

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ	7
Сейсмология	7
Магнитное поле Земли.....	19
Тектоника литосферных плит	24
На дне океана.....	34
Глава 2. КАТАСТРОФА, ПРИШЕДШАЯ С НЕБЕС	42
Метеориты	42
Кометы	48
Астроблемы – звездные раны Земли	50
Глава 3. ГОРЯЧЕЕ ДЫХАНИЕ ЗЕМЛИ	65
Что представляет собой вулкан	69
Расположение вулканов на земном шаре	75
Извержение, погубившее цивилизацию.....	80
Гибель Помпеи, Геркуланума и Стабии.....	94
Другие вулканы.....	101
Следим за вулканами	116
Глава 4. ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ.....	128
Что представляет собой землетрясение и как оно возникает.....	131
Как определяют силу землетрясений.....	132
Геологическая позиция землетрясений.....	138

Наведенная сейсмичность.....	144
Цунами – смертоносные волны.....	145
Как возникают цунами.....	147
Можно ли предсказать землетрясение.....	150
Глава 5. ЕЩЕ НЕМНОГО О КАТАСТРОФАХ.....	159
ПОСЛЕСЛОВИЕ.....	168
Словарь.....	169
Литература.....	172

Все, что мы знаем — ничтожно.
Все, что не знаем — бесконечно.
Сократ

ВВЕДЕНИЕ

Вселенная огромна. От самых дальних наблюдаемых объектов свет идет к нам около 13 млрд лет. И во всем этом объеме сосредоточена только малая часть Вселенной, а остальное находится вне нашего обозрения. В безбрежном океане Вселенной рассыпаны многие миллиарды галактик, а в каждой из них миллиарды, а то и триллионы звезд. В одной из таких галактик, которая называется Млечный Путь, находится наше Солнце, вокруг которого вращаются 8 планет: Меркурий, Венера, Земля со спутником Луной, Марс с двумя маленькими спутниками — Фобосом и Деймосом, а далее располагаются планеты-гиганты со своими многочисленными спутниками — Юпитер, Сатурн с его знаменитыми кольцами, Уран и Нептун.

Земля — пылинка во Вселенной, но это наша планета и нам важно знать о ней как можно больше.

Как и другие планеты, Земля функционирует как «живой» организм. Внешние оболочки — атмосфера, гидросфера, биосфера, ионосфера, магнитосфера — тесно взаимодействуют как между собой, так и с земной корой, а кроме того, на них влияют Солнце и Луна. На Земле постоянно происходят различные процессы, и в наиболее глубоких ее частях — геосферах, и в поверхностной оболочке — земной коре, на которой мы и живем. Именно в ней случаются такие катастрофические процессы как землетрясения, вызванные ими гигантские оползни,

цунами, извержения вулканов. На поверхность Земли падали, падают и будут падать метеориты. Перечисленные катастрофы происходят внезапно, они завораживают своей неотвратимостью, а их последствия могут быть страшными.

Обо всем этом и хотелось бы рассказать в этой книге. О том, как современная наука объясняет многие катастрофические события, может ли она их прогнозировать и какова точность этих прогнозов. Речь пойдет только о твердых внутренних сферах Земли – тех, которые находятся ниже ее поверхности, т.к. именно в них происходят процессы, которые вызывают извержения вулканов и землетрясения. Кроме того, именно на земную поверхность падают небесные пришельцы – метеориты, оставляя на ней раны – астроблемы, с которыми связаны разные геологические события и даже полезные ископаемые. Но сначала нам придется коротко рассказать о том, как устроена наша планета.

Без постоянной помощи Г.В.Брянцевой эта книга не могла бы увидеть свет, за что я приношу Галине Владимировне глубокую благодарность.

СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ

Сейсмология

Как мы узнаём о том, что находится внутри Земли, на глубинах в тысячи километров, если самая глубокая скважина в мире, пробуренная в нашей стране на Кольском полуострове, недалеко от Мурманска, достигла отметки лишь в 12 км 226 м, а радиус Земли 6371 км? Все мы понимаем, что непосредственно увидеть глубокие горизонты Земли невозможно, и сто лет назад мы ничего не знали о ее внутреннем строении. Сейчас разработано много косвенных методов, позволяющих «заглянуть» в недоступные недра нашей планеты.

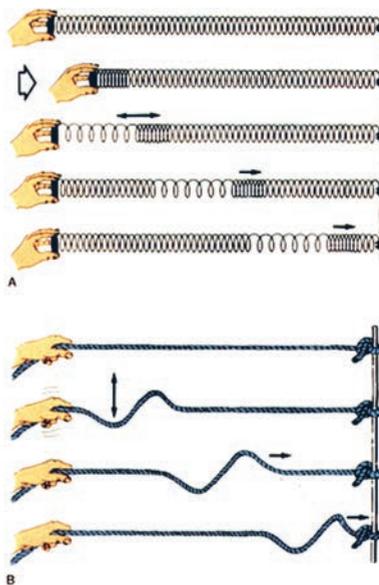
На первом месте стоит сейсмологический метод. Любой взрыв в горном карьере, подземный ядерный взрыв, промышленный взрыв и, тем более, каждое землетрясение, которые происходят в разных частях планеты почти каждую секунду, вызывают в горных породах упругие колебания – сейсмические волны, или волны деформации. Эти волны распространяются во все стороны от места возникновения землетрясения, от его очага, или гипоцентра, и при сильном землетрясении пронизывают весь земной шар. Вот эти колебания и надо улавливать.

Волны деформаций бывают объемными и поверхностными. Все они, достигая земной поверхности, производят те катастрофические процессы, которые мы наблюдаем – разрушение зданий, образование трещин, провалов и даже нового рельефа.

Рис. 1.1. Продольные (А) и поперечные (В) объемные волны (по Plummer, Mc Geary)

Объемные волны деформаций подразделяются на два типа – продольные и поперечные (рис. 1.1). В продольных волнах колебания происходят вдоль направления распространения волны. Это напоминает гармошку, которая то сжимается, то растягивается. А во втором типе волн колебания происходят поперек направления распространения волны – вверх и вниз. Такие колебания могут происходить только в твердой среде, в которой частицы сопротивляются сдвигу. Продольные волны имеют большую скорость, следовательно, они будут на приемнике зарегистрированы первыми, а поперечные – вторыми. Продольные волны могут распространяться в любой среде (воздухе, жидкости, твердом теле), а поперечные – только в твердых телах.

Существуют еще два типа поверхностных волн – волны Лява, в которых смещение частиц происходит в горизонтальной плоскости, перпендикулярно направлению распространения, и волны Рэлея, в которых колеблющиеся частицы имеют и продольную составляющую, и поперечную (вверх-вниз). Особенность их распространения изображена на рис. 1.2. Если объемные волны проходят через все тело Земли, то поверхностные распространяются вокруг нее. Скорость сейсмических волн зависит от упругих свойств и плотности пород, через которые они проходят. Понятно, что чем плотнее порода, тем скорость выше. Если мы имеем прибор, способный регистрировать продольные и поперечные сейсмические волны и их скорость на определенной глубине, то можем составить представление о разных слоях, из которых состоит наша планета.



Интересно, что первый такой прибор – сейсмограф, если его можно так назвать, был создан в 132 г. н. э. в Китае, ученым Чжан Хэном (рис. 1.3). Это устройство, конечно, не делало записей, а могло лишь примерно указать направление, где произошел главный толчок. Прибор состоял из большой медной полусферы, внутри которой располагалось подобие маятника, а по периферии находилось шесть драконов, в пасти которых были нефритовые шарики. Под сферой вокруг нее стояло шесть лягушек с открытыми ртами. Колебания грунта при землетрясении вызывали колебания маятника, и от его удара по сфере шарик из пасти дракона падал в рот лягушки. Так определялось направление первого сильного толчка, связанного с приходом продольных волн.

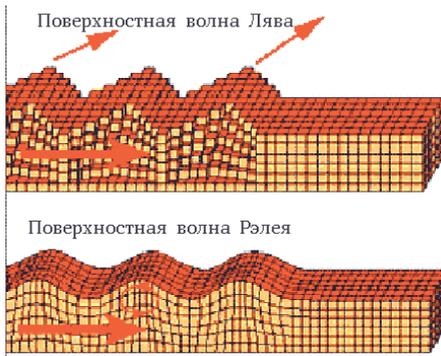


Рис. 1.2. Поверхностные волны (Н. В. Короновский, В. А. Абрамов)



Рис. 1.3. Один из вариантов сейсмографа Чжан Хэна

ся круглосуточно, и в результате получается сейсмограмма, которую специалисты геофизики могут расшифровывать (рис. 1.4).

Близкий к современному сейсмограф был сконструирован Юингом в Японии еще в 1879 г., тогда как в Европе прибор с записью сигналов на барабане был сделан в 1855 г. Л. Пальмьери.

В 1856 г. первый сейсмограф установили на вулкане Везувий около Неаполя. В конце XIX века русский ученый академик Б.Б. Голицын изобрел первый электрический сейсмограф, способный регистрировать землетрясения на расстоянии в 20 000 км, когда смещения грунта под сейсмографом составляют тысячные доли миллиметра. Российские геофизики Д.П. Кирнос, Г.А. Гамбурцев, Д.А. Харин усовершенствовали сейсмограф Б.Б. Голицына в сторону более точных показаний, однако принцип его действия остался без изменений.

