

The Inaccessible Earth

G. C. Brown
Open University

A. E. Mussett
Liverpool University

London
GEORGE ALLEN & UNWIN
Boston - Sydney

Д. БРАУН
А. МАССЕТ

Д. БРАУН
А. МАССЕТ
Земля

Перевод с английского
канд. геол.-мин. наук Б. А. Борисова

под редакцией
д-ра физ.-мат. наук В. Н. Жаркова

МОСКВА «МИР» 1984

ББК 26.3
Б87
УДК 551.1

Браун Д., Массет А.

Б87 Недоступная Земля: Пер. с англ.—М.: Мир, 1984.—262 с., ил.

Книга, написанная английскими учеными геохимиком Д. Брауном и геофизиком А. Массетом, знакомит читателя с современными представлениями о строении, развитии и динамике Земли. В единой последовательности, на основе последних достижений науки, рассматриваются происхождение Солнечной системы, планет, их эволюция и современное строение. Подобная прекрасно иллюстрированная книга, охватывающая практически все аспекты этой темы и излагающая их на достаточно высоком научном уровне и одновременно популярно, в отечественной литературе отсутствует.

Для геологов, преподавателей, аспирантов и студентов геологических специальностей, а также читателей, интересующихся вопросами образования, строения и развития Земли и других планет Солнечной системы.

Б $\frac{1904030000-250}{041(01)-84}$ 119-84, ч. 1

ББК 26.3

552

Редакция литературы по геологии

© G. C. Brown and A. E. Mussett, 1981
© Перевод на русский язык, «Мир», 1984

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

На современном этапе исследований все разделы наук о Земле сложным образом переплетаются друг с другом, поэтому уже с первых шагов необходимо обладать определенным минимумом знаний по геологии, геофизике и геохимии, чтобы адекватно понимать практически любой вопрос, так или иначе связанный со строением и эволюцией Земли. С другой стороны, быстрое развитие науки о Земле и специализация ее различных дисциплин заметно усложнили проблему написания хорошего элементарного вводного курса по этим проблемам.

Предлагаемая вниманию читателя книга написана двумя молодыми английскими преподавателями, один из которых является геохимиком (Браун), а другой – геофизиком (Массет). В результате мы имеем дело с книгой, которая представляет собой введение в физику и химию Земли.

Так как читательская аудитория, которой адресована книга, весьма неоднородна по своей физико-математической подготовке, то авторы, стремясь создать универсальный вводный курс, свели использование формул к разумному минимуму при достаточно строгом и ясном изложении основных понятий. Интересной особенностью данного учебника о строении, составе и истории различных оболочек Земли является и то, что в нем, пожалуй впервые в мировой учебной литературе, геохимический аспект проблемы играет ведущую роль.

Изложение предмета построено так, что протягивается цепочка от происхождения элементов к происхождению Солнечной системы и планет, их эволюции и, наконец, к их современному строению. Такое построение учебника нам представляется методически совершенно правильным.

Книга состоит из десяти глав и десяти коротких математических дополнений.

Во введении дается постановка задачи и кратко излагается история основных идей о Земле.

Вторая глава посвящена сейсмологии – основной геофизической дисциплине, данные которой позволяют установить структуру земных недр. Моделям Земли, т.е. установлению распределения плотности, посвящена третья глава. В четвертой главе рассмотрены проблемы, связанные с образованием Солнечной системы и распространенностью элементов. Аккреция и химическая расслоенность планет земной группы обсуждаются в пятой главе. Проблемы, связанные с ядром Земли – его энергетика, генерация магнитного поля, – составляют содержание шестой главы. Строение и состав мантии и океанической коры обсуждаются в седьмой главе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цикл вопросов, связанных с геодинамикой, рассматривается в восьмой главе. Девятая глава посвящена строению и составу, а десятая – эволюции континентальной коры. Каждая глава заканчивается кратким резюме.

Говоря об этой интересной и обладающей высокими педагогическими качествами книге, нельзя не отметить прекрасный подбор иллюстраций. Можно полагать, что книга Брауна и Массета будет хорошим дополнением к имеющейся на русском языке литературе, касающейся внутреннего строения Земли.

В. Жарков

В этой книге речь пойдет о Земле: о ее образовании, развитии и в особенности о ее нынешнем внутреннем состоянии и вещественном составе. Именно здесь встречаются две крупные отрасли современных наук о Земле – геофизика и геохимия, хотя в учебниках для студентов редко можно найти обобщенные геофизические и геохимические данные о внутренних частях Земли.

Наши представления о земных недрах претерпели в последние два десятилетия удивительно глубокие изменения, и хотя в будущем, несомненно, эти представления сильно изменятся, все же имеются признаки того, что прогресс в науках о Земле пойдет прежде всего в направлении консолидации современных идей, что соответствует куновской¹ фазе «закрепления на занятых рубежах». Поэтому задача авторов настоящей книги состояла в объединении различных современных данных, причем не только данных геофизики и геохимии, но и отдельных отраслей астрономии, метеоритики и т. д. Именно широта и разнообразие источников информации делают эту задачу столь увлекательной, однако из-за того, что имеющиеся сведения рассредоточены в многочисленных статьях и книгах, мало понятных неспециалисту, они редко попадают в поле зрения студентов.

