли это? Есть ли какой-нибудь способ независимой проверки этого утверждения? Один из самых убедительных примеров подтверждающих данных происходит из, казалось бы, невероятного источника — тропических кораллов. Коралловые рифы растут очень близко к поверхности моря. Если уровень моря поднимется на несколько метров, то кораллы умрут — но поверх них, ближе к поверхности воды, растут все новые и новые. Путем непрерывного нарастания все выше и выше рост рифов идет в ногу с подъемом уровня моря, поэтому кораллы являются хорошим индикатором прошлых уровней моря. В некоторых местах, например в Карибском море, такие коралловые

риффы были разбурены скважинами и их керн изучен. С помощью радиоуглеродного и ряда других методов был определен возраст разных частей керна. Кораллы, жившие близ поверхности моря тысячи лет назад, сейчас находятся на глубине в десятки метров, погребенные в рифе под толщей своих потомков. Измеряя их возраст и глубину, на которой они сейчас находятся, можно построить график зависимости их возраста от глубины (рис. 12.5). Он показывает, что самый последний момент низкого уровня моря совпадает со временем ледникового максимума, определяемого по данным изотопно-кислородного анализа, что соответствует возрасту около 20 000 лет. Он также показывает, что за последние 20 000 лет было два или три раза, когда уровень моря поднимался очень резко, почти мгновенно в геологическом масштабе, вероятно, в ответ на особенно быстрое таяние ледяных щитов. За последние 20 000 лет океаны поднялись более чем на 110 метров, покрыв очень обширные области, бывшие сушей в периоды максимальных похолоданий.

Хотя изменение содержания изотопов кислорода в морской воде в прошлом дали, вероятно, самую подробную информацию о смене ледниковых циклов, чем любой другой ряд фактов, они все же не являются единственным указателем, содержащимся в океанических осадках. Ископаемая летопись планктона, например, показывает, что — как и следовало ожидать — интервал времени, в течение которого существовали тепловодные виды, во время наступания ледников сокращался, а в межледниковые эпохи расширялся. Некоторые виды, менее выносливые по отношению к низким температурам, во время ледниковых периодов вымирали. Зерна пыльцы растений, приносимые в океаны реками и ветром и сохранившиеся в осадках, также содержат богатую информацию о климатических условиях во время ледниковых

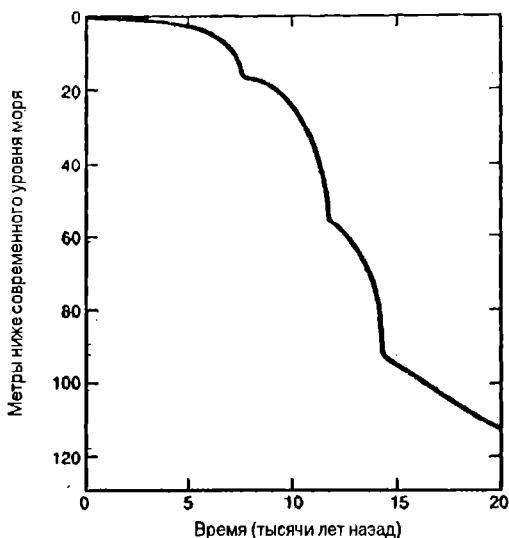


Рис. 12.5. За последние 20 000 лет за счет таяния континентальных льдов уровень моря поднялся почти на 120 метров. Этот график, построенный на основе изучения ныне находящихся под водой кораллов, показывает, что во время подъема уровня моря было по крайней мере три периода времени, когда подъем происходил очень быстро — около 14 000 лет назад, 11 500 лет назад и снова около 7600 лет назад. Таяние ледяных шапок Гренландии и Антарктиды подняло бы уровень моря еще на 65 или 70 метров. Приводится с изменениями по рисунку 3 из статьи П. Бланшона и Дж. Шоу в журнале «Джиолоджи», том 23, стр. 5. Геологическое общество Америки, 1995.

циклов. Изучение пылицы, сохранившейся в керне из отложений вдоль западных берегов Северной Америки и в других местах, показывает, что состав растительности в каждой конкретной местности изменялся в ногу с циклами, определяемыми по изотопам кислорода. Взятые в совокупности, эти различные количественные признаки, характеризующие морские осадки, дали гораздо более ясную картину колебаний климата в течение Великого Ледяного века, чем можно было представить из данных,

полученных только на суше. А совсем недавно к арсеналу средств исследования оледенений добавился новый источник данных — сам лед. Как в Антарктиде, так и в Гренландии в самой ледниковой шапке были пробурены глубокие скважины. Даже в очень холодной Антарктиде резкие колебания температуры между зимой и летом достаточны, чтобы в накапливающемся льду возникали годовичные слои, так что керн, взятый с разных глубин, может быть датирован очень точно, путем мучительно-затрудненного подсчитывания этих слоев. Самые глубокие скважины, пробуренные во льду, охватывают два цикла оледенения до времени около 250 000 тысяч лет назад. Определение содержания изотопов кислорода в керне является дополнительным методом по отношению к замерам в морской воде. Кроме того, ледяной керн содержит и другую информацию, которую нельзя получить по данным отложений. Мы уже упоминали данные о «запыленности» атмосферы, но, возможно, самый ценный метод состоит в прямом определении состава атмосферы. При нарастании слоев льда последний захватывает крошечные пузырьки воздуха и путем тщательного извлечения его из образцов керна скважин геохимии могут реконструировать колебания состава атмосферы в прошлом. Одним из особенно интересных результатов этих исследований является наблюдение, показывающее, что в прошлом происходили флуктуации концентраций двух парниковых газов — углекислого газа и метана, которые, возможно, влияли на флуктуации температуры. Концентрация этих газов систематически колебалась в соответствии с циклами вариаций содержания изотопов кислорода, причем их концентрация в атмосфере была гораздо ниже средней в холодные периоды и выше во время межледниковых. Являются ли они причиной или следствием — об этом все еще горячо спорят.

ЧТО ВЫЗЫВАЕТ ГЛОБАЛЬНЫЕ ОЛЕДЕНЕНИЯ?

Знай мы ответ на этот вопрос хоть сколько-нибудь точно, многим ученым, работающим сейчас над его решением, пришлось бы сосредоточить свою творческую энергию на других проблемах. Говоря откровенно, в настоящее время достигнуто довольно хорошее понимание относительно общего комплекса условий, которые необходимы или, по крайней мере, достаточны, чтобы ввергнуть Землю в новое оледенение. Что менее ясно, так это природа явления, которое играло роль спускового крючка, заставлявшего Землю с такой регулярностью метаться между теплыми и холодными периодами на протяжении последних нескольких миллионов лет. Нет недостатка в идеях по этому вопросу, но ни один единый механизм так и не появился в качестве общего фаворита. Но что представляется очевидным в результате накапливающихся данных, так это то, что должен существовать ряд сложных взаимодействий и обратных связей среди нескольких различных факторов, каждый из которых в отдельности не в состоянии запустить наблюдаемые явления, работая же в согласии, весь этот комплекс факторов может. Не так уж много вариаций факторов требуется, чтобы нарушить равновесие. В глобальном масштабе различия между температурами ледниковых и неледниковых эпох могут составлять только несколько градусов Цельсия, самое большее — десять.

Одной из особенностей оледенения, которую давно поняли, но которая после открытия тектоники плит приобрела большое значение, является тот факт, что полярные ледяные шапки не могут образоваться в открытом море. Даже если другие факторы вызывают охлаждение планеты, все же крупномасштабное оледенение может начаться только при наличии какой-нибудь суши в высоких

широтах. То обстоятельство, что крупный Антарктический континент располагается как раз вокруг южного полюса, является, без сомнения, причиной того, что нынешняя ледяная шапка вокруг Южного полюса образовалась раньше, чем аналогичная шапка северного полушария, и сохраняется в качестве крупной географической структуры даже в течение теплых межледниковых эпох вроде современной. Для всех других эпох прошлого всякий раз, когда обнаруживаются признаки обширного оледенения, реконструкции расположения континентов неизменно показывают наличие больших массивов суши близ полюсов. Например, все южные континенты, которые были когда-то частями Гондваны — Индия, Австралия, Антарктида и Южная Америка, — содержат отложения ледникового тила (валунной глины), в них найдены ледниковые шрамы в коренных породах и другие признаки ледяного покрова, относящегося к позднему палеозою, то есть между 250 и 300 миллионами лет. Именно в это время Гондвана располагалась над Южным полюсом.

Таким образом, для начала Ледникового века необходимо наличие континента в высоких широтах, но столь же необходимы еще два фактора — обильные снегопады и низкая температура, особенно летом. Парадоксально, но первое из этих условий требует умеренно теплых океанских вод, по крайней мере в средних широтах, чтобы обеспечить испарение и поступление атмосферной влаги для осаджения в полярных районах. Как уже упоминалось в главе 11, одна из гипотез, выдвинутых для объяснения начала оледенения в северном полушарии, утверждает, что образование Панамского перешейка около трех миллионов лет назад отвело теплые воды Атлантического океана к северу и увеличило осадки в восточной Канаде, Гренландии и Скандинавии — трех из числа главных центров мощных накоплений льда. Но даже

участившиеся снегопады не смогли бы запустить механизм глобального оледенения, если бы весь накапливающийся лед стаивал бы летом. Температура должна была быть достаточно низкой, чтобы происходило накопление ледовой массы.

Средние температуры любой местности на поверхности Земли контролируются множеством факторов, но в глобальном масштабе важными факторами являются, во-первых, сколько энергии Земля получает от Солнца, а во-вторых, сколько ее задерживается океанами и атмосферой и не излучается обратно в космос. Задолго до того, как стало известно, что Земля переживала регулярно повторяющиеся периоды наступления и отступления ледников, математики и астрономы показали, что количество энергии, получаемой от Солнца в каждой конкретной местности, должно было в прошлом колебаться закономерным образом в результате воздействия некоторых особенностей вращения Земли по орбите. Разработку астрономической теории оледенения принято приписывать Милутину Миланковичу, югославскому математику, жившему в 1879–1958 годах. И действительно, он детально развил эти идеи и изложил их в современной форме. Но еще до работ Миланковича другие исследователи высказывали предположение, что оледенения могли быть результатом орбитальных изменений, вызывавшим уменьшение количества падающей на Землю солнечной энергии. Вероятно, самым выдающимся из них был шотландский интеллектual Джеймс Кролл, который впервые опубликовал свои идеи в 1864 году. О Кролле рассказывают интересную историю: когда появилась в печати его статья об оледенении, этот человек-самоучка работал швейцаром. Это была одна из его нескольких профессий, которые он использовал, когда работал или писал по ряду тем. В конце концов его талант был при-

знан и он был направлен на работу в Геологическую службу Шотландии, но по мере того как шло время, его идеи о Великом Ледниковом веке пользовались все меньшим и меньшим доверием. Против него выдвигались разнообразные возражения, в первую очередь тот факт, что изменения получаемой Землей солнечной энергии, вызванные орбитальными вариациями, казались слишком малыми, чтобы объяснить значительные климатические изменения.

Спустя долгое время после смерти Кролла, когда его идеи были почти забыты, Миланкович начал свои математические исследования орбитальных вариаций Земли и их влияния на климат. Его первая работа была опубликована в 1920-х годах, причем все его вычисления были проделаны вручную — жуткая работа. Миланкович кропотливо рассчитал вариации количества солнечной энергии, получаемой Землей в северном полушарии за последние 650 000 лет. В своих вычислениях он (а после него и другие исследователи) принимал, что мощность солнечного излучения в течение этого периода оставалась постоянной. Этот аспект теории Миланковича стал предметом споров, поскольку даже малые изменения солнечного энергопроизводства могли бы иметь значительные последствия для Земли. Но даже при постоянной мощности солнечного излучения Миланковичу пришлось рассмотреть три различных механизма, благодаря которым количество падающей на Землю энергии могло колебаться: во-первых, мелкие регулярные изменения угла наклона земной оси относительно плоскости орбиты; во-вторых, незначительные изменения формы земной орбиты, которые приближают или удаляют Землю от Солнца в крайних точках орбиты; и в-третьих, медленное вращение земной орбиты, которое постепенно сдвигает время нашего наибольшего приближения к Солнцу с

зимы на лето и обратно. Все эти вариации действуют в разных масштабах времени, то усиливая, то ослабляя друг друга, но главное — это то, что они действуют регулярно. Как и более ранняя работа Кролла, вычисления Миланковича вызвали сильное волнение при своей первой публикации, после чего последовал шквал работ, пытающихся связать известные ледниковые отложения с циклами Миланковича. Однако, следуя судьбе идей Кролла, работа Миланковича несколько потускнела по мере выдвижения против нее ряда возражений. Но эта ситуация резко изменилась, когда геологи получили возможность собирать и исследовать керны глубоких скважин, пробуренных в дне океанов. Как мы видели выше, осадки, отложившиеся в море за несколько миллионов лет, содержат удивительно регулярные вариации целого ряда характеристик, которые оказались связанными с циклами оледенения.

В последние годы вычисления Миланковича были повторно выполнены с помощью компьютера. Это позволило внести в них ряд уточнений, но главные его результаты остаются теми же. И хотя остается возражение, что изменения получаемой от Солнца энергии, обусловленные этими циклами, сами по себе недостаточно велики, чтобы запустить или привести к концу периоды оледенения, тот факт, что математическое моделирование климатов прошлого, которое включает вычисленные Миланковичем вариации, довольно хорошо согласуется с реальными фактическими данными, убедило большинство ученых, работающих в этой области, что астрономические факторы каким-то образом все же работают, может быть, действуя в качестве спускового механизма, могущественной соломинки, которая ломает верблюду спину, когда все остальные факторы действуют совместно в одном направлении.

