

ЗНАНИЕ

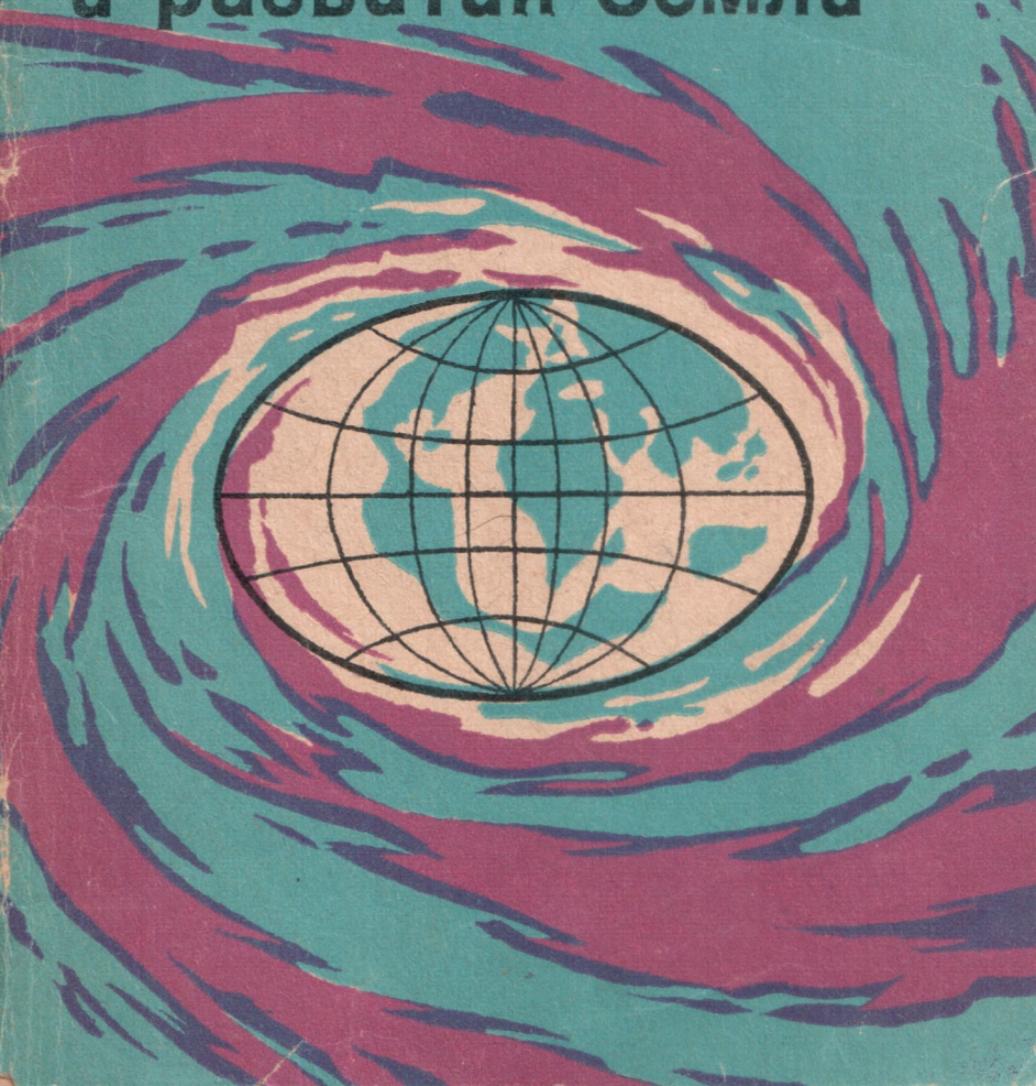
ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНЫЙ
ФАКУЛЬТЕТ

1974

НАРОДНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

М.М. Суго

**Основные концепции
строения
и развития Земли**



М. М. Судо,

доктор геолого-минералогических наук

ОСНОВНЫЕ КОНЦЕПЦИИ СТРОЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ЗЕМЛИ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»
Москва 1974

551.42
С89

Судо М. М.

С89 Основные концепции строения и развития Земли. М., «Знание», 1974.
96 с. (Нар. ун-т. Естественнонаучный фак.).