В наши дни на земном шаре, особенно в сейсмоопасных районах, да и в других местах размещены тысячи сейсмографов, с помощью которых регистрируются не только все, даже самые слабые землетрясения, но и все промышленные взрывы, включая, конечно, и подземные ядерные.

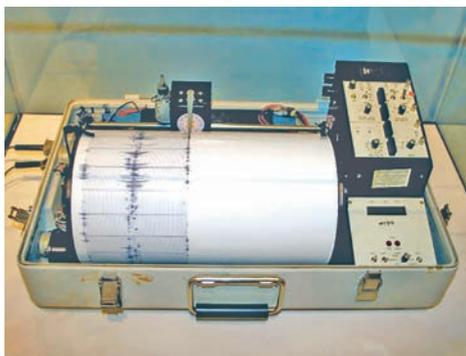
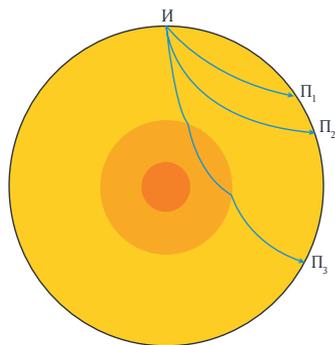


Рис. 1.4. Современный сейсмограф



Сейсмографы, записывая скорость прохождения сейсмических волн на разных глубинах, позволяют выявить слои внутри Земли, обладающие разной плотностью и упругостью, что свидетельствует о разном составе этих слоев (рис. 1.5).

Рис. 1.5. Сейсмические волны
И — источник волн,
П — приемники

Геофизики читают сейсмограммы так же, как врач читает кардиограммы. Благодаря обобщению огромного сейсмического материала сейчас твердо установлены 4 границы раздела вещества внутри Земли с различной скоростью прохождения сейсмических волн. То есть земной шар состоит из нескольких оболочек – геосфер.

Самая верхняя геосфера, и для нас самая важная – это *земная кора*, покрывающая всю нашу планету тонким слоем мощностью от 5–7 км в океанах и до 70–75 км на суше, там, где высокие горы, например, на Памире.

Нижняя граница земной коры, открытая в 1909 году хорватским геофизиком Мохоровичичем, характеризуется резким, скачкообразным возрастанием скоростей как продольных, так и поперечных сейсмических волн. Граница Мохоровичича (рис. 1.6), для краткости ее называют Мохо, или просто *M*, прослеживается повсеместно, а ниже нее до глубины 2900 км располагается твердая мантия Земли.

Нижняя граница мантии впервые была установлена геофизиком Гутенбергом (1914), она отделяет мантию от ядра, самой глубокой геосферы Земли, радиусом более 3000 км. Самое удивительное заключалось в том, что поперечные сейсмические волны не проходили ниже границы в 2900 км.

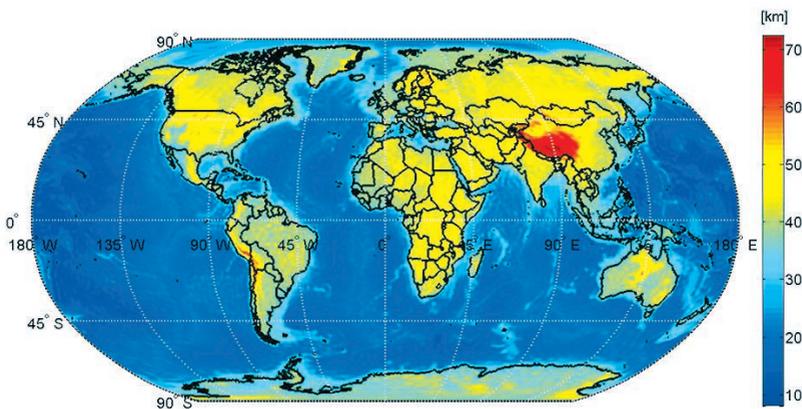


Рис. 1.6. Граница Мохоровичича по данным европейского спутника для исследования гравитационного поля GOCE. Глубина кодируется цветом

Даже неискушенный читатель, если ему показать простейшую формулу для скорости поперечной волны:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

где μ – модуль сдвига (отношение касательного напряжения к сдвиговой деформации), а ρ – плотность вещества и, зная из школьной физики, что модуль сдвига в жидкости и газе равен 0, задумается, а из чего же тогда состоит земное ядро? При такой высокой плотности и огромном давлении вряд ли там газообразное вещество. Тогда из чего же состоит ядро? Наиболее вероятный ответ на этот вопрос: вещество ядра обладает свойствами жидкости или некоторой пластичностью.

И это единственно верный ответ. Но ведь на уровне внешнего ядра давление достигает огромных величин – около 2-х млн атмосфер на квадратный сантиметр, при котором пластичное тело может приобретать неожиданные, неизвестные нам свойства. В 1936 г. геофизик И. Леманн доказала, что внутри ядра со свойствами жидкого тела, находится, начиная с глубины 5100 км, еще и внутреннее, твердое ядро, через которое проходят как продольные, так и поперечные сейсмические волны.

Таким образом, оказалось, что планета Земля состоит из целого ряда сферических оболочек, вложенных одна в другую и различающихся по плотности и упругим свойствам. Но это было только начало изучения строения Земли, которое на самом деле оказалось намного сложнее.

Прежде всего, выяснилось, что земная кора континентов и океанов резко различается. На континентах в вертикальном сечении коры выделяется несколько слоев (рис. 1.7). Самый верхний, распространенный не повсеместно, это чехол из осадочных пород – известняков, песчаников и глин, достигающий 25 км в глубоких впадинах, например, в Прикаспийской. Он подстилается так называемой консолидированной корой из гранитов и разнообразных метаморфических, т.е. сильно измененных, пород. Но основная роль принадлежит разным гранитам. Этот слой характеризуется различными скоростями сейсмических волн, что свидетельствует о его неоднородности, но в целом он хрупкий и более твердый, чем нижний, относительно пластич-

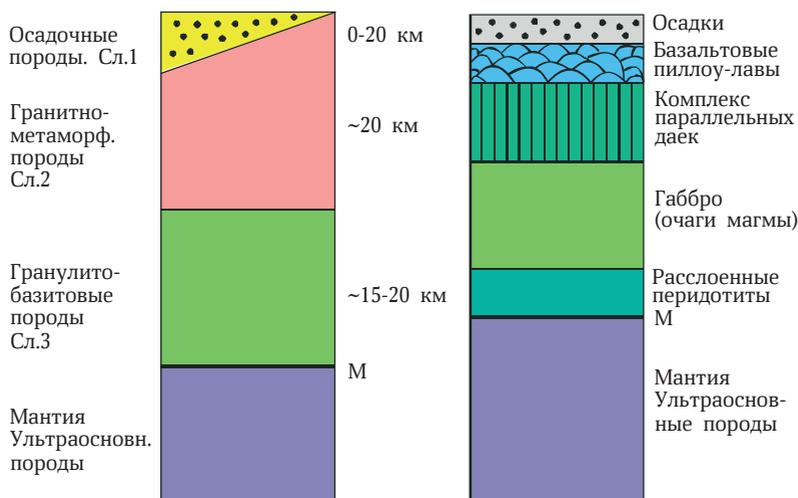


Рис. 1.7. Строение континентальной и океанической земной коры (Н. В. Короновский, Г. В. Брянцева, 2013)

ный слой земной коры. Последний состоит из различных сильно измененных горных пород, подвергшихся воздействию высоких температур и мощному давлению на глубинах в десятки километров. Учитывая, что скорости продольных и поперечных сейсмических волн в этом слое близки к таковым в базальтах, его называют гранулитобазальтовым. Этот термин характеризует все разнообразие базальтов – изверженных пород, в которых содержание SiO_2 составляет 52–45%.

Подобное строение континентальной земной коры с пониженной плотностью ее нижнего слоя, очень важно, так как ведет к тому, что этот слой может деформироваться пластично. Верхний, гранитно-метаморфический, слой земной коры обладает большей твердостью, он хрупкий, и большинство разломов образуется в нем. Мы живем на континентальной коре, и все катастрофические процессы, происходящие на ее поверхности – извержения вулканов, землетрясения, оползни, обвалы тесно связаны с ее строением.

А вот океаническая кора, в отличие от континентальной, характеризуется значительно меньшей мощностью, в среднем 6–7 км, и совсем другим строением. В ней отсутствует гранитно-

метаморфический слой, осадочный слой имеет толщину всего в несколько сотен метров и подстилается сложно построенным, но в целом, базальтовым слоем. В верхней части океанической коры под маломощными осадками залегают базальты, т. н. пиллоу-лавы (подушечные), так как гидростатическое давление на океаническом дне велико и магма может лишь выдавливаться из подводящих каналов, как паста из тюрбика. Ниже как раз и залегают толща, состоящая из параллельных каналов – даек, по которым базальтовая магма поднималась вверх. А еще ниже по разрезу располагается толща пород с пониженным содержанием двуоксида кремния, называемых габбро. Они, в свою очередь, подстилаются ультраосновными породами – перидотитами, в которых содержание SiO_2 не превышает 45%. Это уже верхняя мантия, отделяемая от габбро границей Мохоровичича. Принципиальная разница в строении континентальной и океанической земной коры, как можно будет убедиться в дальнейшем, определяет многие процессы в поверхностной сфере. Именно взаимодействие океанической и континентальной коры приводит к сильнейшим природным катастрофам – извержениям вулканов и землетрясениям.