Циклы Миланковича показывают, как солнечная энергия, получаемая Землей, изменялась во времени, но сколько этой энергии удерживалось? Этот вопрос оказался даже более сложной задачей, чем вычисление орбитальных вариаций, поскольку решение ее зависит, среди прочих факторов, от распределения суши и моря, от характера поверхности суши и от состава атмосферы. Например, морская вода поглощает большую часть получаемой солнечной энергии, но лед или пустыни отражают значительную часть ее. Поэтому континентальные ледяные шапки создают положительную обратную связь, отражая солнечную энергию и еще больше охлаждая планету уже одним своим наличием. Но если ледяные шапки появляются в высоких широтах, где количество падающей солнечной энергии на единицу площади в данном месте гораздо меньше, чем в тропиках, то таким образом охлаждающее действие расположенных в высоких широтах ледников может быть нейтрализовано распределением суши при обширных океанах и небольшим числом континентов на низких широтах. Однако изменения распределения континентов относительно полюсов происходят очень медленно, и хотя они должны влиять на чувствительность Земли к вариациям других параметров, они не могут объяснить быстрые колебания между условиями ледниковых и межледниковых эпох Великого Ледникового века.

С другой стороны, состав атмосферы подвергается существенным изменениям за короткие промежутки времени. Анализ пузырьков воздуха, захваченных льдами из Гренландии и Антарктиды, как уже указывалось, показал, что во время ледниковых циклов содержание как углекислого газа, так и метана в атмосфере изменялось в ногу с климатом. Оба эти парниковых газа задерживают тепло, которое излучает Земля, и не дают ему уходить

в космос, а керны, полученные из льда, показывают, что содержание обоих этих газов в теплые периоды увеличивается, а в холодные уменьшается. Однако внимательный анализ времени наступления этих изменений показывает, что в большинстве циклов они, по-видимому, следуют за изменениями температуры с некоторым запазданием. Если запаздывание будет подтверждено дополнительными исследованиями, то это будет означать, что они являются, скорее, результатом ледниковых циклов, а не их причиной. Но даже если это и так, то они должны были усиливать флуктуации температуры, при этом более высокие концентрации парниковых газов должны были поддерживать Землю несколько более теплой в межледниковые эпохи, а более низкие концентрации способствовали дальнейшему охлаждению в эпохи похолоданий.

Даже из этого краткого изложения должно быть ясно, что на вопрос: что вызывает глобальное оледенение? — имеется много возможных ответов. Ввиду столь большого количества действующих факторов, причем каждый из которых взаимодействует с другими, появление мощных быстродействующих компьютеров оказалось настоящим благодеянием для исследований климата ледниковых эпох. С их помощью оказалось возможным промоделировать, как климатические условия должны отвечать на различные количества углекислого газа в атмосфере, различные расположения континентов относительно полюсов, на различные части циклов Миланковича и множество других потенциально важных факторов. Научная литература включает множество статей, обсуждающих модели общей циркуляции (General Circulation Models), или GCM, как их называют посвященные, с помощью которых можно предсказать распределение температур, направления ветров и многие другие клима-

тические особенности для различных возможных сочетаний условий в прошлом. Много полезных догадок было высказано на основании математических моделей, разработанных для этих разных предположений. Тем не менее, как и при долговременных метеорологических прогнозах, все они очень чувствительны к незначительным вариациям входных данных, и основанные на них предсказания точны лишь в той степени, в какой создатели моделей учитывают взаимодействие всех параметров задачи. В конечном счете эталоном, по отношению к которому следует оценивать эти теоретические построения, должна быть информация, получаемая от самой Земли, природные записи в горных породах, отражающие фактические изменения климата в прошлом.

КЛИМАТ ЭПОХ ОЛЕДЕНЕНИЯ, ЭВОЛЮЦИЯ ЧЕЛОВЕКА И НАЧАЛО РАЗВИТИЯ ЦИВИЛИЗАЦИИ

Древнейшие из известных ископаемые остатки гоминид (гоминиды — это род, к которому принадлежит и наш вид — *Ното*, то есть человек) имеют возраст почти 4,4 миллиона лет. Они найдены в Эфиопии в тесной связи с отложениями вулканического пепла, которые можно датировать очень точно, поэтому их возраст можно считать хорошо установленным. Очень вероятно, что это наши прямые предки.

Около 800 000 лет после этих ранних гоминид в местности, которая сейчас называется Танзанией, почти в 2000 километров от места находки эфиопских окаменелостей, начало формироваться замечательное скопление ископаемых остатков совершенно другого характера. Здесь в результате серии вулканических извержений вся

местность оказалась покрыта слой за слоем тончайшим вулканическим пеплом. После дождей этот пепел в поверхностном слое походил на разведенный цемент, и всякое существо, которое передвигалось по нему, оставляло следы, создавая тем самым живую запись о жизни животных, процветавшей в этой части Африки. Но кроме следов всевозможных животных — от кролика до слона, здесь, на этом моментальном снимке, сделанном природой более трех с половиной миллионов лет назад, было обнаружено кое-что еще, а именно следы группы гоминид, пересекших это место. Вероятнее всего, существа, оставившие эти следы, были очень похожи на те, которые представлены древнейшими эфиопскими окаменелостями. Некоторые ученые, изучавшие эти окаменевшие следы, считают, что они были оставлены семейной группой — мама, папа и сынок, но, может быть, более важно то, что отпечатки указывают на то, что эти гоминиды ходили на двух ногах, совсем как современные люди. Таким образом, около четырех миллионов лет назад или раньше наши предки спустились с деревьев тропических лесов Африки и распространились в травяных равнинах, освоив вертикальную походку. Многие палеонтологи считают, что этот переход был подсказан постепенно увеличивающейся засушливостью климата, которая наступала в Африке по мере охлаждения глобального климата, уменьшив площадь лесов и увеличив распространение степей. Тем не менее настоящие трудности существования в условиях Великого Ледникового века еще только ждали наших предков, хотя, возможно, они не так ощущались в тропиках, как в высоких широтах.

Австралопитеки, как называются сейчас существа, оставившие упомянутые выше эфиопские окаменелости (и другие подобные им гоминиды), обладали маленьким мозгом. Хотя они и были двуногими, они все

же не были очень ловкими существами. И тем не менее они просуществовали несколько миллионов лет, причем часть этого времени они жили параллельно с нашим видом. Человек (*Ното*) впервые выходит на сцену в Африке среди ископаемых остатков других гоминид около двух миллионов лет назад. Приблизительно в это же время в осадках появляются обработанные каменные орудия. Одной из главных отличительных особенностей новых гоминид был их большой мозг — по крайней мере, по сравнению с любым из представителей вида австралопитеков, который предшествовал им. Почему *Ното* появился именно в это время и почему его мозг стал больше, чем у ранних гоминид? Не существует определенного, общепринятого и согласованного ответа на этот вопрос, но есть много гипотез. Одна из них предполагает, что совпадение между появлением *Ното* и началом оледенения в северном полушарии не случайно. Согласно этому взгляду, изменение климата, особенно чередование долгих ледниковых и коротких межледниковых эпох благоприятствовало животным, обладавшим способностью приспосабливаться к изменениям, индивидам, обладавшим изобретательностью и умом. В Африке эпизоды оледенения отличались холодным и сухим климатом; жизнь в это время была труднее, чем во время теплых и относительно более влажных межледниковых периодов. Правильна или нет эта интерпретация, неизвестно. Но самые крупные изменения среды обитания, сопровождавшие циклы холодного и теплого климата, которые регулярно сменяли друг друга на протяжении нескольких последних миллионов лет, должны были сыграть свою роль в усилении миграции и изоляции отдельных групп как *Ното*, так и других животных. Быстрая эволюция новых видов и подвидов, явная среди млекопитающих

в целом, и уж конечно для рода *Homo*, была неизбежным результатом.

Приблизительно миллион лет назад один из видов *Homo*, а именно *Homo erectus* (человек прямоходящий), переселился из Африки в Европу и Азию. Остатки предков человека встречаются очень редко, и антропологи и палеонтологи пережили трудные времена, пытаясь установить генеалогию современных людей, но все же известно, что около 100 000 лет назад, в начале самого последнего эпизода оледенения, в Европе и на Среднем Востоке жила группа представителей *Homo sapiens* (человек разумный), известных под названием неандертальцы. Несмотря на появившийся в наше время образ неандертальца как тупоумного пещерного жителя с дубиной в руке, эти люди имели большой мозг — такой же величины, как и наш, вели общественный образ жизни и, по-видимому, были довольно разумны. В Европе они жили в условиях климата, все более и более ухудшавшегося в сторону самого холодного ледникового периода. И все же неандертальцы исчезли из ископаемой летописи около 30 000 лет назад и их сменили уже, по существу, современного типа люди, названные кроманьонцами. Эти люди появились в Африке на десятки тысяч лет раньше, проникли в Европу около 45 000 лет назад и некоторое время сосуществовали с неандертальцами. В противоположность неандертальцам они, по-видимому, шили себе одежду, делали хотя бы грубые укрытия и были, вероятно, лучше оснащены для жизни в условиях сурового климата. Они первыми испытали на себе холод Европы периода оледенения, а также оставили после себя прекрасные памятники пещерной живописи, которые представляют нам подлинный облик некоторых ныне вымерших животных, которые оживляли ледниковый ландшафт, как, например, огромные, мохнатые, вооруженные изогнутыми бивнями мамонты.

Помимо самого климата, важным фактором, влиявшим на людей, были связанные с оледенением колебания уровня моря, сопровождавшие ледниковые циклы. В результате сильного понижения уровня моря во время Висконсинского ледникового максимума оказались обнаженными обширные области континентов, которые сейчас покрыты водой. В некоторых местах по ним проходили маршруты миграции древних людей, а также животных. Австралия и Новая Гвинея были связаны сушей. Большая часть Индонезии была доступна существам, передвигающимся на ногах или посредством очень коротких путешествий по воде, и *Homo sapiens* мигрировал туда из Азии. По-видимому, наиболее известным результатом понижения уровня моря во время последнего ледникового максимума явилось заселение людьми Америки. Еще 20–30 тысяч лет назад было возможно пройти пешком из Северной Азии на Аляску. Через сухопутный мост, бывший тогда на месте Берингова пролива, в Северную Америку мигрировали мамонты и другие крупные животные, а около пика Висконсинского оледенения за ними последовали и любопытные представители сибирских племен. Хотя большая часть восточной Сибири и Аляски была свободна ото льда, остальная часть Северной Америки была покрыта ледниками, которые блокировали новым иммигрантам путь на восток или на юг, пока климат не сменился на современный межледниковый и льды не стали отступать. В науке до сих пор еще продолжаются споры относительно точной хронологии этих миграций, но общепринято считать, что по мере повышения температуры стал открываться коридор между ледниками Скалистых гор на западе и ледниковыми щитами, отступавшими в сторону Гудзонова залива, на востоке, тем самым сделав возможной миграцию на юг, в страны с более теплым климатом. Мы хорошо знаем,

что уже 12 000 лет назад в юго-западной части Соединенных Штатов жили люди, а к 10 000 лет назад они проникли и в Южную Америку.

Хотя наши прямые предки очень страдали от тягот в течение Висконсинского оледенения, знакомая нам человеческая цивилизация зародилась и развилась во время последующего межледникового эпизода, в котором мы сейчас живем. Но даже если это и так, все же климат его не был столь устойчивым и ровным, как мы его представляем, исходя из опыта нашей собственной короткой жизни. Со все возрастающей — по мере приближения к нашему времени — детальностью палеоклиматологи составили впечатляющую хронику изменений климата за последние несколько тысяч лет, используя для этого самые разнообразные данные — от писанных исторических хроник до толщины древесных колец в древних деревьях. В результате этих исследований больше нет никаких сомнений, что в течение этого времени происходили сильные флуктуации как региональных, так и локальных климатических условий. Предметом яростных споров является масштаб влияния, которое эти изменения оказали на ход развития цивилизации. Проблема здесь та же, которая встает перед исследователями вымираний, происходивших в далеком геологическом прошлом, а именно выяснение связи между причиной и следствием.

Мы знаем, что даже местные и короткие во времени колебания климата оказывают сильное давление на человеческие популяции, — вспомним, например, засушливые районы центральной части Соединенных Штатов (так называемая *dust bowl*, то есть «чаша с пылью»), где засуха 1930-х годов наряду с несовершенной практикой сельского хозяйства вызвали экономическое бедствие и в конце концов вынудили тысячи оклахомцев переселиться в Калифорнию. Этот эпизод американской

истории обессмертил Джон Стейнбек в своем романе «Гроздь гнева». Но еще более крупные изменения климата постоянно воздействовали на планету с начала цивилизации. Мы можем здесь лишь слегка коснуться некоторых из них.