Поскольку наша книга рассчитана в большей мере на читателей с широкими интересами, чем на специалистов, мы стремились разъяснить основные физические и химические принципы и использовали математику лишь в очень малой степени. В дополнениях, введенных в текст (они набраны петитом), изложены особенно трудные теоретические выводы, которые мы считали важными для наиболее заинтересованных и специализирующихся в данной области читателей. Для менее подготовленных читателей в конце книги даются приложения, в которых приводятся некоторые фундаментальные сведения, имеющиеся в большинстве курсов для студентов. Каждая глава заканчивается списком литературы, рекомендуемой для дальнейшего чтения. В эти списки включены доступные для широкого круга читателей обзорные работы и специальные руководства, а также недавно опубликованные статьи, с помощью которых можно ориентироваться в научных публикациях. Желаящие проникнуть глубже в изучаемый предмет могут воспользоваться списком литературы, помещенным в конце книги. В этот список включены все цитируемые работы, за исключением самых старых. На форзацах книги (в начале и в конце) размещены две таблицы, суммирующие разнообразные сведения о Земле и позволяющие их легко сопоставить.

¹ Томас Кун (Kuhn; род. 1929) – американский философ и историк науки. Автор концепции научных революций как смены способов постановки проблем и методов исследования, господствующих в науке определенного исторического периода (Кун Т. Структура научных революций. – М.: Прогресс, 1977, 300 с.) *Прим. перев.*

Если какие-либо суждения, приведенные в книге, не будут благожелательно встречены корифеями нашей академической науки, то ответственность должна лежать только на нас двоих – авторах книги. Но если окажется, что мы достигли своей цели, и книга получилась доступной и интересной для студентов, то мы хотели бы передать горячую благодарность всем нашим друзьям и коллегам, которые помогли нам, прочитав и обсудив с нами первые варианты глав. В особенности мы благодарны Биллу Файфу, Яну Гассу, Питеру Харрису, Афтабу Хану, Ричарду Куперу, Питеру Дагли, Питеру Франсису, Бобу Мак-Коннеллу, Керри Палмеру, Ричарду Торпу, Роду Уилсону и Брайану Уиндли. Мы признательны также двум нашим машинисткам – Полине Лайберт и Сью Хартнетт, которые напечатали массу вариантов текста, часто под жестоким нажимом нетерпеливых авторов. Наконец, Дж. Браун глубоко благодарен своей жене Джоан и детям за их терпеливое и ободряющее участие в течение долгих часов подготовки этой книги, когда он не мог уделить семье должного внимания; что касается А. Массета, то он, слава богу, никому не досаждал, так как у него нет жены.

1. Введение

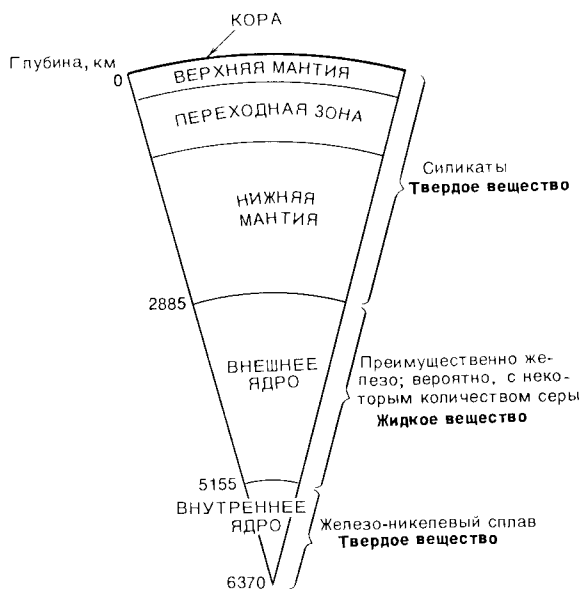
1.1. Цели и намерения. Эта книга – о внутренних областях Земли. В ней обсуждаются ответы на такие вопросы, как вопрос о том, из чего сделана Земля, как она ведет себя? Иными словами, какие *химические элементы* присутствуют в разных ее частях и как они группируются в соединения, из которых образованы минералы и горные породы? Какими *физическими свойствами* обладают эти минералы и породы: жидкие они или твердые, проводят ли они электричество и т.д. Известно, что недра Земли – это динамическая система. Об этом говорит подвижность земной поверхности, выражающаяся, например, в движении континентов, что в свою очередь порождает еще два важных вопроса: какие силы и какие процессы действуют в Земле и какие изменения претерпела наша планета со времени своего формирования около 4600 млн. лет назад?

Нам хотелось бы ответить на эти и другие вопросы, но трудность состоит в том, что большая часть земных недр недоступна для непосредственного изучения и наблюдения. Правда, на поверхности найдены породы, поднявшиеся по алмазонасытым кимберлитовым трубкам и через жерла других вулканов с глубин до 200 км, но чем глубже область их образования, тем вероятнее, что во время подъема на поверхность они сильно изменились. К тому же и 200 км – это всего лишь малая доля радиуса Земли (6370 км): так что сколь ни ценна такая информация, она совершенно недостаточна для того, чтобы выяснить общий состав земных недр.