Залегающая ниже коры, до глубины в 2900 км, мантия также имеет сложное строение, что было установлено в последние десятилетия, благодаря совершенствованию геофизических методов, а также изучению изменения структуры разных минералов при высоком давлении (рис. 1.8).

В верхней части мантии на глубине 100–120 км под материками и 50–60 км под океанами начинается очень важный в геологическом отношении слой – *астеносфера* (астенос – слабый, ослабленный), мощностью 50–80 км под океанами и до 200 км и более под континентами. Этот слой характеризуется пониженной вязкостью, в нем может содержаться расплав, но не более 2–4%, вследствие чего наблюдается пониженная скорость сейсмических волн. Возникновение слоя астеносферы объясняется тем, что на этих глубинах кривая роста температуры почти совпадает с кривой температуры плавления пород верхней мантии, за счет чего возможно частичное плавление породы.

Часть верхней мантии выше астеносферы вместе с земной корой называется *литосферой* (литос – камень). Она твердая

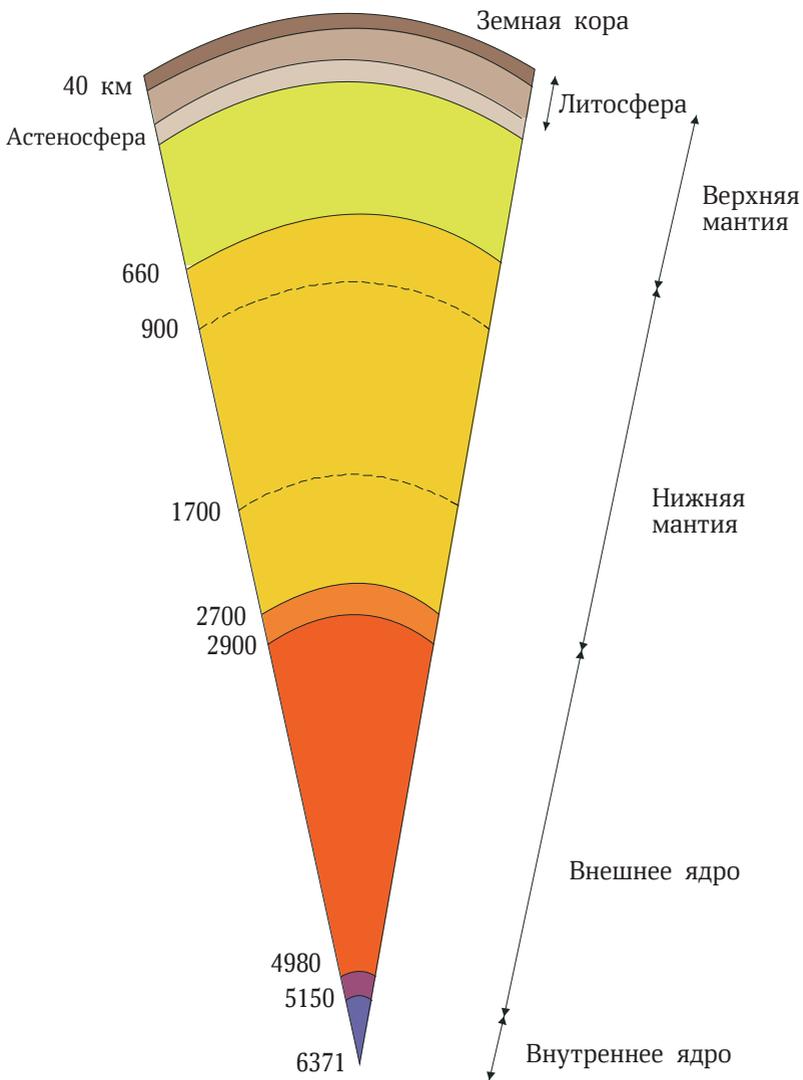


Рис. 1.8. Внутреннее строение Земли
(Н. В. Короновский, Г. В. Брянцева, 2013)

и хрупкая и ее фрагменты (литосферные плиты) могут «скользить» по смазке из астеносферы. Постоянное, хотя и очень медленное, перемещение литосферных плит определяет неповторимую историю эволюции нашей планеты и ответственно за большинство катастрофических геологических процессов, о которых пойдет речь ниже.

Граница между верхней и нижней мантией находится на глубине 660 км, причем она весьма узкая, примерно 6 км. В пределах этой зоны на 6% возрастают скорости как продольных, так и поперечных сейсмических волн, да и плотность вещества увеличивается на 7%. Интересно, что ниже этой границы вязкость вещества мантии возрастает в 30 и более раз.

О чем все это может говорить? Конечно, о резком изменении минерального состава пород. Но как же можно узнать состав вещества на таких огромных глубинах, при высокой температуре и колоссальном давлении? И тут на помощь приходят экспериментальные данные о преобразованиях минералов при больших давлениях и высоких температурах, недавно показанных в очень интересной статье двух академиков, отца и сына, Ю.М. Пушаровского и Д.Ю. Пушаровского.

Дело в том, что одним из главных выводов этих исследований является признание структурных изменений минералов, из которых состоит мантия Земли, а не содержания главных химических элементов, таких как, например, кремний, кислород, магний, железо, алюминий. Возрастающее с глубиной давление и увеличивающаяся температура приводят к эволюции структурной решетки минералов в сторону более плотной их упаковки. Так, большое количество, около 100 различных кремнекислородных комплексов силикатов, наиболее распространенных в земной коре и обладающих тетраэдрической формой, ниже раздела Мохоровичича, т.е. в мантии, сменяются всего лишь 15-ю типами структур, но уже другой – октаэдрической.

Чтобы не утомлять неискушенного читателя формулами разных минералов, поясним главную мысль Д.Ю. Пушаровского на примере такого распространенного минерала коры и мантии, как оливин – $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$, называемого в земной коре α -оливином. В верхней мантии, начиная с глубин около 400 км, оливин переходит в другие минералы такого же состава, но с

более плотной структурной упаковкой. И такая смена происходит с погружением на все большие глубины, пока уже ниже 660 км не образуются минералы с очень плотной структурой.

А что же ниже, хотя бы до границы с внешним ядром, т.е. до глубины в 2900 км? По данным Пушаровских единая в прежних моделях нижняя мантия может подразделяться на две сферы – среднюю (от 840 до 1700 км) и собственно нижнюю (2200–2900 км). Переход от верхней мантии к средней, а от нее к нижней – постепенный и охватывает зону мощностью до 200 км. В этих сферах и на границе нижней мантии и внешнего ядра появляются минералы с еще более плотной структурой, типа перовскита.

Мантия, располагающаяся ниже земной коры и вплоть до ядра, составляет основной объем твердой Земли – 66,3%. Но ее самый нижний, примыкающий к ядру слой, открытый всего немногим более 20 лет назад, привлекает особое внимание геофизиков и геологов. Дело в том, что занимая пограничную положение между двумя резко различными по составу и свойствам сферами, он обладает не только резко изменчивой мощностью в 150–300 км, но местами как бы совсем исчезает, образуя «впадины» и «поднятия». Его свойства свидетельствуют о резком изменении температуры и, по-видимому, химического состава, а на границе с ядром находится очень тонкий прерывистый слой ультранизкой вязкости, в котором, вполне возможно, и происходит обмен веществом между мантией и ядром. Это все, конечно, предположения, догадки, но 20 лет назад не было и догадок.

С глубины 2900 км начинается ядро, которое подразделяется, по сейсмическим данным, на внешнее – 31% объема земного шара, а с рубежа 5150 км – внутреннее.

Особый интерес представляет внешнее ядро, через которое, как уже говорилось, не проходят поперечные сейсмические волны. Это означает, что вещество внешнего ядра обладает свойствами жидкости. Не следует думать, что там находится жидкость, как, скажем, в кипящем чайнике. Вероятно, внешнее ядро состоит из материала с малой вязкостью и с плотностью $11,0 \text{ г/см}^3$, в котором происходят медленные перемещения, т.е. конвекция. Плотность внешнего ядра на 10% ниже плотности

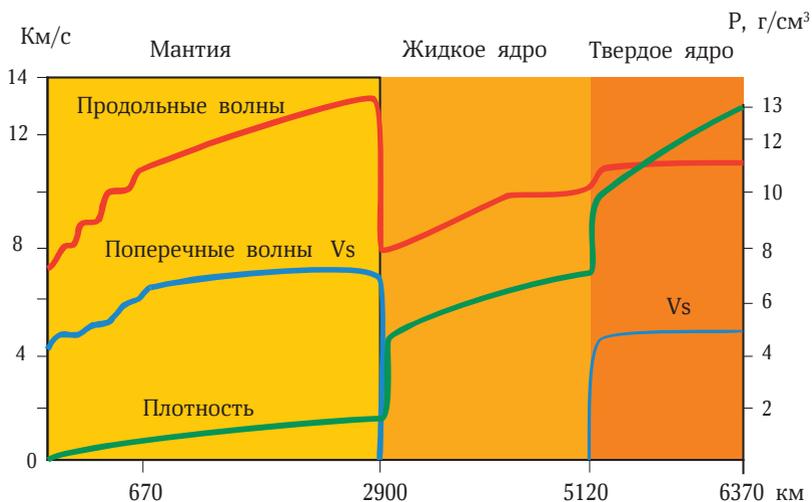


Рис.1.9. Распределение скоростей сейсмических волн и плотность вещества внутри Земли. Наиболее существенные скачки скоростей происходят на глубинах 2900 и 5120 км (Н. В. Короновский, Г. В. Брянцева, 2013)

расплава железа, поэтому в его состав могут входить также кремний, углерод, водород. Граница между внешним и внутренним ядром очень четкая и определяется по резкому (почти на 0,8 км/сек) скачку скорости продольных сейсмических волн, т.е. вещество становится более плотным (рис. 1.9). Поэтому можно заключить, что внутреннее маленькое «ядрышко» — это явно твердое вещество с плотностью $12,5 \text{ г/см}^3$, так как пропускает как продольные, так и поперечные волны. Появление поперечных сейсмических волн во внутреннем ядре объясняется тем, что на границе внешнего и внутреннего ядра, продольная волна, преломляясь на границе раздела, порождает во внутреннем ядре и продольные, и поперечные волны. Судя по скоростям сейсмических волн, огромному давлению 364 ГПа (3,6 млн. атмосфер) и высокой температуре, материал внутреннего ядра Земли — железо, возможно с примесью никеля (5–15% весовых), и значительно меньшим количеством легких элементов, причем железо во внутреннем ядре не обычное, а имеет структуру с плотной упаковкой.