Общепринято считать началом человеческой цивилизации возникновение земледелия. Согласно этому определению, цивилизация началась как в Старом, так и в Новом свете приблизительно в одно время. Имеющиеся данные показывают, что около 6000–7000 лет назад на Среднем Востоке стали одомашнивать овец и выращивать злаки. Приблизительно в это же время жители южной Мексики стали выращивать кукурузу. Климатические исследования показывают, что это время было климатическим оптимумом нашей современной межледниковой эпохи: среднегодовая глобальная температура была значительно выше, чем теперь, количество дождей осадков почти повсюду на Земле было выше, чем сегодня. Фактически нет никаких данных, свидетельствующих о существовании в это время *каких-либо* пустынь. Что это — еще одно совпадение или же существует связь между этим благоприятным климатом и возникновением цивилизации?

Несколько тысяч лет спустя после этого климатического оптимума, около 4200 лет назад, цветущая, энергично разраставшаяся цивилизация — Аккадское царство, проникшая уже на Средний Восток, приблизительно между современной Турцией и Персидским заливом, внезапно пала. В ее северных областях наступил быстрый упадок земледелия. Согласно записям на глиняных табличках, найденных археологами, значительная часть населения мигрировала в южные города империи вдоль рек Тигр и Евфрат; в результате их переполнения беженцами возник кризис, аналогичный сегодняшним, когда

массы переселенцев отягчают бюджет современных правительств. В течение десятилетий археологи ломали головы, пытаясь выяснить причины этих явлений. Исследования последних лет показывают, что начало этого кризиса совпало с признаками внезапной засухи в северных областях Аккадского царства, которая продолжалась около 300 лет. Такое изменение климата могло бы объяснить хорошо подтвержденные документами миграции, поскольку население северных областей, зависящих от земледелия, не могло существовать без регулярно выпадающих дождей и не имело развитой ирригационной системы. На юге же Тигр и Евфрат обеспечивали гораздо более устойчивое водоснабжение.

Трудно точно определить причину упомянутого выше изменения климата, которое, очевидно, повлияло на падение Аккадского царства; во всяком случае, некоторые историки возражали против утверждения, что одного только ухудшения климата достаточно, чтобы объяснить быструю гибель этой цивилизации. Но ближе к нашему времени мы имеем лучше подтвержденные документами доказательства резкого климатического изменения и его влияния на жизнь людей. Чуть более 1100 лет назад, к концу девятого века, климат в Северном Атлантическом регионе потеплел и оставался сравнительно мягким в течение около 300 лет. Климатологи окрестили этот период «малым оптимумом». Помимо исторических хроник (которые лишь изредка упоминают подробности, касающиеся климата), вариации содержания изотопов кислорода, определенные по годам в керне скважин, пробуренных в гренландском ледяном покрове, подтверждают, что в это время действительно наблюдался теплый промежуток времени. Именно в этот период викинги, отважные норвежские мореплаватели, заселили отдельные части Гренландии. Оттуда по сравнительно свободным

ото льда водам северной части Атлантического океана они отправились на запад и достигли Северной Америки. На острове Ньюфаундленд существует хорошо сохранившееся, а сейчас и восстановленное поселение викингов, относящееся к 1000 году, которое, вероятно, и есть та страна, которую саги викингов называют Винланд. Но викинги недолго оставались в Северной Америке: помимо прочих трудностей, им пришлось конкурировать с местными американцами, которые прибыли на континент за тысячи лет до них, и не из Европы, а из Сибири.

К концу четырнадцатого столетия климат Северной Атлантики снова ухудшился, причем до такой степени, что сначала затруднились, а затем фактически и вовсе прекратились контакты между Скандинавией и поселениями викингов в Гренландии. В конце концов все, кто там остался, погибли. «Малое оледенение», которое последовало за малым оптимумом, продолжалось приблизительно с 1450 по 1850 годы и повлияло на области, расположенные далеко за пределами Гренландии. Во время климатического оптимума в Европе произошел рост сельского хозяйства и численности населения, но в последующий холодный период Европу одолевали наводнения, голод и чума. Особенно пострадали северные области, где поля во время климатического оптимума давали прекрасный урожай; теперь же стали регулярно повторяться сильные неурожаи. Крестьяне покидали свои фермы, многие сельскохозяйственные области опустели, периодически вспыхивали гражданские беспорядки. Ослабленное голодом население не могло выстоять против эпидемий чумы. Исторические хроники четко документируют суровость климата в Европе: голландские живописцы изображали катанье на коньках по льду каналов, а в семнадцатом столетии на льду замерзшей Темзы в Лондоне устраивались частые

«морозные ярмарки». Темза перестала замерзать только с 1814 года.

Описанные только что колебания климата были кратковременными, слишком короткими, чтобы их можно было связать с более длинными ледниковыми циклами. Данные, которые мы о них имеем, тоже очень локальны — только из Европы и Северной Атлантики. Большинство исследователей считает, что они были вызваны изменениями рисунка океанских течений, в частности, изменением объема теплой воды, поступающей в Северную Атлантику с юга. Причины таких внезапных изменений направления течений, также как и их связь с межледниковыми периодами, не установлены, хотя проведенные в последние годы исследования гренландских ледяных кернов позволяют предположить, что предыдущий межледниковый период, начавшийся около 130 000 лет назад, отличался еще более короткими климатическими вариациями, чем современный. Вероятно, нам просто повезло с нашим достаточно устойчивым климатом во время возникновения и подъема индустриального общества в последние полтора столетия.

В широком смысле современные люди поистине являются порождением Великого Ледникового века. Наш род *Номо* появился в Африке после начала оледенения в Северном полушарии, а распространение нашего вида *Номо сарпиенс* по всему земному шару произошло во время Висконсинского ледникового периода, когда уровень океана был значительно ниже. Часто бывает трудно распутать причину и следствие, но, как мы уже видели, изменчивость межледникового климата за последние 10 000 лет, по-видимому, сильно повлияла на развитие человеческой цивилизации. Но 10 000 лет это очень короткий промежуток времени на геологической шкале. Если и есть какой-то урок, который мы можем извлечь

из изучения геологической истории, то он состоит в том, что на любом отрезке временной шкалы и при любом ее масштабе постоянной особенностью этой истории является изменение — эволюционное изменение, изменение в очертаниях и расположении континентов и океанов, изменение климата. В коротком путешествии по геологическому времени, которое мы с вами совершили в этой книге, мы рассмотрели всего лишь несколько линий изменения, которые произошли за четыре с половиной миллиарда лет существования нашей планеты. Геологическая летопись, отражение событий в горных породах заканчивается в настоящем, где-то в конце теплого межледникового периода Великого Ледникового века. Нам остается только спросить: каких изменений мы можем ожидать в будущем?

Глава 13

ЧТО БУДЕТ ДАЛЬШЕ?

ГЕОЛОГИЯ И ЧЕЛОВЕК

Что касается весьма отдаленного будущего, то судьба нашей планеты ясна. Она будет поглощена опаляющим пламенем Солнца, когда оно расширится и станет звездой типа «красного гиганта». Как и все звезды, Солнце питается за счет ядерных реакций, протекающих в его плотной центральной части, где атомы водорода сдавливаются столь плотно, что сплавляются, образуя более тяжелые элементы и освобождая при этом огромные количества энергии. На основании наблюдения других звезд во Вселенной мы знаем, что, когда в этом процессе будет исчерпан весь водород, внутренняя часть Солнца сожмется в еще более плотное ядро, в то время как его внешняя, «более холодная» (но все еще имеющая температуру в тысячи градусов) оболочка расширится в сторону периферии солнечной системы, далеко за пределы орбиты Земли, поглощая все на своем пути. Но это произойдет в далеком будущем, через столько миллиардов лет от нашего времени, сколько прошло от ее возникновения в прошлом. К тому времени наш вид уже давно исчезнет.

Но есть еще и другие вещи, которые, несомненно, произойдут с Землей в будущем. Количество выделяемого тепла в глубинах Земли, которое движет литосферные плиты, частично порождаемого радиоактивным распадом, а частично сохранившееся от времен образования Земли 4,5 миллиарда лет назад, медленно уменьшается, но так постепенно, что те геологические процессы, которое оно

питает, будут, вероятно, продолжаться в их современной форме еще миллиарды лет, может быть до самых последних дней нашей планеты. Океанские бассейны будут возникать и исчезать, континенты — сталкиваться, создавая грандиозные горные хребты, которые затем снова будут снесены процессами химической и физической эрозии в море, и когда настанут подходящие условия, Земля снова попадет в тиски оледенений. А в своем движении в космическом пространстве наша планета почти наверняка столкнется с какими-нибудь обломками из космического мусора, которыми кишит наша Солнечная система. Не будучи крупными в космических масштабах, эти обломки будут достаточно большими, чтобы столкновение с ними глубоко изменило условия жизни на поверхности Земли за очень короткое по геологическим меркам время.

Но в сравнительно ближайшем будущем, на протяжении жизни нескольких поколений, наша планета должна будет пережить другие, более касающиеся нас потрясения. Один из моих коллег любит говорить, что самым важным из действующих агентов геологических изменений в данный конкретный момент геологической истории является человек. Мы являемся первым видом в истории Земли, обладающим способностью модифицировать поверхность планеты, ее атмосферу и климат радикально и в глобальном масштабе. Рисунок 13.1 показывает, как со временем изменялась численность людей, а вслед за ней, нога в ногу, изменялась степень всего лишь одного из видов нашего воздействия на окружающую среду — поступление в атмосферу углекислого газа. В прошлом по естественным причинам в атмосферу выбрасывалось гораздо большее количество углекислого газа; его концентрация изменялась в гораздо большей степени, чем показано на рисунке. Но насколько мы можем судить, эти изменения происходили значительно

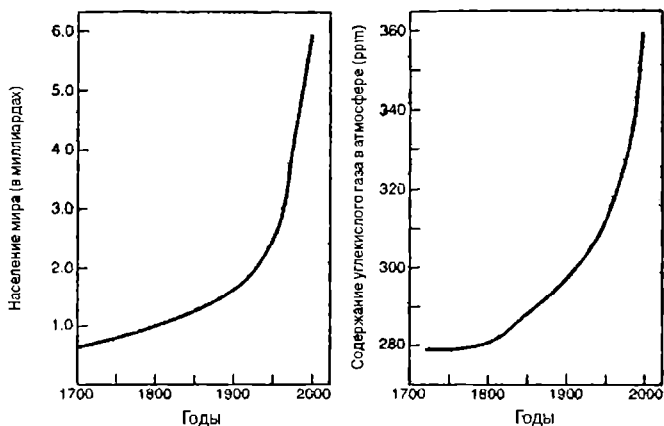


Рис. 13.1. Графики, показывающие изменения численности населения (слева) и содержания углекислого газа в атмосфере (справа) после приблизительно 1700 года, согласно данным из разных источников. Концентрации углекислого газа выражены в частях на миллион (ppm). К середине 1990-х годов содержание углекислого газа в атмосфере составляло около 360 частей на миллион. Хотя процентные изменения на обоих графиках очень различны, ясно, что скорость роста как народонаселения, так и содержания углекислоты в атмосфере весьма возросли во второй половине двадцатого столетия.

медленнее; их результаты, хотя и суровые или даже роковые для некоторых растений и животных, не были обрушены на общество, столь сложно организованное, как наше, которое очень тонко приспособлено к среднему климату последних нескольких столетий. Если, как предсказывают многие ученые, возрастание концентрации углекислого газа в атмосфере вызовет рост среднегодовой температуры на Земле на несколько градусов, последствия этого будут для нас совершенно катастрофическими. Целые продуктивные сельскохозяйственные пояса будут исключены из сферы землепользования или по крайней мере останутся пригодными только для совершенно иных

культур, чем те, которые там выращиваются сейчас. (С другой стороны, районы, лежащие в высоких широтах и имеющие сейчас второстепенное значение для сельского хозяйства, особенно в России и Канаде, могут неожиданно оказаться главными источниками пищевых продуктов.) По мере повышения температуры начнется подъем уровня океана — частично в результате таяния ледяных шапок, а частично потому, что сама океанская вода при нагревании расширяется, что приведет к затоплению многих плотно населенных и расположенных низко над уровнем моря областей и увеличению уязвимости других от тропических штормов. Пока люди вынуждены использовать ископаемые виды топлива, сжигание которого является главным источником дополнительно поступающего в атмосферу углекислого газа, нет реальных возможностей задержать рост его содержания в ней, хотя путем совместных международных действий можно было бы несколько замедлить этот рост. За длительный период времени общество, несомненно, приспособится к изменениям, которые должны произойти. Однако поскольку эти изменения будут быстрыми даже по человеческой шкале времени, то вполне вероятно, что они вызовут значительные трудности, нужду и разрушения во многих частях мира.

Есть также возможность, что рост среднегодовой температуры на Земле, который, несомненно, будет сопровождать рост выбросов углекислого газа в атмосферу, будет в то же время противодействовать тенденции к погружению Земли в новую ледниковую эпоху, которая, согласно графику рис. 12.4, охватывающему значительный отрезок времени, может наступить в любой момент. Но все же маловероятно, что эти две противоположные тенденции точно уравновесят друг друга. Большинство ученых, изучавших эту проблему, считают, что обусловленное углекислым газом потепление перевесит и мы

находимся в начале «сверхмежледникового периода», который будет продолжаться до тех пор, пока мы не израсходуем все наши ископаемые топливные ресурсы. К тому времени, вероятно через несколько столетий, концентрация углекислого газа в атмосфере будет по крайней мере в три раза выше, чем в предындустриальную эпоху. Постепенно большая часть этого избыточного углекислого газа будет поглощена океанами; при отсутствии нового поступления углекислоты ее концентрация в атмосфере начнет уменьшаться, что позволит Земле снова погрузиться в ее несколько запоздалый ледниковый период.