Проблема недоступности не имеет простого решения. Поэтому нам приходится искать и комбинировать очень разнородные данные, но именно это разнообразие источников информации делает наше изучение таким увлекательным. Астрономия, астрофизика, ядерная физика, физика планет, равно как геофизика, геохимия и геология, – все эти отрасли знания играют при этом определенную роль. Зачастую те или иные сведения, казалось бы, только сужают возможности наших теоретических построений, но если таких ограничений накопится достаточно много и мы сможем их все учесть, то получим хорошее приближение к истинному составу Земли. Например, в настоящее время считается, что земное ядро состоит главным образом из железа, потому что только железо обладает необходимой плотностью, потому что оно проводит электричество (это свойство требуется для создания магнитного поля Земли), и потому что оно имеется, вероятно, в достаточном количестве. Никакое другое вещество не отвечает всем этим требованиям. Но перед тем, как приступить к обсуждению этих методов познания, мы хотим дать читателю представление о подходе, использованном в этой книге, и ее общих выводах.

1.2. «Недоступная Земля»: план и содержание книги. Чтобы упростить изложение, авторы избрали такой план построения книги, который позволяет логично переходить от одного вопроса к другому, но не обязательно соответствует строгой хронологии развития наук о Земле.

Сведения о внутренних областях Земли мы получаем прежде всего от сейсмологии – науки, теснее всех связанной с земными недрами. Землетрясения порождают волны, которые, прежде чем выйти на поверхность на большом удалении от очага, проникают



в глубокие внутренние области планеты. Существует несколько видов сейсмических волн, и пути распространения разных волн зависят от того, как изменяются скорости этих волн внутри Земли, а следовательно, от физических свойств внутренних областей. Кропотливый анализ сейсмических записей, полученных на регистрирующих станциях, которые разбросаны по всему миру, как раз и дает возможность установить, как меняется скорость сейсмических волн внутри Земли. Образующаяся в результате такого анализа картина близка к схеме концентрически расслоенной Земли, в которой четче всего выделяется раздел—приблизительно на полпути от центра,—соответствующий переходу от твердого вещества (*мантия*) к жидкости (*ядро*). Однако имеется и много других разделов или резких переходов; некоторые из них показаны на рис. 1.1, а более полный обзор дается на форзаце в конце книги.

Чтобы узнать, связаны ли эти разделы с изменением состава, температуры или других параметров, мы обращаемся к плотности—наиболее важной характеристике, которую можно определить с достаточной точностью. Значения плотности вычисляются путем соединения данных сейсмологии со сведениями о массе Земли, полученными из ее гравитационного притяжения и из ее момента инерции, который определен по движению, или прецессии, ее оси вращения. Получаемое таким способом изменение плотности с глубиной внутри Земли определяется неоднозначно, но допустимые пределы значений плотности для большинства глубин достаточно узки, так что мы можем поставить следующий вопрос: какому материалу соответствует значение плотности, вычисленное для каждой конкретной глубины?

Очевидно, нужную плотность может иметь множество материалов, поэтому к чисто физическим данным, использованным до сих пор, надо добавить другие типы сведений, которые накладывали бы ограничения на возможный химический состав Земли. Например, согласно современным теоретическим представлениям об образовании Солнечной

системы, Солнце и планеты конденсировались из облака, или *туманности*, состоящей из газа и пыли. Важную роль для формирования этих представлений играют *метеориты*, поскольку считается, что они характеризуют ранние стадии процесса образования планет. Как полагают, некоторые метеориты очень близки по составу к первичной туманности и, следовательно, по ним можно приближенно оценить общий вещественный состав Земли.

Из материалов сейсмических исследований хорошо известно, что Земля не однородное тело: химические элементы разделены на разные группы, или *дифференцированы*, и образуют разные слои, о которых говорилось выше. Дебатируется вопрос о времени дифференциации, но в вопросе о том, что сегрегация элементов произошла частично уже во время образования Земли, а частично в ходе последующего развития, существует общее согласие. В последние десятилетия при исследованиях земной коры было доказано, что некоторые процессы дифференциации развиваются в течение всей истории Земли, хотя и с убывающей во времени силой. При заданных ограничениях по температуре и величине изменения давления в Земле для предсказания возможных сочетаний химических элементов, способных устойчиво сосуществовать как минералы на разных глубинах, можно использовать простые правила геохимии. Мы в состоянии применить такие соображения последовательно к каждой области внутри Земли совместно с другой подходящей информацией.

Первая рассматриваемая область – ядро. Оно состоит в основном из железа. Однако необходимо решить следующие проблемы: определить, какие малые количества других элементов должны там присутствовать, чтобы можно было привести плотность ядра в соответствие с вычисленными изменениями плотности во всем ядре; объяснить существование твердого внутреннего ядра; найти источник энергии, необходимой для создания магнитного поля Земли.

Следующая при движении от центра Земли к ее поверхности область – мантия. Полагают, что ее устройство гораздо сложнее, поскольку она состоит из большего, чем ядро, числа элементов, присутствующих в значительных количествах, и поскольку различные минералы, образовавшиеся из этих элементов, изменяют свою *кристаллическую структуру* при увеличении или уменьшении давления и температуры. Кроме того, в верхней мантии температура близка к температуре плавления вещества, что имеет важное значение по двум причинам. Во-первых, эта часть мантии становится более пластичной по отношению к длительно действующим напряжениям, а во-вторых, там может образоваться жидкая фракция, или расплав, что приводит при подъеме этого расплава к поверхности к магматической деятельности. Пластичность мантии позволяет самой внешней полужесткой оболочке Земли – *литосфере* – двигаться как по вертикали, так и в горизонтальном направлении посредством тепловой конвекции, ведущей к горообразованию и к континентальному дрейфу. Если бы этих движений не было, поверхность Земли стала бы почти гладкой и однообразной.