В последнее время появляются новые данные, свидетельствующие о том, что строение внутреннего ядра, возможно, гораздо сложнее, чем нам представляется. Его внешняя часть может обладать текучестью, да и во внутренней части уже очень мала скорость поперечных сейсмических волн, что тоже необычно. Методы исследований глубоких геосфер Земли все совершенствуются и, наверное, скоро мы узнаем много нового.

Вот мы и добрались до центра нашей планеты – до точки на глубине 6371 км и получили представление о внутреннем строении Земли с учетом самых последних данных геологической науки.

Земля состоит из целого ряда оболочек или геологических сфер, каждая из которых обладает своими особенностями, и все геосферы по-разному, но взаимодействуют между собой. В конечном счете, оказывается, что какие-то геологические процессы, происходящие в земной коре на самой поверхности Земли, обязаны знаменитому ныне слою на границе нижней мантии и ядра, где зарождаются восходящие струи относительно более нагретого материала, так называемые плюмы. Очень медленно, со скоростью 1–2 см/год, плюм поднимается и за сотни миллионов лет, достигая поверхности верхней мантии, вызывает ее плавление и образование огромных магматических очагов, из которых извергается колоссальное количество базальтовых лав и туфов. Этот магматизм так и называется плюмовым, в далеком прошлом он приводил к глобальным катастрофам, о чем мы поговорим ниже.

Магнитное поле Земли

Более 400 лет назад У. Гильберт высказал предположение, что Земля сама является магнитом, но представление о механизме возникновения ее намагниченности до сих пор не вышло за рамки гипотез.

Известно, что Земля обладает магнитным полем. Наверное, все когда-нибудь пользовались компасом, определяя, где север или юг. Но как образовалось магнитное поле, во многом и сейчас остается загадкой. Существовало много предположений о том, почему наша планета имеет магнитное поле. В настоящее

время наиболее удовлетворительно его возникновение объясняет гипотеза магнитного гидродинамо, для работы которого необходимо: 1) очень слабое первичное магнитное поле, 2) перемещение – конвекция вещества во внешнем ядре, обладающем свойствами жидкости, 3) вращение Земли.

Первичное магнитное поле может возникнуть от вращения Земли, т.к. она намагничивается в направлении оси вращения. Это называется гидромагнитным эффектом. Было показано, что данное поле составляет лишь 10^{-10} магнитного поля Земли, которое и так очень слабое, всего 0,5 эрстед. Причиной первичного магнитного поля может быть и межпланетное магнитное поле, и магнитное поле Солнца, которое, несмотря на удаление от нас Солнца на 150 млн км, все же сказывается.

Наличие такого очень слабого первичного магнитного поля и жидкого вращающегося проводящего внешнего ядра и вызывает образование магнитного поля нашей планеты и при этом, благодаря сложным, до конца еще неясным процессам, происходящим во внешнем ядре, магнитная ось Земли, соединяющая северный и южный магнитный полюса, не совпадает с осью вращения, т.е. с географическими полюсами (рис. 1.10). В северном полушарии магнитный полюс сейчас находится на севере Канады, около Баффиновой земли. Однако в прошлом ось вращения Земли и магнитная ось в целом совпадали.

С древнейших времен магнитное поле – это исключительное явление природы, занимало умы человечества. Ведь с магнитным полем связана не только навигация, но еще и множество различных практических и научных задач – от поисков рудных месторождений, до изучения внутреннего строения Земли. Палеомагнитология, как наука, изучающая геомагнитное поле прошлых геологических эпох, еще очень молода, ей всего около 100 лет, и по-настоящему она стала развиваться лишь с середины 50-х годов прошлого века. Но эта молодая наука сыграла выдающуюся роль в становлении современной глобальной геологической теории – тектонике литосферных плит.

В 1906 г. Б. Брюн, измеряя магнитные свойства неогеновых, сравнительно молодых лав в Центральной Франции, обнаружил, что их намагниченность противоположна направлению современного геомагнитного поля, т.е. Северный и Южный магнит-

ные полюса как бы поменялись местами. Наличие обратно намагниченных горных пород является следствием не каких-то необычных условий в момент образования лав, а результатом обратного направления магнитного поля Земли в тот момент.

Обращение полярности геомагнитного поля – важнейшее открытие, которое при-

вело к возникновению новой науки – магнитостратиграфии, изучающей расчленение отложений горных пород на основе их прямой или обращенной намагниченности. И главное здесь заключается в доказательстве синхронности изменений намагниченности в пределах всего земного шара. В руках геологов оказался действенный метод корреляции отложений и событий.

В реальном магнитном поле Земли время, в течение которого происходит изменение полярности, может быть как коротким – до тысячи лет, так и составлять миллионы лет.

Первая магнитостратиграфическая шкала для последних 3,5 млн лет была создана в 1963 г. А. Коксом, Р. Доллом и Г. Далримплом. В пределах этого интервала они установили две временные зоны прямой полярности (как современное поле) и одну зону – обращенной. С тех пор составлено много магнитостратиграфических шкал, полнота и нижний возрастной предел которых все увеличиваются, а само расчленение становится более точным. Магнитостратиграфическая шкала является, по существу, глобальной шкалой геомагнитной полярности за наблюдаемую часть геологической истории.

Временные интервалы преобладания какой-либо одной полярности получили название геомагнитных эпох, и части из них присвоены имена выдающихся геомагнитологов: эпохи Броне-

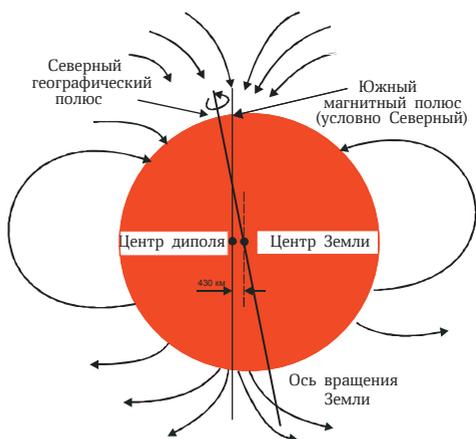


Рис. 1.10. Магнитное поле Земли (Н. В. Короновский, Г. В. Брянцева, 2013)

са, Матюямы, Гаусса и Гильберга. В пределах эпох выделяются меньшие по длительности интервалы той или иной полярности, называемые геомагнитными эпизодами.

Наиболее эффектно выявление интервалов прямой и обратной полярности геомагнитного поля было проведено для молодых в геологическом смысле лавовых потоков в Исландии, Эфиопии и некоторых других местах. Недостаток этих исследований заключается в том, что излияние лав было прерывистым процессом, поэтому вполне возможен пропуск какого-либо магнитного эпизода.

Анализ магнитных свойств образцов из пород океанского дна позволил составить детальную шкалу инверсии поля до поздней эпохи юрского периода включительно, т.е. на интервал времени в 170 млн лет, что дало возможность реконструировать магнитное поле Земли за это время. До рубежа в 570 млн лет – для всего фанерозоя – такая шкала тоже создана, но она хуже по качеству. Есть шкала и для рифея – венда (1,7–0,57 млрд лет), однако она еще менее удачна. Остаточная намагниченность обнаруживается даже у архейских пород с возрастом 3,4 млрд лет.

Распределение геомагнитных инверсий во времени характеризуется довольно сложной ритмичностью, состоящей как из длительных, так и из кратких интервалов обращения знака поля (рис. 1.11). Почему это происходило – неизвестно, но значение этого события для геологии очень важно.