В отдаленной, геологической, перспективе истории Земли изменения, вызванные человеком, такие как, например, увеличение содержания углекислого газа в атмосфере, представляют собой мелкие пертурбации. Как должно быть очевидно из предшествующих глав, в прошлом Земля прошла через гораздо более серьезные нарушения хода эволюции, и тем не менее их следы в каменной летописи в общем довольно незначительны. Если завтра люди исчезнут с лица планеты, то через несколько миллионов лет следы их деятельности будут едва заметны. Но краткость нашей индивидуальной жизни заставляет большинство людей устремлять внимание на проблемы более близкого будущего; для исторических масштабов времени с нашим развитым знанием о работе Земли возможно предсказать, что нас ждет.

НАШИ ОГРАНИЧЕННЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ

Развитие геологии как науки в большой степени опиралось на поиски сырья для промышленности. До совсем недавнего времени большинство людей, профессионально занимающихся геологией, было устремлено на работу

в области добычи нефти или газа. И действительно, количество поступающих на геологические факультеты колледжей и университетов по всей Северной Америке следовало за взлетами и падениями главных нефтедобывающих компаний, которые были основными нанимателями выпускников. Однако после долгого периода низких цен на нефть и со все большим упором на сохранение запасов нефти и окружающей среды в последние годы эта картина меняется. Однако поиск и добыча полезных ископаемых, необходимых в нашем сложном мире, по-прежнему является важным аспектом наук о Земле. И как раз в этой области наши перспективы в будущем вполне определены.

С древнейших времен искатели полезных ископаемых (за отсутствием более подходящего слова) использовали интуицию, опыт и силу мозгов при поисках геологических материалов, нужных и пользующихся спросом. В наши дни к их древнему арсеналу была добавлена технология, особенно дистанционные (геофизические) методы, что позволило расширить область поисков до самых отдаленных районов, которые раньше не были доступны, а также до океанских глубин и областей континентов, лежащих под земной поверхностью. Почему при поисках полезных ископаемых необходимы такие усилия? Ответ заключается в том, что, хотя малые количества почти всех элементов периодической таблицы Менделеева можно найти в самых обычных материалах, — например, золото, растворенное в воде морей и океанов, медь в почве вашего сада, — они присутствуют там в очень рассеянной форме и их нельзя извлечь так, чтобы это было экономически выгодно. Даже алюминий, третий среди самых распространенных элементов земной коры, нельзя добывать просто в любом месте. Однако на протяжении всей истории Земли геологические процессы вели не только

к рассеянию элементов, но и к концентрации их с образованием ценных месторождений. Весь фокус заключался в том, чтобы понять, как работают эти процессы, и использовать это знание, чтобы сузить область поиска до месторождений, которые могут быть отработаны по приемлемой стоимости. Поиски таких месторождений, все более изощренные, продолжаются, но в значительной части земных недр, доступных с земной поверхности, детальные поиски уже проведены и количество вновь открываемых месторождений с каждым годом и десятилетием все меньше и меньше. Новые технологии позволяют извлекать нужные материалы из месторождений, которые когда-то считались нерентабельными, и все же следует признать, что геологические ресурсы не являются неисчерпаемыми. Процесс концентрации полезных ископаемых в месторождения занял несколько миллиардов лет истории Земли; в масштабах человеческой истории эти отработанные запасы невозполнимы. В некоторых случаях мы извлекаем их в течение десятилетий.

Может быть, самым поразительным примером постепенного истощения запасов может служить нефть. Ввиду ее чрезвычайной важности для современного общества образование и распределение месторождений нефти изучались очень детально и на поиски и извлечение ее из недр были затрачены миллиарды долларов. Хотя уже тысячи лет назад люди знали о существовании сырой нефти, встречающейся местами в виде «выходов», и использовали ее для целого ряда целей, самая первая буровая скважина нефти была пройдена в Пенсильвании в 1859 году. Известное в то время под названием «Безумие Дрейка», это маленькое предприятие породило в конечном итоге гигантскую всемирную индустрию, которая затронула практически каждый уголок Земли. Но не прошло еще столетия с того дня, когда была пробурена эта

первая скважина, а миллионы баррелей нефти выкачиваются из земли каждый день, как уже раздалось несколько осторожных голосов, предсказывающих о возможных крайне неприятных последствиях нашего ничем не ограниченного потребления этого невозполнимого ресурса. Хотя некоторые из самых крайних предсказаний так до сих пор и не осуществились — главным образом в результате более эффективного использования энергии, глобального замедления экономического развития и открытия новых месторождений, — уже нет сомнений в том, что в конце концов мы исчерпаем все доступные месторождения нефти и газа. Единственная оставшаяся неопределенность — это сколько времени до этого нам осталось. Хотя месторождения нефти и газа формировались в течение миллионов и миллионов лет, геологических ресурсов этих источников энергии хватит — при нынешнем щедром уровне их потребления — всего на несколько *сотен* лет!

Полезное ископаемое, которое мы столь расточительно тратим, топливо, питающее наши автомобили, — это в сущности древняя солнечная энергия, накопленная природой в виде нефти. По своему химическому составу она представляет собой главным образом углерод, соединенный с 15–20 процентами водорода. Она образуется только в совершенно особых геологических условиях, а именно в илистых осадках, накапливающихся в теплом морском мелководье. В таких местах органические остатки планктона — мелких плавающих организмов, живущих в просвечиваемых солнцем поверхностных слоях океана, — быстро накапливались на морском дне и заносились другими осадками. Быстрое погребение защищает органическое вещество от разложения, но процессы, превращающие этот дисперсный, богатый углеродом материал в нефть, очень сложны. Ключевыми факторами

этого превращения являются, по-видимому, температура и время. По мере того как погребенные слои органического вещества погружаются на все большую и большую глубину, температура, которая на них воздействует, становится все выше. Представляется, что наиболее благоприятный температурный интервал для образования жидкой нефти лежит между 65 и 150 градусами Цельсия, что, как правило, соответствует глубине в несколько километров. Но даже если исходный органический материал и превратится в нефть, ее нелегко извлечь из тех тонкозернистых осадков, в которых она образуется. Только когда она находится в крупнозернистых осадочных породах с большим количеством пор, как, например, в песчанике, ее можно легко извлечь. К счастью, нефть представляет собой очень легкую жидкость — она плавает на воде, — и с течением времени она всплывает наверх, иногда в прилегающие толщи пород. Поэтому наиболее продуктивные нефтяные залежи находят не в тех породах, в которых образовалась нефть, а в соседних, пористых слоях.

Наличие даже такой рудиментарной информации об образовании нефти в огромной степени упрощает задачу поисков и извлечения нефти. Поскольку для ее образования требуется богатая жизнью морская среда, то породы кембрийского периода, бедного проявлениями жизни, вряд ли могут содержать нефть. То же самое справедливо и для сильно метаморфизованных пород любого возраста, поскольку они претерпели воздействие температур, достаточно высоких, чтобы разрушить всякие следы нефти, которая в них содержалась. Таким образом, главными целями при поисках нефти должны быть мощные толщи фанерозойских осадков, образовавшихся на морских мелководьях вдоль окраин современных или древних континентов, или во внутренних морях, которые перио-

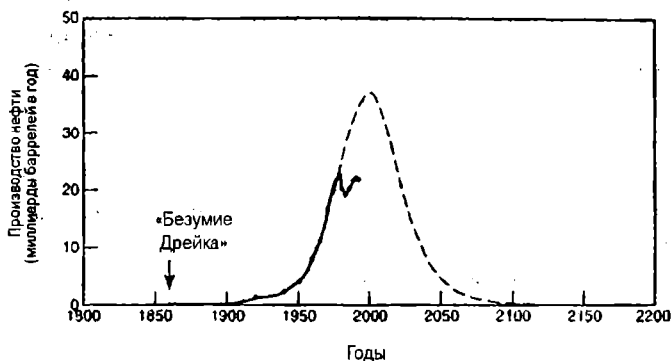


Рис. 13.2. Сплошная линия представляет сглаженную кривую мирового производства нефти с момента бурения первой скважины в 1859 году и до 1991 года. Точками на этой линии обозначено фактическое производство нефти, согласно ежегодной «Международной энциклопедии нефти» (PennWell Publishing Company). Штриховая линия показывает «оптимистический» прогноз, сделанный в 1969 году геологом из Геологической службы США М. Кингом Хаббертом на основании его наилучшей оценки количества известных и еще не открытых запасов нефти. Хотя снижение потребления нефти в начале 1980-х годов несколько отодвигает в будущее период изобилия нефти, все же из этого графика очевидно, что мы принадлежим к одному из всего лишь нескольких поколений людей, которые еще будут пользоваться благами из этого источника.

дически затапливали части континентов. Накопленный в результате бурения в таких районах опыт также позволяет предсказывать с приемлемой точностью, сколько нефти или газа еще не открыто. Если эти предсказания совместить с оценками того, насколько быстро будет расти в будущем потребление нефти, то мы придем к вероятному выводу, что в течение столетия от данного момента человечество израсходует большую часть имеющихся в недрах Земли запасов нефти (рис. 13.2). К сожалению, розовые краткосрочные прогнозы добычи нефти,

по сравнению с потребностью в ней, заслоняют необходимость предвидеть длительные периоды острой ее нехватки, которые, без сомнения, ждут нас в будущем, и проявить беспокойство. Другие источники энергии — и сырья, которое заменило бы нефть в производстве таких разнообразных продуктов, как синтетические ткани, удобрения и лекарства, — еще ждут своей разработки. Было бы лучше, если бы об этом люди позаботились раньше, чем позже.

Хотя нефть и газ являются настораживающими и отрезвляющими примерами, геологические ресурсы многих других полезных ископаемых также потребляются в темпах, вызывающих тревогу. Более того, подобно нефти и газу, распространение этих полезных ископаемых определяется геологическими факторами, а не политическими границами, делая зависимость современных индустриальных обществ от запасов некоторых ископаемых особенно опасной. Хорошим примером может послужить элемент кобальт, критическая составная часть сплавов, используемых для производства постоянных магнитов, турбин и реактивных моторов и других современных машин. Соединенные Штаты, да и другие высокоразвитые страны по существу не имеют своих источников кобальта. В конце 1970-х годов в результате гражданской войны в Заире цены на этот товар подскочили более чем в десять раз. Нехватка кобальта не была длительной, и тем не менее она напомнила о конечности минеральных ресурсов.

Некоторые космические энтузиасты предположили, что Луна или даже астероиды могут в будущем послужить источником сырья для Земли. На Луне действительно имеются все необходимые химические элементы, но их извлечение потребовало бы огромных затрат энергии. В противоположность ситуации на Земле, геологи-

ческие процессы, протекавшие на Луне, не вели, как правило, к образованию минеральных месторождений, подобным тем, которые известны нам на Земле. Причина этого заключается в том, что удивительно высокая доля механизмов концентрации элементов на нашей планете связана с наличием жидкой воды. Некоторые месторождения отлагаются прямо из моря — например, полосчатые железистые толщи, обсуждавшиеся в главе 4, которые являются источником большей части железной руды. Другие месторождения представляют собой продукты выветривания, происходившего с участием воды: алюминий концентрируется в обстановке, когда сильные и частые дожди при высоких температурах тропических областей растворяют и уносят почти все в местных коренных породах, оставляя только нерастворимый богатый алюминием боксит. Золото и многие другие ценные металлы обычно встречаются в жилах, поскольку они отлагались там из горячих, богатых водой флюидов, протекающих по трещинам в породах земной коры. По причинам, связанным с ее образованием, Луна лишена воды; большая часть процессов, которые на Земле ведут к концентрации минералов, на Луне никогда не имели места. В результате этого экономически ценные элементы присутствуют в породах Луны только в рассеянной форме. По-видимому, хищный аппетит современных обществ будет, по крайней мере в ближайшем будущем, удовлетворяться из земных источников путем разработки методов эффективного извлечения материалов из менее богатых руд, путем сохранения и повторного получения ценных материалов из отходов и разработки заменителей для некоторых самых редких минералов и элементов. По этой причине изменилась роль ученых-специалистов в области наук о Земле (по крайней мере частично) от роли простых эксплуататоров многочисленных и богатых

месторождений Земли до хранителей ресурсов, которые сейчас уже считаются ограниченными. У геологов есть необходимые знания для оценки отдаленных последствий потребления критических материалов при современных темпах, а некоторые из них взяли на себя ответственность за предупреждение и оповещение как правительств, так и населения вообще о вероятных результатах такого потребления.

ОПАСНОСТЬ СТОЛКНОВЕНИЯ ЗЕМЛИ С НЕБЕСНЫМИ ТЕЛАМИ

Геологическая каменная летопись оставляет мало сомнения относительно возможности столкновения Земли с различными телами в будущем. Современная дискуссия между специалистами фокусируется на том, какова именно эта вероятность крупномасштабного, катастрофического столкновения и есть ли какие-либо средства, которые позволят избежать такой катастрофы.