Кора, самая верхняя часть литосферы, – наиболее сложная область Земли, поскольку такие циклические процессы, как осадконакопление, метаморфизм и магматизм, неоднократно перерабатывающие ее вещество, приводят к крайней степени дифференциации химических элементов. Мы займемся здесь результатами изучения (главным образом с помощью методов стратиграфии и петрологии) крупных особенностей континентальной коры и процессов, посредством которых осуществляются теплообмен и перенос материала между корой и верхней мантией. Континентальная кора развивается в ходе геологического времени необратимо, и ее объем, вероятно, при этом сильно увеличивается за счет верхней мантии. Из-за того что за 4600 млн. лет истории Земли континентальная кора

разрослась и стала толще, а теплогенерация радиоактивного распада уменьшилась, характер и интенсивность горообразования и других важнейших тектонических процессов, вероятно, изменились. В ходе эволюции Земли менялись состав атмосферы, типы отлагавшихся осадочных пород и сама жизнь.

1.3. История представлений об устройстве Земли. Этот раздел посвящен истории наших знаний о Земле и ее недрах. На протяжении всей многовековой истории науки человечество располагало очень небольшим объемом данных о внутреннем строении Земли, и получить их удалось, только опираясь на самые последние достижения физики, химии, астрономии и геологии. Важно, однако, отметить, что наука о Земле никогда не была где-то на задворках. Напротив, часто она оказывалась на переднем крае знания, возбуждая споры, например, между сторонниками теории спонтанного возникновения жизни и сторонниками природной эволюции или между теми, кто буквально воспринимал библейские сказания о возрасте Земли, и теми, кто изучал радиоактивность или медленные геологические процессы.

Все уже привыкли, что в обзорах такого рода принято начинать с древних китайцев или греков или даже, при особо большой эрудиции, с еще более ранних цивилизаций. В нашем случае это греки. В период от 600 до 200 г. до н. э. они умели поразительно умно ставить вопросы и строить предположения и тем самым оказали сильное воздействие на формирование современных идей, в особенности через сочинения Аристотеля. Геологические темы представляли для античных философов второстепенный интерес, но они считали, например, что суша может быть затоплена морем и может подняться вновь. Они понимали, что ископаемые окаменелости — это остатки организмов, захороненных в древних морях. Они знали, что Земля представляет собой сферу, и нашли способ измерять ее радиус с точностью до нескольких процентов. Они предполагали также, что в центре Земли бушует внутренний огонь, и эта мысль возрождалась в истории науки несколько раз. Один из философов, Аристарх (310–250 гг. до н. э.), даже выдвинул гелиоцентрическую теорию движения планет (т. е. их вращения вокруг Солнца), но эта идея не нашла поддержки, и почти всеобщим признанием вплоть до XVI в. н. э. пользовалась геоцентрическая теория (о движении небесных тел вокруг Земли).

Научные суждения древних греков имели один серьезный недостаток: чересчур большую роль играли изящные умозаключения, а наблюдению и эксперименту уделялось мало внимания. Например, Сократ исключил из своего логического класса одного ученика за то, что тот считал, что лучший способ узнать, сколько зубов у лошади, — это открыть лошади рот и посчитать зубы. В результате такого упора на умозаключения греки не могли развить многие из своих идей дальше стадии рассуждения.

Накопленные греками знания были усвоены римлянами, но с падением Рима в V в. н. э. они почти полностью были утрачены и сохранились только в Византийской империи. Однако многое из достижений древней науки проникло в исламский мир и через него было передано на Запад вместе с другими знаниями, такими, как десятичная система счисления, возникшая в Индии. Вначале средневековая Европа относилась к этим «языческим» знаниям подозрительно, но постепенно христианская мысль примирилась с ними, в чем главную роль сыграли философы-схоласты, среди которых выделялся (как тучностью, так и интеллектом) Фома Аквинский (1225–1274). В результате всего этого работы Аристотеля приобрели очень высокий авторитет, уступавший только авторитету Священного писания. Приток новых идей на Запад дал толчок большому подъему науки, великим открытиям и всеобщей жажде знаний, характерной для эпохи Возрождения. Но, как мы знаем, прежде чем мог осуществиться расцвет науки, кто-то должен был