В начале XXI-го века в области наук о Земле произошло осознание того факта, что вся наша планета представляет собой единую систему, хотя и состоит из ряда сфер или геосфер, которые находятся в тесном взаимодействии друг с другом. А ведь еще сто лет назад мы ничего не знали о внутреннем строении Земли, прогресс в изучении которой, связан, конечно, с новой техникой и новыми технологиями. Прежде всего, это сейсмологический метод и сейсмическая томография, позволившие получить информацию о самых глубоких горизонтах нашей планеты; глубоководное бурение и использование обитаемых подводных аппаратов; данные искусственных спутников Земли (см. рис. 1.6); изучение влияния на геосферу

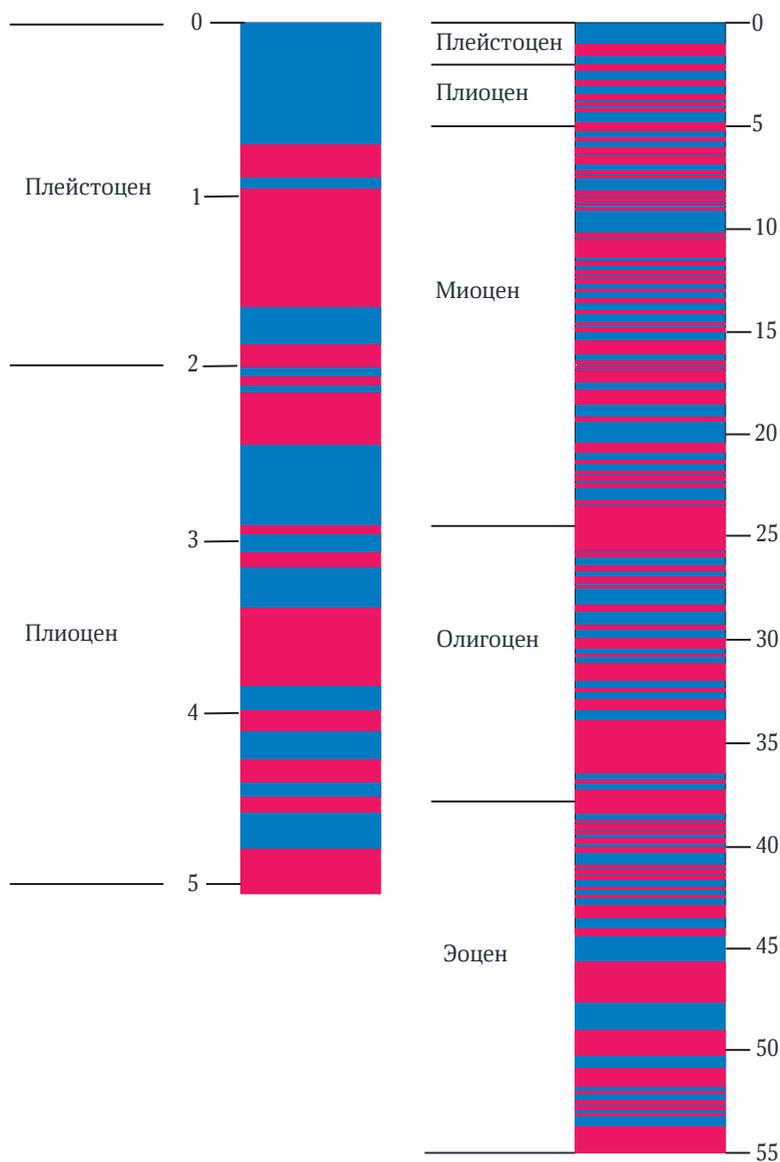


Рис. 1.11. Шкалы инверсий магнитного поля:
 слева – за последние 5 млн лет, справа – за последние 55 млн лет;
 синий – нормальная намагничённость, красный – обратная
 (по У.У. Харленду и др., 1985)

Луны и ближайших планет Солнечной системы. Впервые во всей полноте выявилась сложность и взаимодействие всех геологических сфер Земли, на первый взгляд автономных, но на самом деле тесно связанных между собой и влияющих друг на друга.

Тектоника литосферных плит – революция XX века в геологии

Начиная со второй половины прошлого века геологические и геофизические исследования проводились исключительно интенсивно, но особенно это касалось океанов, о строении дна которых и, тем более, о структуре земной коры в них и ее свойствах было известно очень мало. Полученные материалы способствовали рождению новой геологической теории – тектоники литосферных плит, согласно которой земная кора состоит из относительно целостных блоков, которые постоянно движутся относительно друг друга.

Именно теории, а не гипотезы, как часто бывает в геологии. Теория обладает «предсказуемостью». С ее помощью можно прогнозировать явления, те или иные свойства вещества и т.п. И если прогноз подтверждается, то теория имеет право на существование. Существующие взгляды, если они не могут объяснить появляющиеся новые факты, многого не стоят.

Решающий вклад в современную геологическую теорию тектоники литосферных плит внесли следующие открытия:

1) выявление грандиозной, протяженностью около 60000 км, системы срединно-океанических хребтов и гигантских поперечных, т.н. трансформных, разломов, пересекающих их (рис. 1.12);

2) обнаружение и расшифровка линейных магнитных аномалий океанического дна, дающих возможность объяснить механизм и время их образования;

3) установление места и глубины гипоцентров (т.е. очагов) землетрясений в горных породах;

4) развитие палеомагнитного метода, основанного на изучении древней остаточной намагниченности горных пород, что дало возможность выявить перемещение континентов относительно магнитных полюсов Земли.



Рис.1.12. Рельеф дна Атлантического океана
(Bruce C., Heezen, 1977)

Заслуга в получении всех этих новых данных принадлежит большому коллективу геологов и геофизиков, но создание «тектоники литосферных плит» в конце 60-х годов XX века связано в первую очередь с именами Т. Уилсона (Канада), К. Ле Пишона (Франция) и Д. Моргана (США).

Новая геологическая парадигма (модель) в корне изменила прежние представления об эволюции Земли, по крайней мере за последние 3,0–3,2 млрд лет. С конца XIX века геологи были твердо уверены, что все структуры нашей планеты – океаны, материка, а также более частные структурные элементы – крупные горно-складчатые пояса и др., всегда находились на своих местах. Движения в них, хоть и медленные, могли быть только вертикальными, а горизонтальных перемещений быть не могло.

Из признания вертикальных движений, как главных сил, исходила т.н. геосинклинальная концепция Дж. Холла и Дж. Дэна, предложенная в 1873 г. на примере Аппалачей – гор в восточной части Северной Америки. Под геосинклиналью Дж. Дэна понимал относительно узкий, но длинный прогиб земной коры, впоследствии всегда находившийся на том же самом месте и не изменявшимся, что важно подчеркнуть, своей ширины.

Геологи всего мира очень быстро подхватили эту идею геосинклиналей, в том числе в России, а потом и в СССР. Образование начальных геосинклинальных прогибов объяснялось глубинными вертикальными разломами, проникающими ниже подошвы земной коры, т.е. ниже границы Мохоровичича. По этим разломам происходили излияния базальтовой магмы. Прогибы постепенно заполнялись лавами и продуктами их размыва. А затем структуры усложнялись за счет возникновения внутренних поднятий. Набор отложений становился более разнообразным, происходило внедрение гранитной магмы, менялся характер вулканизма и, наконец, вся эта масса отложений, благодаря вертикально действующим силам, деформировалась, сминалась в складки, а потом целиком поднималась с образованием горного рельефа. При этом горы разрушались и поставляли обломочный материал в передовые прогибы, формирующиеся перед фронтом горно-складчатого сооружения и как бы компенсирующие поднятие.

Вот такой сценарий рисовала геосинклинальная концепция для эволюции всех горно-складчатых сооружений – Урала, Кавказа, Альп, Карпат, а также всех других. В 40-е годы XX века американский ученый М. Кэй и немецкий Г. Штиле развили геосинклинальную концепцию, выделив внутренние зоны геосинклиналей – эвгеосинклинали (греч. «eu» – полнота, совершенство), характеризовавшиеся мощным базальтовым начальным вулканизмом, гранитоидным магматизмом, интенсивной складчатостью, сильным метаморфизмом. А внешние зоны геосинклинали – миогеосинклинали (греч. «meion» – приставка, указывающая на неполноту, неполноценность) характеризуются слабой вулканической активностью, более простой и поздно проявившейся складчатостью, слабым метаморфизмом или его отсутствием. Как правило, миогеосинклинали граничат с древними докембрийскими платформами, малоподвижными участками земной коры. И во многих складчатых системах и областях стали выделять эв- и миогеосинклинали. Но потом поняли, что и этого недостаточно для характеристики разных областей. И геосинклинальная концепция столкнулась с трудностями.

С появлением теории литосферных плит стало понятно, что структуры, которые мы сейчас наблюдаем, а также крупные части континентов в прежние геологические эпохи могли находиться совсем в других широтах; а океаны, в том виде, как мы их видим сейчас, начали образовываться не раньше 170 млн лет назад. Таков возраст древнейшей океанической коры. Океаническое дно постепенно расширялось за счет поступления базальтовой магмы из верхней мантии в срединно-океанические хребты, где находится узкая щель (рифт), от которой океаническое дно и расширяется. Этот процесс получил название *спрединг* (*spread* – растекание).

Идеи о разрастании океанической коры (спрединге) и палеомагнитология тесно связаны между собой. Г. Хесс и Р. Дитц в 1961–1962 гг. опубликовали статьи, ставшие вехами в истории геологической науки. Нарастивание океанической коры происходит в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов, где базальтовая магма поднимается вверх по трещинам вследствие конвективных движений в относительно нагретом веществе мантии. Попадая в условия океанского дна в рифтовых

ущельях, магма не только изливается на него, но как бы и расталкивает дно в стороны, внедряясь все новыми и новыми порциями. Естественно, что базальтовая магма, остывая, намагничивается по направлению силовых линий данной магнитной эпохи.