Доказательства гигантского столкновения Земли с каким-то небесным телом, случившегося 66 миллионов лет назад и создавшего глобальный кризис, который привел к гибели динозавров и многих других животных и растений, обсуждались в главе 10. Космическое тело, вызвавшее катастрофу на границе мела и третичного периода, вероятно, представляло собой астероид, выброшенный в результате какого-то возмущения на орбиту, пересекающую орбиту Земли. Сейчас общепризнано, что очень крупные события, подобные столкновению на границе мел—третичный период, бывают очень редко, даже по геологической временной шкале, но что часто не принимается во внимание, так это то, что имеются сотни, а может быть, даже тысячи астероидов, диаметр которых

превышает 100 метров (и поэтому способных принести существенный ущерб, если они столкнутся с нашей планетой), орбита которых как раз в этот момент пересекает орбиту Земли. Каждый из них имеет некоторую потенциальную возможность столкнуться с Землей, а геологическая и историческая летописи показывают, что в прошлом такие столкновения происходили регулярно. Так какова же конкретно вероятность того, что такое столкновение произойдет снова? И какой ущерб оно может причинить? Сейчас предпринимаются значительные усилия, чтобы получить ответы на эти вопросы. Хотя во всех предсказаниях имеется некоторая доля неопределенности, угроза, о которой мы сейчас говорим, настолько реальна, что уже вызвала серьезную дискуссию о возможности раннего обнаружения и, может быть, даже изменения направления орбиты небесного тела, находящегося на пути столкновения с Землей. Один такой анализ, недавно выполненный Кларком Чепмэном из Института планетарных исследований в городе Таскон, штат Аризона, и Дэйвидом Моррисоном из Эймсского исследовательского центра НАСА в Калифорнии, результаты которого опубликованы в научном журнале «Нэйчур» («Nature») в 1994 году, предсказывает, что имеется один шанс на 10 000 в пользу того, что в течение следующего столетия с Землей столкнется астероид, достаточно большой, чтобы разрушить нашу среду обитания и истребить значительную часть населения Земли. Это очень небольшая вероятность, но только в чисто статистическом смысле; в силу очень большого количества вызванных этим столкновением смертей, она обещает, что для среднего американца шанс умереть в результате такого столкновения приблизительно равен шансу погибнуть в авиационной катастрофе. Безопасность полетов на самолетах является вполне законным предметом

заботы как правительств, так и граждан, так разве вопрос об отклонении астероида, несущегося к Земле, имеет меньшее значение?

Факты, необходимые для того, чтобы оценить вероятность столкновения, мы находим в разных источниках, включая геологическую каменную летопись. Поскольку атмосфера заслоняет нас от мелких тел, которые сгорают от тепла, выделяемого в результате их трения о воздух, прежде чем достигнут Земли, и поскольку выветривание и тектоника плит постоянно изменяют ландшафт, поверхность нашей планеты не до такой степени изрыта оспинами кратеров, как некоторые из наших планет-соседей. И тем не менее на Земле есть несколько хорошо документированных примеров таких кратеров. Метеоритный кратер в Аризоне уже упоминался выше. Это сравнительно молодая и хорошо изученная структура, образовавшаяся в результате столкновения. Многие земные кратеры довольно велики и первоначально были распознаны по их круглой форме только по наблюдениям с самолетов или со спутников. Древние, сильно разрушенные части земной коры, как, например, докембрийский Канадский щит в Северной Америке, содержат много древних кратеров. К счастью, покрывающие их осадочные породы и почва помогли сохранить их до последнего оледенения в северном полушарии, которое соскребло их защитный покров, снова обнажив кратеры. Тщательное исследование размеров и возраста этих и других кратеров позволило геологам создать базу данных и определить частоту столкновений с Землей тел разного размера. Аналогичные, но более полные данные получены в результате исследования кратеров на Луне (рис. 3.1), которая не имеет защитной атмосферы, уничтожающей мелкие тела, и на которой процессы, разрушающие кратеры на Земле, такие, как выветривание или

тектоника плит, не действуют. Таким образом, большие части лунной поверхности послужили в качестве инертных записывающих устройств, фиксирующих все столкновения за миллиарды лет. Все собранные до сих пор данные показывают, что на очень маленьком конечном отрезке спектра размеров тело, обладающее энергией той ядерной бомбы, которая была сброшена на Хиросиму в конце Второй мировой войны, сталкивается с Землей *каждый год*! Если выразить это через фактические размеры тел, то эти объекты очень невелики. Атмосфера защищает нас от их воздействия, и они сгорают или взрываются вследствие трения о воздух высоко над поверхностью Земли. Не считая того факта, что они записываются разведочными спутниками, мы даже не осознаем их существования. Даже объекты, обладающие в сто раз большей энергией, встречи с которыми можно ожидать один или два раза в столетие, не достигают земной поверхности. Но в окрестностях Земли плавают гораздо больших размеров фрагменты астероидов, и в сравнительно недавнем прошлом происходили хорошо документированные случаи как почти попаданий, так и реальных попаданий их в Землю. Почти попадание произошло в 1989 году, когда какой-то астероид диаметром в несколько сот метров, несущий — по оценкам ученых — энергию, эквивалентную 1000 тонн ТНТ (тринитротолуола), прошел мимо Земли на расстоянии, меньшем, чем удвоенное расстояние от Земли до Луны. Небольшое изменение его орбиты — и он мог бы врезаться в Землю с катастрофическими последствиями. Он, безусловно, достиг бы поверхности Земли, образовав кратер диаметром в несколько километров (или породив гигантские волны в случае, если бы он упал в океан). Этот почти попавший астероид, если бы он действительно столкнулся с Землей, принес бы в сотни раз большие разрушения, чем упомянутый в главе 3 объект,

который взорвался в атмосфере над Сибирью в 1908 году. Этот Тунгусский феномен, как его называют, был отмечен в Европе по вызванным им атмосферным ударным волнам, и когда ученые много лет спустя добрались до этого очень удаленного места, они нашли сплошь поваленный лес на площади более 2000 квадратных километров и признаки того, что взрыв вызвал пожары вблизи центра этого пострадавшего района. Никаких обломков упавшего астероида так и не было найдено, но выполненные недавно расчеты показали, что это, вероятно, был каменный объект, который взорвался в атмосфере на высоте около 10 километров. К счастью, местность, где произошел взрыв, была необитаемой; если бы он упал в населенном районе, последствия этого взрыва были бы очень серьезными.

Столкновения с крупными объектами происходят редко, но их воздействие потенциально столь опустошительно, что они составляют совершенно особый тип геологической угрозы, отличный почти от всех других. Столкновения, подобные тому, которое завершило меловой период, выбрасывают в атмосферу столь много тонких обломков, что — не считая света от пожаров, возникших в результате столкновения, — весь мир на некоторое время погрузился бы в сплошную темень. Даже гораздо менее мощные столкновения могли бы все же уменьшить солнечное освещение до такой степени, что все сельское хозяйство было бы подавлено более чем на один летний цикл с катастрофическими последствиями. Все общества Земли подверглись бы воздействию этого взрыва; ни одна страна не уцелела бы, чтобы оказать другим помощь, как это обычно делается в случаях катастрофических наводнений, землетрясений или засухи. К счастью, действительно крупные объекты диаметром в один километр или больше легче всех других обнаруживаются

в космосе. Существуют технологические средства, позволяющие обнаружить такие тела и определить их орбиты. К счастью также, чувствительные телескопы и тщательно организованная служба наблюдения могли бы, вероятно, обеспечить достаточно заблаговременное предупреждение (по крайней мере за несколько лет), чтобы можно было разработать и осуществить стратегию защиты, позволяющую избежать столкновения с теми объектами, которые окажутся на пути к столкновению с Землей. Отклонение орбиты астероида было бы очень дорогостоящим предприятием, но все же маловероятно, что будет слишком много жалоб на высокую стоимость защиты Земли от потенциального полного опустошения.

ВУЛКАНЫ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Гораздо более непосредственную, хотя и более локализованную опасность для общества представляют собой сильные землетрясения и вулканические извержения. Именно о них думает большинство людей, когда хотят представить себе геологические катастрофы. При современном знании о том, как работает Земля, не так уж сложно делать предсказания о вероятности таких событий. Можно сказать почти со стопроцентной уверенностью, что в какой-то момент в течение последующих нескольких сотен лет крупное и очень разрушительное землетрясение поразит Сан-Франциско или Токио или же взорвется гора Святой Елены. Но пока что невозможно предсказать заранее, когда конкретно произойдет подобное событие или, что еще более важно, насколько крупным оно будет. И все же наблюдается определенный прогресс в отношении краткосрочных прогнозов. В большинстве случаев такие прогнозы требуют тщательного

слежения, с использованием как приборов, так и простых наблюдений, в регионах, о которых уже известно, что это области высокой степени риска. В нескольких случаях, когда опасность казалась непосредственно угрожающей, проводились массовые эвакуации. Вероятно, наиболее известным примером может послужить эвакуация населения с вулканического острова Гуаделупе в Карибском море в 1975 году, когда зловещие предвестники показали, что извержение неминуемо в любой момент. Однако извержение не произошло. Три месяца спустя жители вернулись в свои дома, никакой катастрофы не было, и разгорелись горячие дебаты о необходимости проведенной эвакуации и, конечно, о точности предсказания. Но природа капризна, и еще не скоро мы разберемся в том, какие виды признаков действительно предвещают извержение или землетрясение. А пока что вполне возможно, что будут еще и другие ложные прогнозы, но в конечном итоге лучше, вероятно, следовать им, чем игнорировать. Иногда природа мстит за неверие в предсказание, как случилось вскоре после событий в Гуаделупе, когда геологи в Колумбии предупредили, что даже незначительное извержение вулкана Невадо дель Руис может расплавить снег и лед на его вершине, вызвав мощные потоки вулканического пепла и грязи, которые могут угрожать городку Амеро, расположенному у основания вулкана. В этом случае жители проигнорировали это предупреждение и предсказанные потоки грязи обрушились на город, только через несколько месяцев, уничтожив 25 000 человек.

Как должно быть ясно из обзора тектоники плит в главе 5, наиболее высока вероятность возникновения как вулканических извержений, так и землетрясений вдоль границ между плитами. Наиболее опасны места, где плиты, сталкиваясь друг с другом, образуют зоны субдукции.

Даже беглый взгляд на рис. 5.2 покажет, что многие из таких областей плотно заселены: это большая часть западного берега Северной, Центральной и Южной Америки, Япония, Индонезия и те части Средиземноморья, которые лежат вблизи зон субдукции. Все эти районы испытывали не раз и землетрясения, и извержения вулканов на протяжении писанной истории и снова испытают их в будущем. И все же в большинстве этих регионов катастрофы происходят через довольно большие промежутки времени, часто между ними успевает смениться одно или несколько поколений людей и поэтому они не очень запечатлеваются в общем сознании.

Даже в тех случаях, когда сравнительно близкая во времени геологическая опасность совершенно очевидна, общественная реакция часто бывает в лучшем случае приглушенной. Сан-Франциско, один из самых прекрасных, но также и один из смертельно опасных городов в Соединенных Штатах (с точки зрения опасности землетрясений), все еще продолжает быть одним из самых желанных для проживания мест в стране и имеет соответственно самые непомерные цены на недвижимость. Хотя сам город не лежит в зоне субдукции, разлом Сан-Андрэас проходит прямо над нею, а несколько других больших сбросов находятся в этом же районе. Злосчастная катастрофа 1906 года (вызванная смещением вдоль самого разлома Сан-Андрэас) и последующие пожары, которые совместно разрушили большую часть деловых кварталов города, все еще часто вспоминаются в печати, но большинство жителей города старается не думать о выводах и предпочитает наслаждаться красотой города и идти на риск, веря, что следующий толчок не случится в ближайшем будущем. Подгоняемый движением и напором плит, он все же неизбежно произойдет, и хотя современные правила строительства обеспечивают меньший

ущерб, они не гарантируют безопасности. Землетрясение 1989 года было гораздо меньшим по масштабу, чем землетрясение 1906 года, и произошло почти в 100 километрах к югу от города, вблизи города Санта-Крус в Калифорнии; оно повредило дома и мосты в Сан-Франциско и его окрестностях и унесло жизни 65 человек. Многие другие крупные города мира живут в постоянной опасности от проявлений геологических процессов. Их расположение обуславливает практически полную уверенность в возможности катастрофы в предстоящие несколько десятков или несколько сотен лет.

К счастью, разрушения, вызываемые землетрясениями, очень локализованы. И все же, когда они происходят в море, они возбуждают огромные цунами, которые могут перемещаться через целые океанские бассейны и причинять огромный ущерб в очень отдаленных частях земного шара. Хотя эти гигантские волны перемещаются очень быстро, обычно жителей предупреждают о них достаточно заблаговременно, чтобы они могли подготовиться, успеть выехать из низменного района. Очень мощные вулканические извержения также могут проявляться далеко за пределами непосредственно прилегающей к ним местности. В главе 12 уже отмечалось, что извержение вулкана Пинатубо на Филиппинах в 1991 году вызвало глобальное понижение средней температуры в течение нескольких лет вследствие выброса в атмосферу вулканических аэрозолей, главным образом сернистого газа. Сразу же после первоначальных извержений в атмосфере оказалось так много вулканической пыли, что самолеты коммерческих авиалиний, чьи маршруты пролегли через Тихий океан, вынуждены были, по сообщениям печати, заменять ветровые стекла каждые несколько дней из-за щербин. Та же пыль была причиной великолепных закатов во всем мире, наблюдавшихся более года.