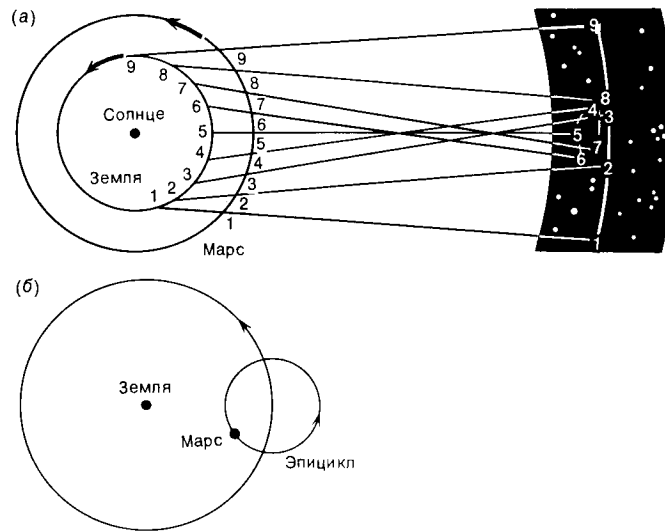


рис. 1.1. Две планеты (при этом Земля — в центре) движутся по орбитам, которые совпадают с линией зодиака. Солнце и планетные сферы движутся при наблюдении каждой планеты с Земли так, как если бы планеты сами двигались своим движением по земной орбите. Цифры обозначают положение Земли и Марса в один и тот же момент времени. Рисунки взяты из трактата Коперника «Об обращениях планет».

рис. 1.2. Планета Марс движется по орбите вокруг Земли. В то же время Марс движется по эпициклу, который вращается вокруг Земли. Планетное движение относительно Земли — сложное движение. Рисунки взяты из трактата Птолемея «Математическая синтаксис».

бросить вызов вере в непогрешимость авторитетов при решении спорных вопросов; потребовалось длительное время, пока не было понято, что непосредственное наблюдение может опровергнуть официальное мнение знатных персон (и сейчас практика не вполне в ладах с этим лозунгом!). Нам трудно сейчас представить, какова была истинная природа этой революции в мышлении: требовалось, вероятно, исключительное мужество, чтобы убедить людей в возможности рационального (т.е. посредством разума) исследования мира, где жили, по господствовавшим верованиям, ведьмы и гиппогрифы (крылатые кони), а в минералогии процветала идея об образовании драгоценных камней в жабьих головах. Но мало-помалу наблюдение стало считаться главным судьей.

Многих не могла удовлетворить геоцентрическая теория, согласно которой Земля неподвижно располагалась в центре Вселенной. Одним из этих многих был поляк Коперник (1473–1543). Господствовавший тогда вариант геоцентрической теории был разработан Птолемеем, жившим в Египте в 90–168 гг., а по другим данным, около 87–165 гг. новой эры. Чтобы объяснить, почему планеты иногда перемещаются по небу как бы вспять (рис. 1.2), Птолемей предположил, что они движутся по эпициклам. Вероятно, Коперник пришел к своей идее о гелиоцентрической системе, прочитав сочинение Аристарха: он в значительной мере признал это в одном из абзацев своего сочинения, который затем вычеркнул. Чтобы избежать нападок церкви за то, что Земля была убрана из цен-

тра мироздания, один из друзей Коперника, взявшийся издать его произведения, предпослал изложению гелиоцентрической теории предисловие, в котором заявлял, что эта теория – просто удобный способ упростить вычисления!

Тихо Браге, датчанин, живший в 1546–1601 гг., не принял теории Коперника, но он в отличие от Коперника был выдающимся наблюдателем и получил новые, сильно улучшенные данные, которые позволили Кеплеру (1571–1630), его немецкому помощнику, описать законы движения по эллиптическим орбитам, полностью исключая эпициклы. Работы Галилея (1564–1642) также помогли доказать несостоятельность системы Птолемея; в результате Галилей навлек на себя гнев итальянской инквизиции, которая заставила его отречься от своих идей. Умирая, Галилей запретил ставить на своей могиле памятник, желая, чтобы он сам и его работы были забыты. – напрасная надежда, ибо в год его смерти в Англии родился Ньютон.

Сэр Исаак Ньютон (1643–1727) внес свой вклад в эти всемирные достижения, создав теорию всемирного тяготения. Он показал, что если бы сила притяжения между двумя телами была пропорциональна произведению их масс m и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними d , т.е.

$$F \propto \frac{m_1 m_2}{d^2},$$

то это, естественно, дало бы эллиптические орбиты. На Ньютона при разработке его теории отчасти оказал влияние труд Уильяма Гильберта, придворного врача королевы Елизаветы I, написавшего первый геофизический трактат, в котором он представил объяснение магнитного поля Земли. Ньютон не мог непосредственно проверить свою теорию тяготения, так как для этого надо было бы измерить в лаборатории очень малые силы, действующие между двумя массами. Однако он теоретически доказал, что под действием силы тяжести и центробежной силы Земля должна иметь экваториальное вздутие. Попытки французов измерить форму Земли привели сначала к выводу, что наша планета вытянута вдоль своей оси. Чтобы решить этот вопрос, Французская академия организовала в течение десятилетия (1735–1745 гг.) экспедиции к различным широтам, и с помощью собранных материалов было доказано, что экваториальное вздутие существует, т.е. что Земля не растянута, а сплюснута вдоль оси.

Создание Ньютоном теории тяготения и законов движения знаменует собой водораздел в развитии современной науки, отделяя ее от средневековой веры и алхимии. Поэтому нам кажется поразительным тот факт, что сам Ньютон считал многие свои научные открытия лишь незначительной частью своей работы, а большая часть его сочинений, содержащих 20 миллионов слов, относилась к вопросам геологии и к таким почти невозможным темам, как топология (т.е. поиски местоположения. – *Перев.*) ада.