В 1958 г. впервые была установлена полосчатая форма магнитных аномалий северо-западной части дна Тихого океана. Сравнительно неширокие (до 40 км) полосы были намагничены то отрицательно, то положительно, причем интенсивность намагничивания вдоль каждой из полос практически не менялась. Оказалось, что полосы магнитных аномалий разного знака расположены симметрично по отношению к оси срединно-океанических хребтов. Подобная картина распределения магнитных аномалий требовала объяснений, которые не замедлили появиться в 1963 г. в статье выпускника Кембриджского университета Ф. Вейна и его научного руководителя Д. Мэтьюса. Оказалось, что обратная и прямая намагниченность полос базальтов напрямую связана с их возрастом. Приобретая знак намагниченности в момент образования, базальты впоследствии раздвигаются в стороны новыми порциями магмы, которые, в свою очередь, приобретают знак полярности уже другой эпохи, после инверсии магнитного поля. Периодические инверсии создают «матрацевидную» картину магнитного поля, а ее симметричность объясняется спредингом океанского дна.

Таким образом, соединились две продуктивные идеи, и проблема объяснения строения и эволюции океанского дна была решена. В океанах ширина полос магнитных аномалий одного знака, расположенных по обе стороны от срединного хребта, прямо пропорциональна длительности эпох данной полярности. На этом основании были проведены линии одинакового возраста океанической коры — изохроны, и каждой аномалии присвоен свой номер. Подтверждение этой картине дали результаты глубоководного бурения, так как оказалось, что возраст осадков океанского дна над магнитными аномалиями хорошо совпадает с рассчитанным возрастом самих магнитных аномалий. Сейчас составлены детальные карты возраста океанической коры, и геологические события последних 170 млн лет четко к ним привязываются.

Восстановление взаимного расположения континентов в геологическом прошлом основано на палеомагнитных данных, и в наше время получены настолько убедительные подтверждения их перемещения, что вряд ли можно сомневаться в медленных, но постоянных движениях литосферных плит, несущих на себе материи.

Применение палеомагнитного метода позволило осуществить детальные реконструкции раскрытия относительно молодых Атлантического, Индийского, Северного Ледовитого океанов и понять историю развития более древнего Тихого океана. Современное расположение континентов – это результат раскола суперконтинента Пангея, начавшегося около 200 млн лет назад. Линейное магнитное поле океанов дает возможность определить скорость движения плит, а в его рисунке заключена наилучшая информация для проведения геодинамического анализа.

Благодаря палеомагнитным исследованиям установлено, что раскол Африки и Антарктиды произошел 160 млн лет назад. Наиболее древние аномалии с возрастом 170 млн лет (средняя юра) обнаружены по краям Атлантики у берегов Северной Америки и Африки. Это и есть время начала распада суперматерика. Южная Атлантика возникла 120–110 млн лет назад, а Северная – значительно позже (80–65 млн лет назад). Подобные примеры можно привести по любому из океанов и, как бы «читая» палеомагнитную летопись, реконструировать историю его развития и перемещение литосферных плит.

Но Земля не может расширяться в своем объеме, должны быть участки, где расширение океанского дна компенсируется. И такие участки нашли. Ими оказались так называемые активные континентальные окраины, например, по краям Тихого океана. Там тяжелая океанская земная кора погружается под более легкую континентальную, и там же находятся глубоководные желоба, средняя глубина которых около 9 км, большое количество действующих вулканов и очень высокая сейсмичность, как результат взаимодействия пластины океанической коры с мантией, в которую она погружается (рис. 1.13).

Исключительно важным было открытие древней океанической коры на континентах, особенно в горно-складчатых областях. И ведь, что интересно, геологи раньше правильно

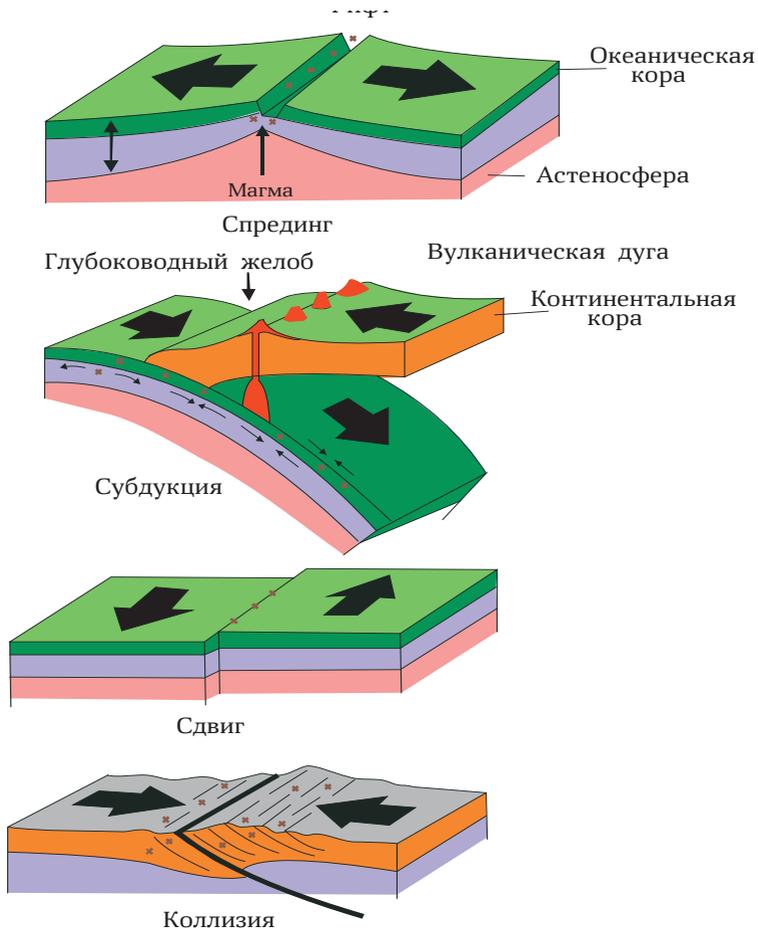


Рис.1.13. Элементы тектоники литосферных плит
(Н.В. Короновский, Г.В. Брянцева, 2013)

описывали последовательность пород, но не могли ее верно интерпретировать. А вот когда изучили строение и разрез коры в океанах, то поняли, что в виде фрагментов, остатки такой же, но древней коры присутствуют и в горно-складчатых областях. И что же, там в прошлые геологические эпохи тоже был океан? Или, по крайней мере, какой-то бассейн с базальтовой корой океанического типа? В рамках прежней геосинклиальной кон-

цепции это было невозможно понять. Или там, где такие породы находились, как, например, в Тагильской зоне Урала, ширина океана была 10 км? Представить существование такого океана также было невозможно.

С признанием того, что на земном шаре имеют место горизонтальные, причем весьма значительные, перемещения, стала понятна история развития регионов, в которых были обнаружены фрагменты древней океанической коры. Когда-то в этих местах были бассейны с корой океанического типа. Они возникли на континентальной коре, но впоследствии расширились путем спрединга, т.е. раскрытия океанского дна. А затем закрылись, океаническая кора погружалась под континентальную, возникали островные дуги с характерным вулканизмом, а потом эти регионы подвергались сжатию складчатости и поднятию с образованием гор в результате сближения континентальных массивов (см. рис.1.14).

Подводя итог краткому изложению революционных идей в геологической науке, надо сказать, что этот действительно новый шаг стал возможен благодаря успехам и достижениям в

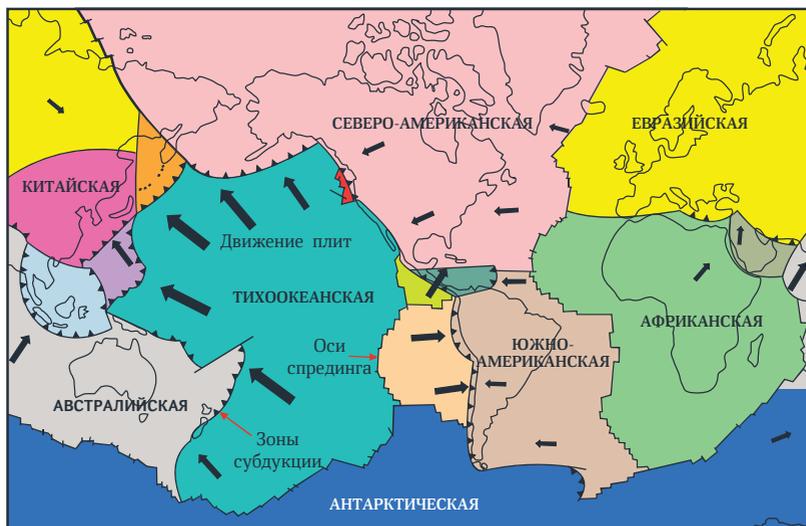


Рис.1.14. Литосферные плиты (по В.Е. Хаину и М.Г. Ломизе)

новых технологиях, особенно в изучении океана, космических исследованиях, геофизике, в частности, сейсмологии.

Становлению тектоники литосферных плит предшествовала длительная и нешуточная борьба в научном сообществе. По существу, первым, кто изложил эту концепцию в общем виде, был метеоролог из Германии Альфред Вегенер (1880–1930), выступивший в 1912 г. с публичной лекцией «Перемещение континентов» во Франкфурте-на-Майне и сразу же подвергшийся яростной критике со стороны геофизиков и геологов.