Многие из извержений прошлого оставили после себя легко прослеживаемые в геологическом разрезе слои пепла, имеющие часто мощность в несколько сантиметров и площадь распространения в десятки тысяч квадратных километров. Самое крупное за последние две сотни лет извержение произошло в 1815 году на острове Сумбава в Индонезии, когда крупный вулкан горы Тамбора яростно взорвался. Согласно записям европейских чиновников, живших в этом регионе в то время, взрывы, сопровождавшие извержение, были слышны за 1500 километров. На острове Ява, в сотнях километров к западу от острова Тамбора, день превратился в ночь из-за вулканического пепла, рассеянного в воздухе. Вулканическая пыль, выброшенная в атмосферу, была почти несомненно причиной необычно холодной погоды на всем земном шаре, которая последовала за этим извержением. В своей очаровательной книжице на тему связи между климатом и вулканами Генри и Элизабет Стоммел тщательно описали холодное, ветреное (даже снежное) лето 1816 года в Новой Англии, Европе и других местах, которое последовало за извержением вулкана Тамбора. В своем исследовании они часто сталкивались с ходячим выражением того времени: «тысяча восемьсот и замерз до смерти».

Имеется достаточно данных, относящихся к недавним, тщательно задокументированным землетрясениям, как, например, в Минатубо, чтобы было ясно, что огромное количество пепла и сернистого газа, которое было выброшено вулканом Тамбора, должно было значительно повлиять на количество солнечной энергии, достигающее поверхности Земли, чтобы вызвать существенное похолодание. И действительно, некоторые исследователи отметили, что самые грандиозные вулканические события прошлого, запечатленные в геологической летописи, из которых некоторые во много раз превышали по своей

мощности извержение вулкана Тамбора, вполне были способны вызвать «вулканическую зиму», длившуюся, возможно, несколько лет подряд. В сущности, нет сомнений в том, что за такими событиями следовало глобальное похолодание, если оно происходило в такой момент, когда и другие условия благоприятствовали оледенению, давая тот толчок, который был нужен для того, чтобы ввергнуть Землю в ледниковый период.

Очевидно, что геология не уважает межгосударственные границы. Наоборот, ее щедрые подарки в форме минеральных и энергетических ресурсов, добываемых из недр Земли, так же как и ее угрозы, представляют собой современные проявления геологических процессов, идущих уже миллионы, если не миллиарды лет. Эти процессы могут коренным образом изменить лицо Земли и даже повлиять на ход дальнейшей эволюции жизни и общества. Обо всех этих вещах мы знаем на основании изучения геологической летописи — данных, сохранившихся в горных породах. По мере того как эта летопись раскрывается перед нами во всех подробностях, становится возможным предвидеть, что лежит впереди, понять, как действия самого недавнего агента геологических изменений, человека, могут с высокой вероятностью нарушить ныне протекающие природные геологические циклы. И все это позволит нам понять происхождение ландшафтов, отражающих в себе всю геологическую историю и окружающих нас каждый день нашей жизни.

Аккреция — применительно к истории образования Земли как планеты аккрецией называется процесс, посредством которого твердый материал, обращавшийся по орбите вокруг Солнца, постепенно собирался во все более плотные скопления, из которых в конце концов образовалась Земля. Отдельные обломки этого материала имели размеры, колеблющиеся от песчаного зерна до планетоподобных объектов величиной с Марс.

Актуализм (принцип актуализма) — принцип, или правило, согласно которому геологические процессы, которые можно наблюдать сейчас, вероятно, подобны тем, которые протекали в прошлом.

Андезит — тип вулканических пород, характерный для вулканов, действующих в зонах субдукции. Термин происходит от названия гор Анды в Южной Америке.

Археоптерикс — животное, ныне вымершее, в котором сочетались характерные признаки как птиц, так и пресмыкающихся. Считается одной из первых настоящих птиц, поскольку имел перья и облегченные кости. Жил в конце юрского периода.

Астероиды — небольшие (диаметром до 1000 километров) каменные и металлические тела, вращающиеся вокруг Солнца. Они сконцентрированы в основном в так называемом поясе астероидов, расположенном между орбитами Марса и Юпитера.

Базальт — очень распространенная тонкозернистая темноокрашенная изверженная горная порода, образу-

щаяся при остывании излившейся вулканической лавы. Лавы возникают в результате плавления пород мантии. Базальт является преобладающим типом пород, образующих морское дно и многие океанические острова, как, например, Гавайи, а также весьма распространен на континентах.

Боксит — тип горных пород, образующихся в результате выветривания в тропическом климате и являющийся основной алюминиевой рудой. Почти целиком состоит из гидратизированных окислов алюминия, оставшихся на месте образования после того, как практически все остальные компоненты первоначальной породы были выщелочены и вынесены обильными теплыми дождями.

Варвит — глина, состоящая из тонких прослоев (варв), отложенных каждый в течение одного года в ледниковом озере. В типичных случаях в каждом из составляющих ее прослоев наблюдается постепенный переход от более грубозернистого материала, отложившегося во время летнего таяния ледника, до более тонкозернистого, обычно темноцветного материала, отложенного в результате медленного оседания мельчайшей, богатой органическим материалом взвеси в зимний период. Почти синоним — ленточная глина.

Вид — таксономическая (классификационная) категория, уровень которой располагается ниже рода и которая не подразделяется на более мелкие единицы. Индивиды, принадлежащие одному виду, способны к скрещиванию и воспроизведению подобного себе потомства.

Выход (обнажение) — термин, используемый геологами для обозначения части геологического тела или части толщи пород, видимой на земной поверхности.

Гематит — широко распространенный железистый минерал с химической формулой Fe_2O_3 . В некоторых раз-

новидностях имеет отчетливо красный или красно-бурый цвет.

Глинистый сланец (шэйл) — тип осадочной породы, состоящей главным образом из тончайших зерен или чешуек глинистых минералов. Имеет свойство легко раскалываться вдоль плоскостей первоначального отложения осадка, образуя тонкие плоские обломки.

Горячая точка — термин, используемый для описания проявлений на земной поверхности мантийного столба. Горячие точки представляют собой районы интенсивной вулканической деятельности. Для них характерен более интенсивный тепловой поток, и обычно они приподняты над окружающей местностью.

Гранит — распространенная крупнозернистая изверженная порода, типичная для континентальной коры, состоящая чаще всего из полевого шпата, кварца и слюды. Граниты обычно образуются из магмы, которая не вырывается на поверхность, а медленно остывает в глубине земной коры. Медленным охлаждением объясняется крупнозернистая структура породы.

Известняк — осадочная порода, состоящая главным образом из карбоната кальция. Некоторые известняки представляют собой простой химический осадок, но в большинстве случаев карбонат кальция первоначально образовался в виде раковин или скелетов морских организмов, которые накапливались на морском дне после смерти организмов.

Изотоп — все изотопы какого-либо химического элемента в химических реакциях ведут себя одинаково, но отличаются друг от друга количеством нейтронов, содержащихся в атомных ядрах, и поэтому отличаются по своему атомному весу.

Кварц — обычный минерал земной коры, состоящий из кремнезема (окись кремния с формулой SiO_2).

Кимберлит — особый тип вулканических пород, довольно редкий, но также и очень важный, поскольку все известные месторождения алмазов образуются первоначально в кимберлитах. Поскольку многие кимберлиты содержат алмазы, эти породы должны формироваться на больших глубинах в результате плавления мантии, по видимому, на глубине около 200 километров.

Кинетическая энергия — энергия механического движения тел, зависящая от их массы и скорости.

Конгломерат — осадочная порода, состоящая главным образом из округлых галек и валунов, часто принадлежащих к различным типам пород, скрепленных тонкозернистым цементом (связующей массой). Соответствует, в сущности, окаменевшей гальке потоков.

Коралл — общее название большой группы морских беспозвоночных организмов, живущих на мелководье и образующих скелеты из карбоната кальция. Кораллы часто являются колониальными организмами. Их колонии образуют коралловые рифы. Очень распространены в составе окаменевших остатков, составляющих каменную летопись.

Ленточная глина — см. *Варвит*.

Лёсс — тонкозернистый принесенный ветром осадок, широко распространенный во всем мире, особенно в северном полушарии. Обычно считается, что его происхождение связано с оледенением последних нескольких миллионов лет, вероятно, в результате преобладания в этот период сухого, засушливого климата и системы сильных атмосферных потоков в эпохи максимальных похолоданий.

Литосфера — внешняя жесткая оболочка Земли, образующая плиты, изучаемые в тектонике плит. В среднем она имеет толщину около 100 километров и включает как земную кору, так и самую верхнюю часть мантии. Граница между литосферой и подстилающей ее мантией опреде-

ляется не химическими, а механическими свойствами пород и приурочена к уровню, на котором верхняя мантия является одновременно и горячей, и весьма пластичной.

Магма — расплавленная порода, образовавшаяся путем плавления в глубинах Земли. При охлаждении она образует изверженные породы, а при излиянии ее на дневную поверхность называется лавой.

Мантийный столб — струя вещества, имеющая более низкую плотность, чем окружающая ее среда, поднимающаяся из глубин мантии. Мантийные столбы имеют, вероятно, более высокую температуру, чем окружающие их породы, и при приближении к дневной поверхности подвергаются плавлению, что во многих случаях приводит к развитию поверхностного вулканизма. Предполагается, что они представляют собой стационарные и долгоживущие образования, формируя на поверхности вулканы, подобные гавайским, и длинную цепь подводных и потухших вулканов, которая тянется к северо-западу от Гавайских островов, фиксируя след движения плиты над мантийным столбом.

Мантия — одна из оболочек, слагающих Землю как планету; расположена между земной корой и ядром (рис. 1.2). Она слагает основную часть объема Земли и состоит из минералов с высокой плотностью, главным образом силикатов и окислов магния и железа.

Массовое вымирание — эпизод в истории Земли, когда скорость исчезновения видов животных и растений особенно высока, длящийся обычно не более нескольких миллионов лет. Большая часть главных границ в геологической шкале времени совпадает с эпохами массового вымирания.

Метаморфизм — процесс, в результате которого минеральный состав и облик породы изменяется под действием высокой температуры и высокого давления.

Метеориты — каменные или металлические объекты, которые падают на Землю из космоса. Считается, что большая часть их происходит из пояса астероидов.

Микробы — очень мелкие, микроскопических размеров формы организмов. Термин применяется главным образом к бактериям.

Моря лунные — название, данное астрономами темным, относительно низменным областям Луны. Теперь уже известно, что темный цвет лунных «морей» объясняется тем, что они сложены потоками темного базальта.

Морена — скопление обломков горных пород, состоящих из смеси различной величины валунов, гравия, песка и глины, перемещаемых ледниками или отложенных при их таянии. Нередко образует своеобразные формы рельефа в виде длинных гряд или холмов.

Обломочные породы — породы, состоящие из обломков пород и зерен минералов, которые были отделены эрозией от материнской породы и перемещены к месту отложения осадка.

Обнажения горных пород — см. *Выходы*.

Однопроходные — группа примитивных яйцекладущих млекопитающих, большей частью вымерших. Австралийский утконос и два вида ехидн, живущих в Австралии и Новой Гвинее, являются единственными ныне живущими представителями однопроходных.

Окаменелый — превращенный в твердую связную породу.

Осыпь — скопление не связанных цементом обломков горных пород, накопившихся в результате выветривания на крутых склонах или у подножия скалистых выходов горных пород.

Палеонтология — наука, изучающая прошлые формы жизни в основном на основании ископаемых остатков организмов.

Парниковый эффект — увеличение температуры на земной поверхности вследствие удержания тепла различными составляющими атмосферы, такими как углекислый газ и метан. Составляющие, которые препятствуют повторному излучению энергии Землей, получили торжественное название «парниковые газы». Очевидна аналогия с реальными парниками, в которых излучение тепла в атмосферу задерживается чистым стеклом.

Пассивная окраина континента — край континента, находящийся целиком внутри континентальной плиты и поэтому не подверженный воздействиям вулканизма, землетрясениям или другим геологическим процессам, характерным для границ между плитами. В типичном случае вдоль пассивной окраины осадки спокойно накапливаются, образуя мощные толщи, как они сегодня накапливаются вдоль восточного побережья Северной Америки или вдоль западных берегов Африки и Европы.

Период полураспада — продолжительность времени, в течение которого распадается половина атомов какого-либо образца радиоактивного материала. Период полураспада может быть выражен через так называемую постоянную распада, представляющую собой вероятность распада за единицу времени.

Песчаник — осадочная порода, состоящая главным образом из зерен кварца, сцементированных каким-либо химическим осадком, например, гематитом, карбонатом кальция или кремнеземом.

Пирит — минерал, состоящий из железа и серы с химической формулой FeS_2 . Широко распространен в земной коре, иногда в просторечии называется «золотом дураков».

Планктон — общий термин, обозначающий всякого рода мелкие организмы (растения и животные), плавающие в озерах и океанах.

Плита литосферная — относительно жесткий сегмент литосферы, который движется относительно других плит по земной поверхности. Область геологии, изучающая движения плит, называется тектоникой плит.

Покров тектонический — огромная лежащая складка или система складок с общей горизонтальной осевой поверхностью, характерная для зон столкновения между континентами. Образуется в результате мощного выдавливания целых толщ, происходящего в таких зонах.

Покрытосеменные — цветковые растения. Великое эволюционное преимущество таких растений состоит в том, что их цветы привлекают к себе насекомых, которые переносят пыльцу от одного цветка к другому, обеспечивая перекрестное опыление.