Прогресс в геологии не был столь драматичным. Это наука описательная, и первые исследователи могли выяснить ее закономерности только путем кропотливого накопления многочисленных наблюдений, а не в результате изящных математических озарений, как это было в астрономии и физике. Однако изучение слоев горных пород, имевшее практическое значение для горного дела и строительства, было только началом систематической геологии. Постепенно утвердилась идея об отложении осадков из воды, но содержащиеся в этих осадках окаменелости вызывали большое смущение и споры. В середине века и позднее к окаменелостям относили не только остатки животных и растений, но и странной формы минеральные образования. Предполагалось к тому же, что окаме-

целости могут самозарождаться в горной породе. Но уже Леонардо да Винчи (1452–1519) хорошо понимал, что окаменелости, обнаруженные глубоко в земле, – это остатки давно погибших существ и что их нельзя связывать с библейским потопом. Стенон (1638–1686) четко сформулировал и доказал некоторые правила стратиграфии; он, например, вывел закон суперпозиции (закон напластования), согласно которому самый нижний слой должен быть самым древним; тем самым Стенон проложил дорогу геологическому картированию по относительному возрасту пород. Уильям Смит (1769–1839), инженер-геодезист и строитель каналов, использовал эти идеи на практике; кроме того, он использовал окаменелости для сопоставления слоев горных пород, наблюдаемых в разных местах. В 1815 г. Смит составил первую (раскрашенную вручную) геологическую карту Британии, а на следующий год опубликовал книгу об использовании окаменелостей для разделения горных пород по их возрасту («Strata identified by organised fossils»).

В научном методе глубоко укоренился принцип, известный как принцип «бритвы Оккама»¹, согласно которому для объяснения чего-либо не следует применять две гипотезы, если можно обойтись одной. Но некоторые геологи доводят экономию гипотез до фанатизма и провозглашают всеобъемлющую ценность своих теорий, забывая, что если в лаборатории все условия тщательно контролируются, то за ее пределами могут одновременно действовать многие, не связанные между собой процессы. Например, нептунисты поднимали значение воды при формировании горных пород до такой степени, что объясняли этим ни много ни мало как образование всей твердой Земли. Эту теорию отстаивал Абрахам Вернер (1750–1817), профессор Фрейбергского университета, считавший, что практически все породы образовались либо путем осаждения, либо в результате кристаллизации в Мировом океане. Теория была простой, но многие ее положения были произвольными, и их нельзя было проверить. Нерешенной проблемой оставался неизвестный, но очень большой объем воды, причем не только потому, что вода должна была исчезнуть после первого образования пород, но и потому, что она должна была возвращаться в последующие эпохи отложения осадка (библейский потоп считался только самой поздней из многих таких эпох).

Нептунистам противостояли плутонисты. Принципы их учения были выражены сэром Джеймсом Геттоном (1726–1797) из Эдинбурга в книге «Теория Земли» – одном из важнейших геологических произведений, когда-либо написанных. Плутонисты не возражали против того, что отложение осадочного материала действительно имело место, но они считали, что этот процесс не мог привести к образованию прочных пород без воздействия тепла. Их теория была не так проста, как теория нептунистов, но в соответствии с их взглядами Земля уже приобретала более динамический характер, а тела горных пород могли быть приподняты, наклонены, т.е. мог происходить процесс, противоположный выравнивающему действию эрозии. Полемика между плутонистами и нептунистами достигала иногда яростного накала, и с ней, конечно, не могут сравниться споры, происходящие в наше время; в Эдинбурге нептунисты освистали пьесу, сочиненную одним из пламенных приверженцев Геттона.

Спор между нептунистами и плутонистами еще при жизни одного поколения перешел в другой: в спор катастрофистов с униформистами, где главные расхождения касались времени. Нигде Библия не мешала так геологии, как в вопросе о возрасте Земли. Хорошо известно, что в 1664 г. архиепископ Ашер, современник Ньютона, подсчитал (опираясь на

¹ Уильям Оккам (ок. 1285–1349) – английский философ-схоласт, сторонник использования в науке только тех понятий, которые исходят из интуиции и опыта. – *Прим. перев.*

Священное писание.—*Перев.*), что Земля была создана ровно в 9 часов утра 26 октября 4004 г. до Рождества Христова. Но этот подсчет никак не удовлетворял некоторых геологов, начинавших уже понимать, что геологические процессы развиваются медленно и что должно пройти длительное время, чтобы эти процессы смогли воздвигнуть горы.