История жизни А. Вегенера (рис. 1.15) – «отца» новой геологической идеи заслуживает хотя бы краткого описания. Родившись в семье доктора геологии Рихарда Вегенера, он вместе с братом Куртом учился в гимназии и, окончив ее лучшим учеником, поступил в Берлинский университет, где в 1904 г. получил ученую степень по астрономии. В 1906 г. Курт и Альфред установили рекорд мира, продержавшись на воздушном шаре без посадки 52 часа. В этом же году Вегенер поехал с датским этнографом в экспедицию в Гренландию – это было время всеобщего увлечения полярными областями – и они составили описание побережий этого ледяного острова. Вернувшись в Германию и став доцентом Института физики, Вегенер увлекся метеорологией и даже опубликовал книгу о термодинамике атмосферы. Никогда не занимавшийся геологией, он вдруг увлекся ею и увидел, что, оказывается, континенты перемещаются, они двигаются, и этим можно объяснить не только сходство очертаний материков по обе стороны Атлантики, но и другие геологические факты.

В январе 1912 г. Альфред Вегенер выступил с докладом на съезде Немецкого геологического общества, но его соображения были разгромлены. Он не стал вступать в дискуссию с оппонентами и снова уехал в Гренландию, по возвращении из которой его застала война.

Находясь в Марбурге после ранения в руку, он много читает и пишет ряд статей, в которых уже гораздо увереннее обосновывает свою идею о движении материков. В 1924 г. А. Вегенер получает кафедру метеорологии и геофизики в университете г. Граца в Австрии. В апреле 1930 г. с небольшой группой иссле-

дователей из 14 человек он снова отправляется в Гренландию. Эта группа основала в центре ледяного щита Гренландии на высоте в 3 км маленькую станцию «Айсмитте», что означает «середина льдов», состоящую всего из одной палатки. От побережья эта станция находилась в 400 км. Сложности с доставкой грузов собачьими упряжками были огромными, и 1 ноября 1930 г., когда А. Вегенеру исполнилось 50 лет, он вместе с эскимосом Расмусом Виллумсеном отправился со станции к побережью за грузом. Больше их никто живыми не видел.



Рис. 1.15. Альфред Вегенер

12 мая 1931 г. новая группа людей со станции на побережье Гренландии двинулась к Айсмитте и где-то в 190 км в ледяном щите обнаружили лыжи и палки, воткнутые в снег и рядом тело А. Вегенера, скончавшегося, скорее всего, от инфаркта. А Росмуса Виллумсена так и не нашли. Альфреда Вегенера оставили там, где его и обнаружили, и теперь над его ледяной могилой возвышается железный крест из бурильных труб. Так отмечено место погребения ученого, идеи которого, изменившие геологию, нашли подтверждение только полвека спустя.

Геолог Р.Г. Чемберлен уже в 1926 г. на конференции в Нью-Йорке сказал: «Поверив в гипотезу А. Вегенера, мы должны будем забыть все, что узнали за последние 70 лет и начинать все сначала». Это было драматическое заявление. Борьба с идеями А. Вегенера продолжалась до конца 60-х годов XX века, после чего перестройка взглядов практически всех геологов за рубежом была завершена, но не у нас, где этой идее упорно сопротивлялись до последних лет, да и сейчас еще находятся геологи, которые высказывают сомнение.

Следует отметить, что еще за 150 лет до А. Вегенера М. В. Ломоносов, обратив внимание на сходство очертаний материков в Атлантическом океане, высказал мысль о том, что материки, которые находятся по обе стороны Атлантического океана, могли в прошлом быть вместе.

После того, как А. Вегенер впервые высказал свою идею о существовании 200 миллионов лет назад единого, огромного материка Пангея и его последующего распада, о ней, по существу, забыли, а если и упоминали, так для того, чтобы продемонстрировать нелепость этого предположения. Уничтожающая критика идей А. Вегенера происходила с позиций и взглядов, которые было очень трудно изменять геологам, впитавших их «с детства», если можно так сказать. Неприятие новых идей, сильно отличающихся от господствующих взглядов, основывалось на том, что эти взгляды надо было в корне менять. А этого совсем не хотелось, особенно пожилым ученым.

Прекрасное изложение начала и становления идей о перемещении континентов можно найти в замечательной книге профессора Бирмингэмского университета Э. Хэллема «Великие геологические споры».

На дне океана

30 лет назад с помощью глубоководных обитаемых подводных аппаратов в океанах были обнаружены участки с выходами на поверхность океанического дна горячих рудоносных растворов, формирующих современные месторождения сульфидных руд. Это было, вне всякого сомнения, одно из крупнейших открытий нашего века. Впервые исследователи получили возможность непосредственно наблюдать образование рудных месторождений. Гидротермальные растворы далеко разносят рудное вещество, оседающее на океанское дно, образуя металлоносные осадки, сведения о которых в пределах Восточно-Тихоокеанского поднятия поступили еще около 100 лет назад. В настоящее время эти осадки хорошо изучены в ряде мест, особенно во впадинах Красного моря. Вокруг выходов струй гидротермальных растворов, т. н. «черных курильщиков», была обнаружена фауна, приспособившаяся к высоким температурам

и необычным условиям обитания. Для геологов было исключительно важно установить, что современные залежи сульфидных руд в океанах имеют аналоги в древних складчатых областях в виде месторождений меди, свинца, марганца, железа и, таким образом, понять их происхождение.

«Черные курильщики» (рис. 1.16) были открыты В 1978 г. на Восточно-Тихоокеанском поднятии и стало ясно, что именно они являются источниками металлоносных осадков. Глубоководное бурение с кораблей «Гломар Челленджер» и «Джоидес Резолюшн» позволило установить их присутствие в осадочных толщах океанического дна. Экспедиции с применением подводных обитаемых аппаратов позволили детально описать постройки черных и белых «курильщиков», сделать великолепные снимки и фильмы, благодаря которым каждый из нас может воочию наблюдать это природное явление

Гидротермы разного типа обнаружены в океанических рифтах — протяженных впадинах, образующихся в результате разрыва земной коры. Рифтовые зоны, обладающие разной скоростью спрединга, представляют собой расходящиеся границы литосферных плит. Повышенный тепловой поток в этих зонах связан с многочисленными неглубоко залегающими магматическими очагами, из которых и происходят излияния базальтовой магмы, наращивающей океаническое дно. В 1986 г. одна из впадин этого рифта — Гуаймас в Калифорнийском заливе — была детально изучена экспедицией АН СССР на корабле «Академик Мстислав Келдыш».

Калифорнийский рифт обладает крутыми стенками, образовавшимися в результате разломов — сбросов, а самые молодые разломы возникли всего лишь 50–100 тыс. лет назад. Гидротермальное поле, исследованное с помощью наблюдений из подводных обитаемых аппаратов, сосредоточено у осевой, наиболее трещиноватой части дна рифта и состоит из многочисленных конусовидных построек, высотой до 50–70 м и диаметром в основании до сотен метров, но чаще всего в 20–30 м. Морфология конусов различная. Встречаются крутые конусы с острой вершиной; пологие — с «башенкой» в верхней части; конусы, меняющие свою крутизну и т.д. На вершине конусов находится сооружение, напоминающее каменную трубу, из от-

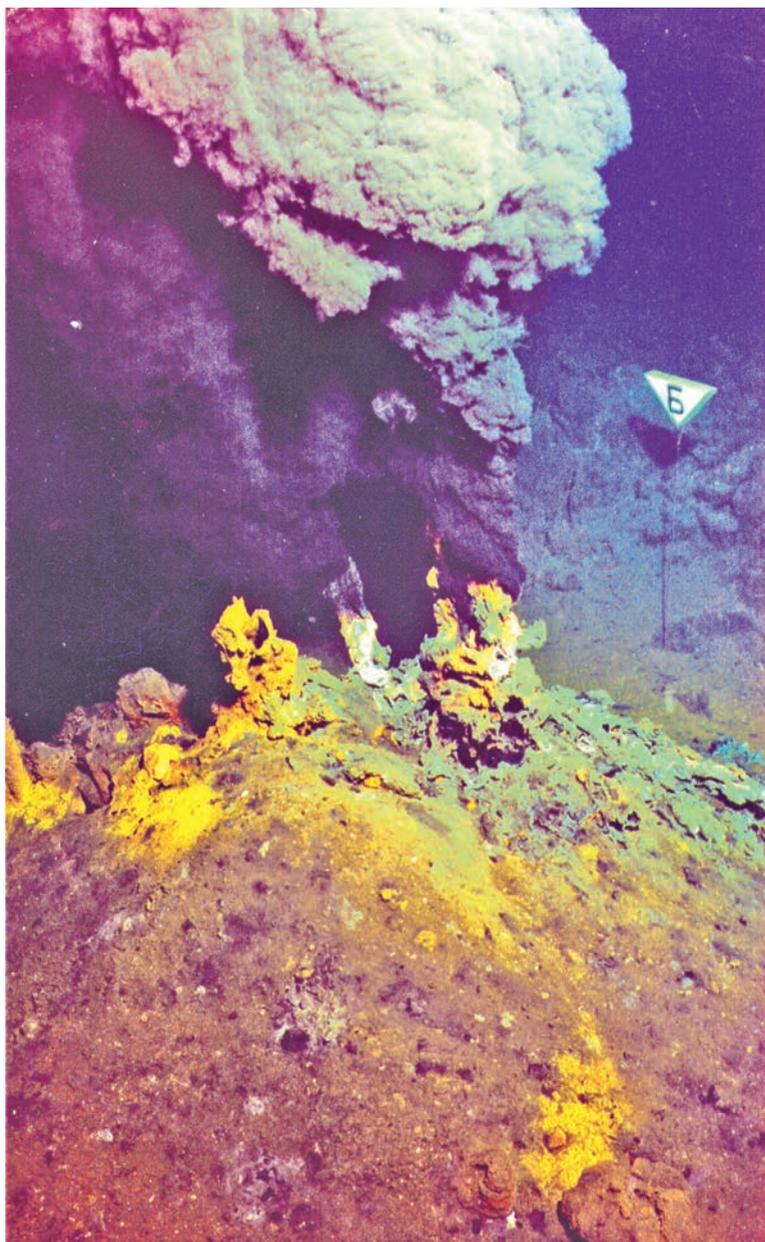


Рис. 1.16. Черный курильщик (фото О.Г.Сорохтина)

верстия которой вырывается черная взвесь, похожая на клубы густого дыма, поэтому такие образования и называли «черными курильщиками».