Прокариот — организм, состоящий из одной примитивной клетки (прокариотная клетка), не имеющий внутренних структур типа хромосом или ядра. Все бактерии являются прокариотами.

Птерозавр — вымершая летающая рептилия, жившая в мезозойскую эру.

Радиация — в эволюционном смысле радиация представляет собой распространение группы организмов из одного места в новые места обитания или типы среды, сопровождающееся увеличением разнообразия характерных признаков.

Разлом — поверхность раскола в сплошной массе породы или толщи пород; может сопровождаться смещением частей относительно друг друга. В последнем случае раскол называется (в зависимости от направления смещения) сбросом, взбросом или надвигом. Группа сближенных расколов иногда называется зоной разлома.

Род — таксономическая (классификационная) категория, располагающаяся выше вида. Сходные виды принадлежат одному роду.

Сверхновая звезда — звезда, находящаяся в процессе грандиозного взрыва. Сверхновые звезды образуются, когда иссякает «ядерное топливо» большой звезды и ее центральная часть резко сжимается, что сопровождается катастрофическим взрывом с освобождением огромных количеств энергии.

Сейсмические волны — землетрясения различного масштаба и упругие волны (колебания, вибрации), которые они вызывают в толще Земли. Сейсмические волны распространяются во все стороны от места, где происходит землетрясение. Сейсмический зазор вдоль новообразовавшегося разлома или сброса является тем местом, где землетрясения не возникают.

Сланец глинистый (шэйл) — см. *Глинистый сланец*.

Строматолит — пузыреобразное слоистое образование, попадающее иногда в осадочных породах. Строматолиты особенно распространены в протерозойских осадках, но часть их сохранилась до настоящего времени. Структура строматолита состоит из колоний нитеподобных водорослей, образующих плоские слои из клейких нитей, между которыми сохраняются захваченные при росте слоев частицы осадка.

Субдукция — процесс, происходящий на границе между сталкивающимися литосферными плитами, при котором часть одной из плит опускается в глубины Земли. Опускающаяся плита неизменно состоит из плотной океанической коры, а сама зона субдукции проявляется на поверхности в виде глубокого океанического желоба (рва) или удлиненной впадины. Зоны субдукции характеризуются мощными землетрясениями.

Тиль — общий термин, обозначающий неконсолидированные (не связанные цементом) обломки разнообразных горных пород, отложенные ледниками. Обычно тиль представляет собой смесь обломков самого различного

размера — от валунов до микроскопических глинистых частиц, принадлежащих часто к разным породам. Переводится часто термином валунная глина. Тиль, сцементированный так, что образуется твердая порода, называется тиллитом.

Тип — широкая первичная таксономическая категория для живых организмов. В биологической классификации живых существ имеется пять общепризнанных царств, в которые входят все известные живые существа. Каждое из царств подразделяется на несколько типов.

Трилобиты — класс вымерших беспозвоночных животных, живших в морях, начиная с кембрийского периода и до конца пермского. Трилобиты являются родственниками ракообразных, насекомых и пауков.

Уранинит — ураносодержащий минерал с химической формулой UO_2 .

Фотосинтез — процесс, с помощью которого растения превращают углекислоту и воду в сахара с выделением кислорода.

Хондриты — распространенный тип метеоритов. Считается, что они состоят из всякого «мусора» — остатков древнейшего вещества, первоначально образовавшегося в солнечной системе. Хондриты, очевидно, происходят от мелких тел, которые никогда не подвергались плавлению или химической дифференциации и потому представляют собой ценнейший ключ к познанию природы первоначального вещества, в результате аккреции которого образовалась Земля.

Цианофиты — тип бактерий, окаменевшие остатки которых найдены в архейских породах, но сохранившиеся до нашего времени (современные строматолиты состоят из цианофитов). Подобно всем бактериям, цианофиты состоят из примитивных (прокариотных) клеток без

каких-либо внутренних структур. Известны также как сине-зеленые водоросли.

Циркон — широко распространенный, но очень рассеянный минерал земной коры, имеющий химическую формулу $ZrSiO_4$. Поскольку в состав его обычно входит уран, используется в урано-свинцовом методе определения абсолютного возраста пород.

Черт — твердая, очень тонкозернистая осадочная порода, состоящая главным образом из кремнезема. Другое название — *флинт* (кремень). Черт иногда образуется путем непосредственного осаждения из воды или в результате накопления богатых кремнеземом скелетов некоторых видов планктона. Иногда переводится как *кремнистый сланец*.

Шов — область, вдоль которой были соединены два фрагмента континентальной коры в результате столкновения. Первоначально такие зоны отмечаются высокими горными цепями. Гималаи и Альпы являются сравнительно молодыми примерами шовных зон.

Эвапорит — осадочная порода, образовавшаяся путем химического отложения и состоящая чаще всего главным образом из обычной соли ($NaCl$) и гипса ($CaSO_4$), выпавших непосредственно из водного раствора в результате испарения какого-либо водного бассейна.

Ядро Земли — самая внутренняя часть Земли, залегающая под мантией (рис. 1.2). Состоит главным образом из железо-никелевого сплава, но содержит и более легкие элементы. Оно имеет внутреннюю твердую часть и внешнюю жидкую. Считается, что магнитное поле Земли образуется внешней частью ядра.

- австралопитек 322
- Агассиз, озеро 294
- Агассиз, Луи 293
- Адирондакские горы 77
- Азия 288
- Аккадское царство 327
- аккреция Земли — см. Земля, образование
- актуализма принцип 59
- Альварес, Луис 225
- алмазы 19
- Алеутский ров 115
- Альпы
 - образование 280
- аминокислоты
 - и происхождение жизни 46
- амниотическое яйцо 209
- амфибии — см. пресмыкающиеся
- андезит 107
- Андерс, Эдуард 228
- Антарктида
 - метеориты 26
- Аппалачские горы 77
- Аристотель 42
- архей 37
- археоптерикс 218
- астероиды 19
- Атлантический океан 14
- атмосфера
 - в архее 44
 - кислород в атмосфере 60
 - образование 36
 - природа первичной атмосферы 46
 - эволюция атмосферы в протерозое 62
- Ашер, Джеймс 6
- аэрозоли 250

- базальт 12
- Байкал, озеро 288
- бактерии 40

Бениоф, Хуго 104
Берджесс-Шэйл, сланцы 153
Берк, Кевин 199
Большой каньон 22
Бриггс, Дэрек 159
бриллианты — см. алмазы

Вааргафтиг, Клайд 205
Вадати, Кийуу 104
Вайн, Фред 93
валунная глина 300
варвиты — см. ледниковые варвиты
Вегенер, Альфред 83
Везувий, вулкан 105
Великое оледенение
 Висконсинский эпизод 298
 катастрофические наводнения во время оледенения 60
 ледяная летопись в керне скважин 246
 начало 330
 изотопно-кислородная хроника 298
 протяженность ледового покрова 294
 теория Миланковича 316
 шкала времени для великого оледенения 331
 циклы 309, 325

Венера 17
викинги 328

водоросли
 сине-зеленые 80
 фотосинтезирующие 64

возраст
 определение возраста в геологии — см. датирование геологическое

Восточно-Африканская рифтовая долина 101
время, геологическое — см. также датирование геологическое
 и шкала времени геологическая
 относительное время 73

вулканизм
 в зонах субдукции 102
 Деканские траппы 243
 океанический островной вулканизм 78
 опасность для человечества 349
 сибирские траппы 243
 хребта Каскады 299
вулканические газы 36

вулканический пепел 322
вымирание 164
см. также массовое вымирание

Гавайи 116
Гавайские острова 115
газо-гидраты 242
гематит 62
Гималаи 76
 хронология образования 108
гипс 250
глина валунная — *см.* валунная глина
глинистый сланец — *см.* осадочные породы
гоминиды

 и климат ледникового периода 320

Гондвана 315

горообразование

 образование Аппалачских гор 178

 в кайнозой 279

 и климат 288

границы геологические

 между археем и протерозоем 9

 между меловым и третичным периодами 9

 между пермским и триасовым периодами 9

 между протерозоем и кембрием 9

горячие точки — *см.* мантийные столбы

границы плит

 конвергентные 102–110

 дивергентные 100

 трансформные разломы 111

графит

 графит и возникновение жизни 48

Гренвиль, провинция 181

Гренландия 41

Гваделупе, остров 350

Гулд, Стивен Джей 42

Дарвин, Чарлз 11

датирование геологическое:

см. также Земля, возраст 6

 время, геологическое 8

 и шкала времени 9

 древнейших пород 299

деканские траппы — *см.* вулканизм

динозавры

вымирание — *см. также* массовое вымирание

окаменевшие остатки 213

размеры тела 210

температура тела 212

способ передвижения 213

дно океанов — *см.* морское дно

Дрейк, «Безумие» 338

Дэли, Джеймс 115

железное ядро Земли

образование 20

железистые толщи — *см.* полосчатые железистые толщи

жизнь

в архее 40

в палеозое 182

происхождение 42–54

запасы полезных ископаемых 338

вне Земли — *см. также* нефть

землетрясения

в зонах субдукции 104

волны землетрясений: *см.* сейсмические волны

опасность для общества 288

Земля

образование 15–16, 21

изверженные горные породы 12

магнитизация (намагничение) 91

образование 12

известняк 45

изотопы (*см. также* радиоактивные изотопы)

кислорода 129

кислородный изотопный палеотермометр 270

калия 136

радиоактивные 29, 137

Индия 68

иридий 226

Исландия 80

Йосемитский национальный парк 22

кайнозойская эра (кайнозой) 165

каменная летопись 10 — *см. также* окаменелые остатки
организмов

- каменноугольный период (карбон) 187
- каменноугольные болота 127
- каменный уголь 20 — *см. также* месторождения каменного угля
- карбонат кальция 144 — *см. также* известняк
- кварц 55
- Кельвин, Лорд 121
- кембрийский взрыв 147
- клетка 47
- климат
 - в кайнозое 270
 - оценка температур в прошлые эпохи 271
 - климат и вымирание 233
 - климат и эволюция гоминид 321
 - климат и человеческая цивилизация 327
 - на границе мела и третичного периода 248
 - в пермский период 194
 - в протерозое 67
- Килиманджаро 202
- кислород
 - в атмосфере 60
 - изотопы кислорода 273
 - кислород и озоновый слой 60–63
- кислотные дожди 228
- кобальт 342
- Коллинз, Мэриан 155
- комета Шумейкера-Леви 50
- Компстон, Уильям 32
- континентальный дрейф 84 — *см. также* тектоника плит
- континенты
 - древнейшие породы континентов 71
 - образование и эволюция 69
 - пассивные окраины континентов 170
- коралловые рифы 126
- космические лучи 132
- Кракатау, Индонезия 105
- Красное море 101
- краснослойные толщи 65
- Кричтон, Майкл 218
- Кролл, Джеймс 316
- кроманьонский человек 324
- Лаврентия 76
- ледниковые варвиты 67
- ледниковые осадочные породы 68

ледниковый период — *см.* оледенение и великое оледенение
 лёсс 303
 литосфера 19
 литосферные плиты 95 — *см. также* тектоника плит
 движение литосферных плит 96
 лошади
 древнейшие 264
 эволюция 266
 Луна
 возраст Луны 51
 лунные Апеннины 53
 кратеры на Луне 50
 бассейн Имбриум 54
 полезные ископаемые на Луне 342
 люди — *см.* человек

 Маврикий, остров 117
 магнитное поле Земли 16
 обращение полюсов 91
 магнетизм горных пород — *см. также* изверженные породы
 мантийные столбы 80
 мантия Земли 15
 конвекция в мантии 16
 Марс 17
 массовое вымирание
 причины 166
 на границе между мелом и третичным периодом 227
 пермо-триасовое 239
 позднепротерозойское 235
 массовое вымирание трилобитов 165
 мезозойская эра (мезозой) 165
 меловой период (мел) 201
 месторождения полезных ископаемых — *см. также* нефть
 месторождения каменного угля 187
 метаморфические породы 12
 определение возраста 138
 образование 13
 метан 43
 метеориты 25
 метеоритный кратер в Аризоне 346
 скопления в Антарктиде 26
 хондритовые метеориты (хондриты) 27
 Миланкович, Милутин 316
 Миллер, Стэнли 43

- млекопитающие
 - древнейшие 259
 - лошади 264
 - однопроходные 260
 - плацентарные 261
 - сумчатые 261
- модели общей циркуляции атмосферы 320
- морена 293
- Морли, Лоуренс 92
- Моррис, Конуэй 159
- Моррисон, Дэйвид 345
- морское дно
 - возраст 101
 - глубина 100
 - изучение 85
 - магнитные свойства и аномалии 89
 - расширение морского дна 96
 - рельеф 87
- Миссула, озеро 306
- муссоны 288
- насекомые 165
- неандертальский человек 324
- Невадо дель Руис (Колумбия) 350
- нефть 46
 - образование нефти 223
- Огненное кольцо 39
- однопроходные — см. млекопитающие
- озоновый слой 189
- окаменелости — см. окаменелые остатки организмов
- окаменелые остатки организмов
 - в берджесских сланцах 153
 - окаменелая древесина 150
- оледенение — см. также великое оледенение
 - антарктическое 276
 - кайнозойское 289
 - отступление ледников 305
 - Северного полушария 294
 - причины 314
- океаническая циркуляция 197
 - в кайнозойское 276
- океанические рвы (желоба) 102
- океанические хребты 88