То, что геологические изменения действительно произошли, отрицать уже было нельзя. Катастрофизм связывал большую часть этих изменений с серией гигантских переворотов, вызванных сверхъестественными силами; между такими «катастрофами» геологические процессы возобновляли свое обычное действие, но производили только слабые изменения. Преимущество этой теории усматривалось в том, что чрезвычайно большие перемены можно было отнести к очень короткому промежутку времени; тем самым можно было примирить теорию с библейской хронологией. Недостатком же с точки зрения науки было то, что причина «катастроф» оказывалась вне пределов рационального объяснения. Теория униформизма, напротив, делала упор на непрерывность геологических процессов. Геттон обнаружил геологические несогласия и сделал вывод, что осадочные толщи после своего накопления могли наклоняться и затем подвергаться эрозии в течение очень длительного времени, пока не начинался новый цикл осадконакопления. Геттону принадлежит формулировка принципа, утверждающего, что в прошлом действовали те же процессы, какие можно наблюдать сегодня: «Настоящее — ключ к прошедшему». Это позволяло рационально объяснить, как образовались горные породы, привлекая вполне вразумительные понятия о силах, влиявших на те условия, которые существовали во время образования пород. Например, присутствие в породе морских ископаемых остатков показывает, что данный участок суши когда-то располагался ниже уровня моря. Можно построить связную картину прошлой обстановки и проверить ее на внутреннюю согласованность; следовательно, это очень эффективный метод исследования.

Идеи униформизма были развиты и разъяснены в работах Плейфера (1748–1819) и сэра Чарлза Лайеля из Эдинбурга (1797–1875). В своей книге «Основы геологии», опубликованной в 1833 г., Лайель показал, что действующие в современную эпоху процессы могли вызвать наблюдаемые геологические изменения, но что для этого требовались длительные периоды времени. Аргументы Лайеля были убедительными, и короткое до смешного библейское расписание событий мировой истории уступило место понятию об огромных отрезках времени. Но маятник качнулся к другой крайности: осторожное высказывание Геттона о том, что он не видит свидетельств начала или конца геологических процессов, стало означать для некоторых его учеников мир без каких-либо границ, в котором геологические циклы эрозии и горообразования непрерывно развиваются неопределенно долгое время. Однако вскоре должна была появиться и оппозиция такой неопределенной хронологии.

Физики уже установили законы термодинамики, из которых следовало, что процессы не могут продолжаться бесконечно долго: их механизм должен остановиться, когда энергия будет исчерпана. Выдающуюся роль сыграл лорд Кельвин, который в середине прошлого века подсчитал время, необходимое для остывания Земли от состояния расплавленного шара до современной температуры. При своих вычислениях Кельвин исходил из значений температурного градиента, измеренных в шахтах, и из факта существования вулканов. Он получил значение всего лишь около 100 млн. лет. Эта цифра обескуражила не только геологов, но и Дарвина, чья теория эволюции (опубликованная в 1859 г.) во многом опиралась на представления Лайеля и могла быть принята только при условии, что существовали гораздо более длительные промежутки времени, в течение которых эволюция могла бы привести к необходимым изменениям. Теперь мы знаем, что Земля

получает много тепла от радиоактивного распада, но тогда кельвиновские расчеты казались безупречными; физические законы, соединенные с математикой, значили больше, чем совпадение полуколичественных оценок времени, основанных на скоростях геологических или биологических процессов.

Через какое-то время все больше и больше геологов стали склоняться к тому, чтобы принять оценку в 100 млн. лет, и это стало для них почти что догмой. Однако физики продолжали уточнять свою оценку возраста Земли, причем обычно в меньшую сторону, в некоторых случаях даже до 20 млн. лет. Это все больше стесняло геологов и вынуждало их уточнять свои оценки, основанные на таких величинах, как скорость осадконакопления и общая мощность осадочных толщ, пока они не приобрели достаточную уверенность, чтобы бросить вызов физикам. Но к тому времени, т.е. к концу прошлого века, была открыта радиоактивность, и вскоре стало ясно, что физическая оценка времени остывания больше соответствует минимальному, а не максимальному значению возраста Земли. Таким образом, закончился еще один плодотворный спор и была принята хронологическая шкала длиной в сотни миллионов лет, что открыло новые возможности не только в геологии, но и в науках о развитии жизни и в космологии. (В настоящее время возраст Земли – в действительности не только Земли, но и всей Солнечной системы – оценивается величиной около 4,6 млрд. лет. Как выведена эта оценка, объясняется в приложении 6, помещенном в конце книги.)

Первым, кто попытался реалистически установить внутреннее устройство Земли, был Бюффон. Он полагал, что для образования экваториального вздутия (под действием вращения) необходимо, чтобы земные недра находились в расплавленном состоянии, и в 1776 г. опубликовал теорию, согласно которой огненно-жидкая Земля образовалась в результате того, что какая-то комета столкнулась с Солнцем и выбила из него «клок» вещества. Бюффон считал, что при последующем развитии Земли более тугоплавкие материалы должны были затвердевать первыми, а из оставшихся летучих веществ образовались океаны; позднее отделились континенты, и наконец, появился Человек. Бюффон провел некоторые грубые эксперименты по измерению скорости остывания небольших масс различных веществ. Экстраполируя полученные результаты на массу размером с Землю, он получил общее время остывания около 75 тыс. лет, тем самым предвосхитив кельвиновский метод оценки возраста Земли.

В 1828 г. Кордье¹ провел измерения температур в шахтах и определил величину геотермического градиента у поверхности Земли, равную 30°C/км, что удивительно хорошо согласуется с современными данными. Это послужило дополнительным свидетельством горячего состояния земных недр, что связывалось (поскольку радиоактивность была тогда неизвестна) с первичным расплавленным состоянием.