Книга знакомит читателей с основными концепциями и гипотезами строения и развития Земли. В ней рассказывается о глубинном строении, химическом составе и фазовом состоянии вещества земных недр, о строении океанического дна.

Книга предназначена для слушателей народных университетов и может быть полезна студентам и преподавателям в качестве учебного пособия.

551.42

С $\frac{20902-034}{073(02)-74}$ БЗ-26-10-74

Автор выражает искреннюю признательность академику АН Туркменской ССР К. К. МАШРЫКОВУ, высказавшему ряд ценных советов при подготовке рукописи к изданию.

...Фантазии легко разгуляться, когда имеешь дело с массами огромных размеров и с периодами времени почти бесконечными.

Ч. Дарвин

ПРЕДИСЛОВИЕ

Вопросы глубинного строения и эволюции Земли относятся к числу важнейших и наиболее дискуссионных проблем естествознания и прикладной геологии. Чем глубже пытаемся мы проникнуть в недра Земли, тем больше в наших представлениях становится доля гипотез и догадок. В настоящее время еще отсутствует единая стройная теория глубинного строения и развития Земли. Однако эти проблемы представляют большой научный и практический интерес. Например, именно химическим составом оболочек Земли определяется весь разнообразный комплекс полезных ископаемых. В глубоких недрах Земли зарождаются рудообразующие расплавы и напряжения, приводящие к землетрясениям.

Теперь все большее значение придается поискам глубоководных скоплений нефти, газа и руд. Решение практических задач, связанных с прогнозированием распространения полезных ископаемых сегодня, как никогда, зависит от знания причин и условий движения земной коры, образования и подъема к ее поверхности расплавленной магмы. Чтобы правильно объяснить процессы, происходящие на поверхности Земли и в ее наружной оболочке, необходимо изучать всю Землю, знать общие закономерности внутреннего строения и эволюции Земли.

В век научно-технической революции глубокие преобразования коснулись и геологической науки. В последние годы появились новые технические средства и методы — морское и сверхглубокое бурение, океанографические исследования, изучение Земли с помощью искусственных спутников и космических кораблей, новая

аппаратура для петролого-минералогических экспериментов и определения физических свойств минералов в условиях сверхвысоких давлений и температур, характерных для глубоких недр Земли. Резко возрос приток новой геологической информации. Это повлекло за собой пересмотр традиционных представлений, укоренившихся в области теоретических основ геологии в предшествующие годы.

В развитие основных положений теоретической геологии наряду с учеными многих стран мира значительный вклад внесен большим отрядом советских геологов и геофизиков. Наши ученые принимают активное участие в разработке современных концепций и в обсуждении актуальных проблем теории геологии на страницах научных журналов и в различных региональных и международных симпозиумах и конгрессах. Так, в 1960 г. по инициативе советских геологов Международный геодезический и геофизический союз (МГГС) принял «Проект верхней мантии». В его разнообразную программу входили комплексные международные исследования на суше и в океане, измерения потоков тепла, выделяющихся из земных недр в различных геологических зонах, глубокое и сверхглубокое бурение, прецизионные геодезические наблюдения, лабораторные исследования свойств горных пород при высоких температурах и давлениях. Международным признанием заслуг советских ученых было проведение в 1971 г. в Москве XV Генеральной Ассамблеи МГГС. Ее участники рассмотрели актуальные проблемы строения и эволюции Земли и в связи с завершением работ по «Проекту верхней мантии» приняли новую программу международных исследований — «Геодинамический проект». Она рассчитана на ближайшие 10 лет, посвящена изучению движений, наблюдаемых на поверхности Земли, процессов, происходящих в глубоких недрах, и познанию их взаимосвязи.

Знакомство с современными концепциями и проблемами строения и эволюции Земли представляет большой практический интерес прежде всего для сотрудников производственных геологоразведочных организаций, ведущих повседневный геологический поиск полезных ископаемых на обширных просторах нашей Родины. Однако этот вопрос еще недостаточно полно освещен в учебной и научно-популярной литературе, посвященной нау-

кам о Земле. Выступая на Всесоюзном слете студентов в октябре 1971 г., Генеральный секретарь ЦК КПСС Л. И. Брежнев подчеркивал: «Наука и ее практическое применение в жизни развиваются сейчас такими темпами, что много из даже недавно найденного, открытого нередко устаревает прежде, чем попадает в учебники и курсы лекций. Справедливо говорят, если бы человек, окончивший вуз пятнадцать — двадцать лет назад, не продолжал заниматься самообразованием, он бы в наши дни был безнадежно отсталым работником».