- и изменения уровня моря 169
- океаны
 - замерзание древних океанов 36
 - дно океанов — *см.* морское дно
- окисление железа 63
- Опарин, Александр 43
- осадочные породы
 - глинистый сланец (шэйл) 171
 - древнейшие 122
 - и климат 194
 - образование 169
 - образование песчаников 32
 - определение возраста 124
 - эвапориты 195
- падения небесных тел на Землю
 - в будущем 333
 - в эпоху образования Земли 21, 49–50
 - и иридий 226
 - на границе между мелом и третичным периодом — *см. также* метеоритный кратер в Аризоне и Тунгусский метеорит
- падения небесных тел на Луну 50–51
- палеозойская эра (палеозой) 143
 - жизнь в палеозое 182
 - палеозойские осадки 164
- Панамский перешеек 258
- Пангея 163
 - раскол Пангеи 194
- папоротники 221
- парниковый эффект 44
 - газы и парниковый эффект 45
- пассивные окраины континентов 170
- Пасхи, остров 117
- Паттерсон, Клер 30
- пепел вулканический 322
- перемещенные территории — *см.* экзотические территории
- песчаник — *см.* осадочные породы
- Пинатубо, гора 105
- пирит 61
- планктон 222
- плейстоценовое оледенение — *см.* великое оледенение
- плит границы — *см.* границы плит
- плиты литосферные 13 — *см. также* тектоника плит
 - столкновения плит 102

поддвигание плит — *см.* субдукция
 позвоночные 182
 покровы вулканические 282
 полезные ископаемые
 месторождения — *см.* также нефть, запасы
 внеземные 342
 образование 339
 полосчатые железистые толщи 64
 Помпеи 105
 покрытосеменные — *см.* растения, цветение
 почва 33
 пояс астероидов 27
 пресмыкающиеся (рептилии) 165 — *см.* также динозавры
 звероящеры 210
 летающие 219
 яйца 186
 Проект глубоководного бурения 256
 прокариоты 80
 протерозойская эра (протерозой) 40
 птерозавр 219
 птицы 218
 пыльца (растений) 221

 радиоактивные изотопы
 образование 128
 использование для геологического датирования 135
 тепло, выделяющееся при распаде 130
 расположение континентов
 во время распада Пангеи 198
 в начале кайнозоя 263
 в начале кембрия 151
 в конце палеозоя 190
 растения
 вымирание на границе мела и третичного периода 228
 древнейшие ископаемые остатки 187
 растения суши 221
 формы листьев и климат 271
 цветковые 209
 Резерфорд, Эрнест 120
 рептилии — *см.* пресмыкающиеся
 ресурсы — *см.* запасы полезных ископаемых
 Реюньон, остров 117
 рифты 100
 Рифтовая долина Восточной Африки 101

- рыбы 165
 - двоякодышащие 185
 - челюстноротые 183
- Сан-Андрэас, разлом 109
- Сан-Франциско, Калифорния 205
- Св. Елены, остров 140
- Северная Америка, западная часть
 - вулканизм 203
 - осадочные породы 207
 - остатки динозавров 210
 - субдукция вдоль 205
- сейсмические волны 228
- семена 188
- сернистый газ 243 — *см. также* вулканические газы
- серпентин 205
- сибирские траппы — *см.* вулканизм
- Смит, Уильям 122
- Солнце 21
- соляные купола 21
- столкновение плит 102
- спайка тектонических плит 286
- споры 247
- Средиземное море
 - высыхание 197
- стегозавр 212
- Стейнбек, Джон 327
- Стенон, Николай 123
- Стоммел, Генри 353
- Стоммел, Элизабет 353
- столбы — *см.* мантийные столбы
- строматолиты 56
- субдукция 102
 - зоны субдукции 102
 - в районе Средиземного моря 281
- сумчатые — *см.* млекопитающие
- Сьерра-Невада, горы в Калифорнии 20
- Таити, остров 117
- Тамбора, гора 353
- тектоника плит
 - длительность ее 117
 - и вулканизм 115
 - и образование континентов 83
 - и эволюция млекопитающих 259, 261

- столкновения плит 102
- теория 96
- тепличный эффект — *см.* парниковый эффект
- Тэтис, океан (пролив) 197
- Тибетское плато 108
- тиль (валунная глина) 300
- Томмотианская фауна 149
- Тонга, желоб (ров) 105
- травяные степи 265
- трансформные разломы 111
- траппы Декана — *см.* вулканизм
- траппы сибирские — *см.* вулканизм
- трилобиты 151
- трицератопс 212
- Тунгусский метеорит 348
- углекислота
 - в ранней атмосфере Земли 45
 - и массовое вымирание 243
- углекислый газ — *см.* углекислота
- углерод 18
- Уилсон, Тьюзо 115
- Уиттингтон, Харри 157
- Уолкотт, Чарлз Дулитл 157
- Уолф, Джек 271
- Уральские горы (Урал) 181
- уранинит 61
- уровень моря (океана)
 - во время Великого оледенения 311
 - в течение мезозойской эры 192
 - в течение палеозойской эры 162
 - в течение кайнозойской эры 254
 - изменения 169
- фотосинтез 46
- Фудзи, гора 105
- Хаттон, Джеймс 300
- хлоропласт 81
- хондриты — *см.* метеориты
- Хоффман, Пол 70
- цианофиты 80
- циркон 32

цунами 229

человек

человек прямоходящий (*Homo erectus*) 324

человек разумный (*Homo sapiens*) 161, 324

Ченнэлд Скаблендз 306

Чепмэн, Кларк 345

черт (кремнистый сланец) 221

Чикхулуб, кратер в Мексике 229

чужеродные территории — см. экзотические территории

Шкала времени, геологическая 8, 9

для кайнозоя 254

для мезозоя 192

для палеозоя 162

для протерозоя 58

шовная зона 110

Шри-Ланка 110

Шумейкера-Леви комета — см. комета Шумейкера-Леви

эвапориты — см. осадочные породы

эукариоты 81

эволюция

в кембрии 153–161

тектонические плиты и эволюция 258, 261

Эдиакаранская фауна 148

экзотические территории 204

эоиппус — см. лошади

эрозия 11

Юпитер 27

Юри, Харолд 43

ядро Земли 19

образование 21

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Для читателей, которым будет интересно более углубленно познакомиться с некоторыми из тем, обсуждавшихся в этой книге, предлагаемый ниже список книг может послужить в качестве отправных пунктов. Этот список никоим образом не может считаться полным, но многие из перечисленных в нем книг, особенно последние учебники, содержат весьма пространный библиографию по широкому кругу тем, относящихся к наукам о Земле.

ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

Физическая геология — это геология без исторического контекста. Она сосредоточивается на процессах, физических и химических, которые формируют нашу планету. Вводные курсы геологии часто представляют собой именно курсы физической геологии и по этому разделу геологии имеется много хороших учебников. Ниже перечислено несколько последних изданий, с которыми я знаком. Есть и несколько других, которые, вероятно, не хуже, но с которыми я не так хорошо знаком.

B. J. Skinner and S. C. Porter. *The Dynamic Earth* (3rd Edition). John Wiley and Sons, Inc., 1995.

S. Judson and S. M. Richardson. *Earth, An Introduction to Geologic Change*. Prentice Hall, Inc., 1995.

F. Press and R. Siever. *Understanding Earth*. W. H. Freeman & Company, 1994.

W. K. Hamblin. *Earth's Dynamic Systems* (6th Edition). McMillan Publishing Company, 1992.

ИСТОРИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

Перечисленные ниже книги представляют собой учебники, в которых излагается значительная часть того материала, который обсуждался в данной книге.

R. H. Dott, Jr., and D. R. Prothero. *Evolution of the Earth* (5th Edition). McGraw-Hill, Inc., 1994.

Хорошо иллюстрированный и полный учебник, охватывающий всю историческую геологию.

S. M. Stanley. *Earth and Time through Time* (2nd Edition). W. H. Freeman and Company, 1989.

Многочисленные фотографии и рисунки способствуют углубленному пониманию идей, представленных в тексте.

ЖИЗНЬ И ЭВОЛЮЦИЯ

R. Cowen. *History of Life*. Blackwell Scientific Publications, 1990.

Основательный, современный и хорошо изложенный рассказ об эволюции, от начала жизни на Земле и до *Homo sapiens*. Написана в качестве вводного учебника по этому предмету.

S. J. Gould, *Wonderful Life*. W.W. Norton & Company, 1979.

Дискуссия о сущности эволюции с точки зрения «кембрийского взрыва», особенно подробно анализируются окаменелости сланцев Берджесс-Шэйл в Британской Колумбии.

ВЫМИРАНИЕ ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ

S. M. Stanley. *Extinction*. Scientific American Books, Inc., 1987.

Приятно написанная книга содержит подробное обсуждение массовых вымираний и их возможных причин. Много сведений о вымираниях на границах пермь—триас и мел—третичный период.

ОЛЕДЕНЕНИЯ

J. Imbrie and K. P. Imbrie. Ice Ages: Solving the Mystery. Enslow Publishers, Short Hills, N. J., 1979.

Очень легко читаемый рассказ об историческом развитии идей о континентальном оледенении, начиная с Луи Агассиза и кончая современными взглядами.

ТЕКТОНИКА ПЛИТ

H. W. Menard. The Ocean of Truth. Princeton University Press, 1986.

Интересный рассказ о развитии идей теории плит, написанный геологом, который сам участвовал во многих аспектах революции в науках о Земле и который был лично знаком с большинством главных ее участников. Хотя все перечисленные выше учебники содержат ясный рассказ о предмете тектоники плит, эта книга дает много исторического материала.

КЛИМАТ И ЕГО ИЗМЕНЕНИЯ

H. H. Lamb. Weather, Climate and Human Affairs. Routledge, 1988.

Собрание статей и очерков, в которых подробно анализируются причины и следствия изменений климата, преимущественно в рамках исторического периода.

H. Stommel and E. Stommel. Volcano Weather. Seven Seas Press, 1983.

Эта книга имеет подзаголовок «История 1816 года — года без лета». Авторы исследовали последствия извержения вулкана Тамбора, происшедшего в 1815 году в Индонезии, и описали в этой великолепной книжке полученные ими результаты.

R. Claiborne. Climate, Man and History. W. W. Norton & Company, 1970.

Живо и хорошо написанный рассказ о климате, о ледниковых периодах, о воздействии климата на эволюцию человека и о многих других связанных с климатом вещах.

НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ
(ДОПОЛНЕНИЕ ПЕРЕВОДЧИКА)

А. С. Монин. История Земли. Л.: Наука (Ленинградское отделение), 1977.

СОДЕРЖАНИЕ

Благодарности	5
Глава 1. Как читают камни?	6
Глава 2. Первые дни	24
Глава 3. Чудо жизни	42
Глава 4. Протерозойская эра	59
Глава 5. Танец плит	83
Глава 6. Природные часы	120
Глава 7. Кембрийский взрыв	143
Глава 8. Рыбы, леса и континент Гондвана: палеозойская эра	163
Глава 9. От Пангеи до (почти) современного мира: мезозойская эра	193
Глава 10. Мировые катастрофы	225
Глава 11. Млекопитающие, горы и лед: кайнозойская эра	255

Глава 12. Великое оледенение	291
Глава 13. Что будет дальше? Геология и человек	332
Глоссарий	355
Указатель	366
Рекомендуемая литература	378

ДЖ. Д. МАКДУГАЛЛ

Краткая история планеты Земля

Горы, животные, огонь и лед

Ответственный редактор *Елена Шипова*
Литературный редактор *Борис Волков*
Художественный редактор *Алексей Горбачев*
Технический редактор *Любовь Никитина*
Корректор *Татьяна Васильева*
Верстка *Наталии Нагиной*

Налоговая льгота — общероссийский классификатор
продукции ОК-005-93, том 2; 953000 — книги, брошюры.

Подписано в печать 25.04.2001.

Формат 80×100¹/₃₂. Печать высокая.

Усл. печ. л. 17,76. Тираж 5000 экз.

Заказ № 474.

ИД № 02164 от 28.06.2000

«Торгово-издательский дом „Амфора“»

197022, Санкт-Петербург, наб. реки Карповки, 23.

E-mail: amphora@mail.ru

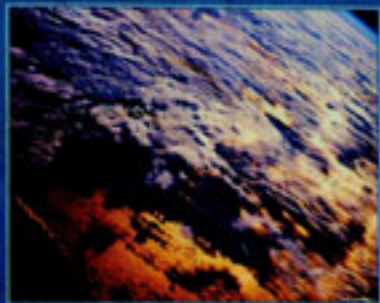
Отпечатано с фотоформ

в ФГУП «Печатный двор» им. А. М. Горького

Министерства РФ по делам печати,

телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

197110, Санкт-Петербург, Чкаловский пр., 15.



Сознание человека не в состоянии охватить глобальные катастрофы, пережитые нашей планетой за миллиарды лет ее существования. Рождались и гибли океаны, вырастали и рушились горные цепи.... С лица земли исчезло то, что было некогда ее украшением.

Откуда мы обо всем этом знаем? Иногда это результат лабораторных исследований, математических построений, а часто — логических умозаключений...

Цель этой книги — утолить вашу жажду знаний, ибо мало что может сравниться с радостью постижения тайн окружающего мира и твоего места в нем.