Дальнейшим развитием модели остывающей Земли был вывод о том, что отвердевшая кора должна коробиться, образуя горы, по мере того как внутренние области остывали и сокращались в объеме. Однако на пороге нынешнего столетия, когда было открыто радиоактивное выделение тепла, потребовалось новое объяснение процесса образования горных поясов, так как выяснилось, что Земля развивается значительно более длительное время и если и остывает, то совсем немного. Тем не менее ранние геологи были правы, когда рассматривали внутреннее тепло как крупный источник энергии, поднимающей земную поверхность и противодействующей разрушительным силам эрозии, которые питаются солнечной энергией.

¹ Пьер-Луи Кордье (1777–1861) французский горный инженер и геолог. – *Прим. перев.*

Естественно, что издавна внимание привлекали землетрясения. Среди объяснений, которые предлагались для них в античные времена, были движение внутренних вод, поддерживающих поверхность Земли, прорывы подземного огня, обрушение пещер. В средние века эти физические, хотя и туманные, идеи сменились анималистскими объяснениями; например, серьезно говорилось о беспокойных движениях некой гигантской змеи, обитающей в морских глубинах. Начало современным представлениям положили Гук, установивший в 1705 г., что землетрясения связаны с движениями поверхности суши, и Маллет¹ (1810–1881), обнаруживший в середине прошлого века, что при землетрясениях большая часть разрушений обусловлена не крупными подвижками самих массивов суши, а волнами, которые возникают при этих подвижках и расходятся во все стороны от своего источника. С большой проницательностью Маллет предположил, что, определяя время прибытия сейсмических волн, прошедших прямо через тело Земли, можно расширить наши знания о земных недрах. Он оказался прав: сейсмология стала теперь одним из важнейших методов изучения внутренних областей Земли.

Землетрясения, извержения вулканов и геологически недавние изменения уровня моря, о чем свидетельствует непрерывно увеличивающееся число данных, делают все определеннее тот факт, что Земля не только изменялась в прошлом, но и теперь остается динамичной планетой. Какие же, однако, силы вызвали вертикальные движения и как Земля реагировала на эти силы? Один из ответов на такой вопрос пришел с несколько неожиданной стороны. Попытка Буге, предпринятая в 1735–1745 гг., «взвесить Землю» путем сопоставления гравитационного притяжения Земли и Анд показала, что горы, по всей видимости, имеют значительно меньшую массу, чем можно было бы ожидать, исходя из их объема. Позже этот эффект был обнаружен повсеместно, и в особенности в Гималаях во время исследований, проводившихся сэром Джорджем Эверестом и другими. Было высказано предположение, что дефицит масс обусловлен тем, что породы под горами имеют меньшую плотность, чем на соседних площадях. Но как это получилось? Случайностью это быть не могло, так как данное явление оказалось обычным, поэтому надо было искать механизм, который естественным образом приводил бы к такому состоянию. В 1855 г. Пратт и Эри независимо друг от друга опубликовали свои теории *изостазии* – представление о том, что поверхностные горные породы плавают на субстрате, состоящем из более плотных, но податливых пород, и земная поверхность оказывается выше там, где более легкие породы имеют большую мощность.

Это было только частичным объяснением горообразования, так как оставалось непонятным, каким образом более легкие породы могли накопиться в одном месте, образовав мощные массивы. Проблема была решена только недавно, с появлением теории тектоники плит. Тектоника плит – это развитие более ранней идеи о дрейфе континентов, впервые выдвинутой в связной форме в 1910 г. Альфредом Вегенером, немецким метеорологом. На основании различного рода данных о совпадении границ материков он заявил, что несколько сотен миллионов лет назад существовал единый суперматерик, который затем распался на отдельные части. Представление о континентальном дрейфе получило широкое признание только в 1950-е годы, с расцветом палеомагнетизма, когда были получены независимые доказательства движения материков.

Примерно в это же время стали разрабатываться методы изучения тех двух третей земной поверхности, которые скрыты под водой, изучения тем более необходимого, по-

¹ По-русски фамилию этого британского инженера иногда пишут «на французский лад»: Мале, или Малле. – Прим. перев.

скольку все понимали, что дно океанов совершенно непохоже на поверхность континентов. Это различие получило объяснение в теории тектоники плит, которая была сформулирована в конце 1960-х годов и в отличие от гипотезы дрейфа континентов охватывала всю поверхность земного шара. Эта теория утверждает, что поверхность Земли разделена на несколько крупных кусков, или плит, которые с хорошим приближением можно считать жесткими, так что все виды тектонической активности приурочены главным образом к границам плит, где можно наблюдать относительное движение плит. Характер таких явлений, как землетрясения, вулканизм, горообразование и т.д., зависит от того, сходятся плиты или расходятся, и от того, какие участки плит граничат между собой — континентальные или океанические.

Все эти явления, охватывающие огромные площади земной поверхности, — изостазия, вулканизм, тектоника плит — вызываются, очевидно, процессами, происходящими глубоко в Земле, и поэтому их изучение способствовало тому, что интерес исследователей был сфокусирован на внутренних областях нашей планеты. Они, конечно, и составляют предмет данной книги, о них и пойдет речь в следующих главах.

Общие работы, рекомендуемые для дальнейшего чтения

История геологических представлений [1, 93, 83].

Ранние споры между геологами и геофизиками о возрасте Земли [35].

Библиографическая сводка по геологии [152].

Словарь геофизики [192].