У действующих курильщиков температура взвеси, выходящей из отверстий труб, достигает 320°C. Иногда вместо конусов с поверхности дна поднимаются вертикальные колонны высотой 10–25 м, на вершине которых располагаются одна или несколько труб.

На поверхности башен, колонн и конусов, сложенных шлакоподобным веществом, располагаются, как наросты на березе, бактериальные маты – скопления бактерий, прикрепленных к субстрату и, кроме того, весьма необычные организмы – вестиментиферы в форме крупных и длинных (1,5–2 м) трубок, белого, красного и зеленого цветов, колышущихся при движении воды, как щупальца какого-то животного (рис. 1.17). Эти организмы являются большими трубчатыми червями, верхняя часть которых окрашена в ярко-красный цвет, т.н. султан, а сама трубка обладает перламутровой белой или зеленоватой окраской. Вокруг построек в изобилии распространены очень крупные, до 25 см в длину, матово-белые раковины двустворчатых моллюсков – калиптоген, а также кольчатые черви, названные помпейскими, потому что они непрерывно посыпаются, как пеплом, частицами серы из взвеси «черных курильщиков».

Таким образом, гидротермальные постройки на дне океанских рифтов образуют неповторимым сообществом организмов, приспособившихся к жизни в экстремальных условиях высоких температур и большой концентрации густой взвеси, поступающей из труб на вершинах построек.

Те формы построек, которые мы видим на поверхности океанического дна, представляют собой лишь небольшую часть гидротермальной системы, находящейся ниже его уровня. Морские воды, проникая на многие сотни метров по трещинам и разломам формирующейся рифтовой зоны в осадки и базальты океанической коры, нагреваются и обогащаются рядом химических, в том числе, рудных элементов. Такие гидротермальные растворы уже активно взаимодействуют с вмещающими породами, изменяя их и превращая в сульфидные руды.



Рис. 1.17. Вестиментиферы у черных курильщиков
(фото О. Г. Сорохтина)

Вся эта сложной формы колонна измененных пород превышает во многих случаях 0,5 км, т.е. больше Останкинской телебашни, а в ее центре находятся подводные каналы, по которым циркулируют гидротермальные растворы, выходя на поверхность дна в виде труб «черных курильщиков». Так возникают мощные рудные залежи.

Весьма поучительно, что в древних месторождениях медно-колчеданных руд, например, на Урале (Сибайское месторождение) или на Кипре и Ньюфаундленде геологи находили окаменелые остатки вестиментифер и калиптоген. Но только после обнаружения современных «черных курильщиков» стало ясно, в каких условиях формировались эти месторождения геологического прошлого.

Гидротермальные образования в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов, характеризующихся низкой, средней и высокой скоростью спрединга, в целом похожи, хотя существуют и некоторые различия. Там, где скорость спрединга высокая, гидротермальные образования располагаются внутри осевого, наиболее молодого ущелья, находящегося в центральной части рифта, причем, они связаны с открытыми трещинами, т.н. гьярами. Если скорость спрединга низкая или средняя, гидротермальные постройки могут располагаться и вне трещин, например, в Срединно-Атлантическом хребте.

Откуда берется рудное вещество в гидротермах? Несомненно, что решающую роль играют вулканические породы – базальты океанического дна и извержения базальтов, которые происходят в рифтовых зонах, наращивая океаническую кору. Как возникают собственно гидротермальные растворы – флюиды? Основным их источником является вода океанов, просачивающаяся вглубь океанической коры, сложенной базальтами. Для такого процесса вполне достаточно даже мелких, до 3 мм шириной, трещин, хотя широко развиты и более крупные, зияющие трещины. Они могут рассекать всю океаническую кору в осевых зонах срединно-океанических хребтов на глубины в несколько километров. Так, для Исландии достоверно установлено просачивание океанских вод на глубину до 3 км.

Факт глубокого проникновения в океаническую кору воды устанавливается и по изменениям древних аналогов современной океанической коры – офиолитовых комплексов, в которых влияние воды на процессы изменения пород затрагивает глубоко залегающие слои.

На циркуляцию воды влияет повышенный тепловой поток в рифтовых зонах, способный вызвать ее неустойчивость и конвективное перемещение. Неустойчивое состояние воды достигается при разных температурах в зависимости от давления. Так, при давлении в 250 бар критическая температура равна 375°C, а при $P = 700$ бар $\sim 500^\circ\text{C}$. Высокие температуры на глубине приводят к тому, что вода устремляется к поверхности, в сторону понижения давления.

Породы, располагающиеся непосредственно над магматическими очагами в рифтах, глубина залегания которых около

2–4 км, долгое время остаются горячими, и если до их уровня просачивается вода, то быстро охлаждаясь и уплотняясь, они растрескиваются, что облегчает дальнейшее проникновение воды. Область над очагом, по-видимому, является тем местом, где океанская вода, будучи сильно разогретой, активно взаимодействует с породами, извлекая из них ряд элементов.

Рудное вещество в гидротермальных струях осаждается на дно рифта в виде металлоносных сульфидных осадков. Так образуются слоистые залежи колчеданных руд. Металлоносные осадки впадины Атлантик II в Красном море являются современным рудным месторождением, и если бы не экологические проблемы, его можно было бы пустить в эксплуатацию. По данным новейших исследований за последние 3600 лет во впадине Атлантик II накапливалось: железа – 1780 тонн в год; марганца – 742 тонн; цинка – 110 тонн; меди – 23 тонн. Нетрудно представить, какой огромный объем руд мог сформироваться только в одной этой впадине, тянущейся вдоль оси Красного моря всего лишь на 14 км при ширине 5 км.

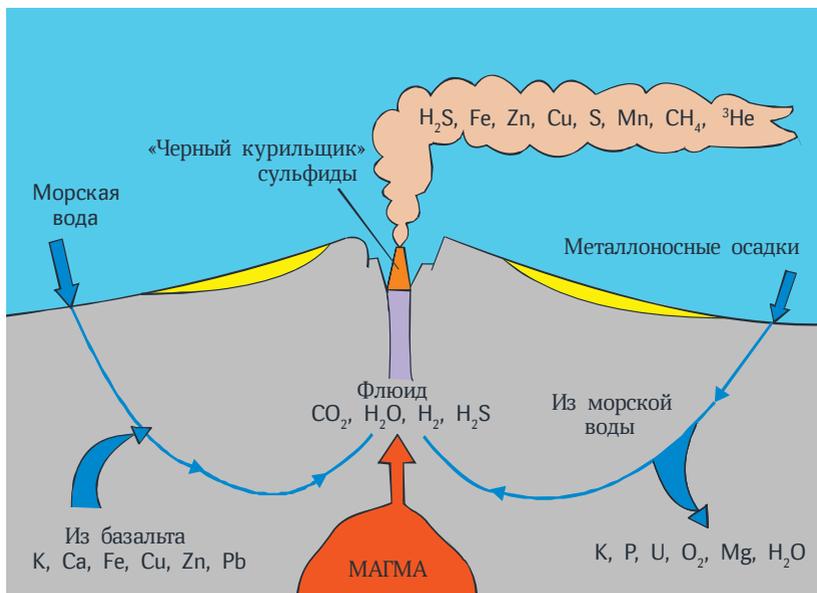


Рис. 1.18. Гидротермальная система срединно-океанического хребта (по Д. В. Гричку)

Открытие в конце 70-х годов нашего века в рифтовых зонах дна океанов горячих источников, выносящих огромное количество рудного вещества, состоящего из сульфидов железа, меди и цинка, позволило геологам воочию увидеть, каким образом формируются рудные месторождения. «Черные курильщики» распространены в большинстве рифтовых зон океанов. Но рудные залежи образуются не только в гидротермальных постройках. Взвесь, содержащая рудные компоненты, разносится течениями на большое расстояние от «курильщиков» и, осаждаясь, формирует металлоносные осадки (рис. 1.18).

То, что читатель узнал о рудных постройках в океанах, до последнего времени нам абсолютно неизвестных, говорит об открытиях, которые еще будут сделаны, т.к. технология и техника исследований не стоит на месте, и мы все больше убеждаемся во взаимодействии геосфер в Земле. Действительно, не существовал бы особый слой на границе внешнего ядра и мантии, не было бы медленно поднимающихся нагретых струй-плюмов; не было бы плюмов – не происходил бы спрединг – раскрытие океанов, не возникали бы очаги магмы и не формировались бы «курильщики», рудные столбы с фауной, ранее нам не известной. Иными словами, биосфера, гидросфера, кора, мантия, внешнее ядро – все оказывается в тесном взаимодействии, которое нельзя разорвать.