Таким образом, задача заключается в том, чтобы как можно быстрее донести до производителей новые достижения, идеи и проблемы современной теоретической геологии. В этом отношении большую помощь могут оказать народные университеты геологоразведчиков, для слушателей которых составлено настоящее пособие.

СЕЙСМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗЕМЛИ

Непосредственное проникновение в недра Земли на большие глубины в настоящее время технически неосуществимо. Поэтому ученые судят о строении и свойствах внутренних оболочек земного шара по косвенным данным, в частности, опираясь на наблюдения за распространением сейсмических волн от удаленных землетрясений или мощных искусственных взрывов. Сейсмические волны представляют собой упругие колебания частиц вещества Земли, излучающиеся из очага землетрясения или пункта взрыва. Ученые сравнивают их с рентгеновскими лучами, просвечивающими Землю и позволяющими выявить ее внутреннее строение. Сейсмические волны подразделяются на объемные, пронизывающие земной шар вглубь от поверхности до ядра, и поверхностные, распространяющиеся вдоль земной поверхности. Различают два типа объемных волн: продольные (P) и поперечные (S). В первых из них упругие колебания частиц вещества происходят в направлении распространения волны; в поперечных волнах частицы смещаются перпендикулярно направлению распространения волны.

Скорость и интенсивность распространения сейсмических волн зависит от физических свойств и химического состава пород. Продольные волны распространяются быстрее поперечных и могут проходить сквозь твердые и жидкие тела. Поперечные волны зафиксированы только в твердых телах. График, показывающий изменение с глубиной скорости распространения сейсмических волн (рис. 1); называется сейсмической моделью Земли.

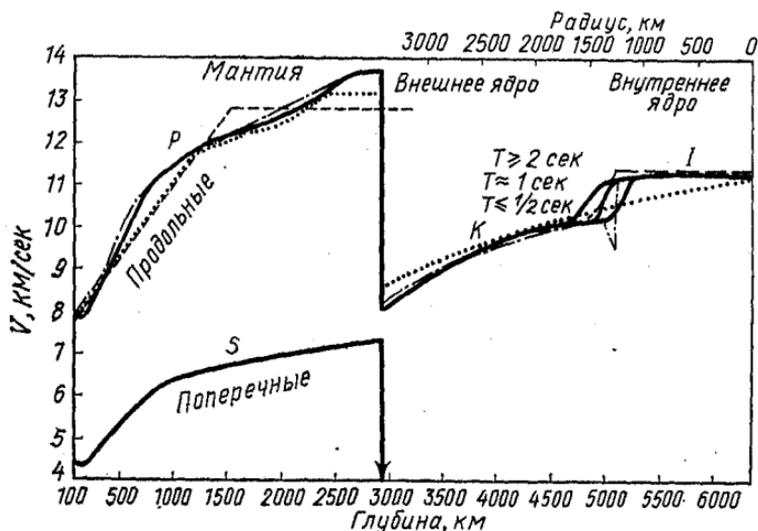


Рис. 1. Скорость продольных (P, K, I) и поперечных (S) сейсмических волн внутри Земли (по Б. Гутенбергу, 1963)
T — период.

В разрезе земного шара обычно выделяют земную кору, промежуточную оболочку, или мантию Земли, и земное ядро. Согласно представлениям Б. Гутенберга — К. Буллена, основанным на данных о распространении сейсмических волн, земные недра разделяются на ряд слоев, обозначаемых заглавными буквами латинского алфавита: A, B, C, D, E, F, G (рис. 2).

Слой A (0—35 км) — это земная кора. Скорость прохождения продольных сейсмических волн достигает здесь 6,5—7,2 км/сек. При переходе от земной коры к мантии происходит скачкообразное изменение скорости

распространения продольных волн от 6,5—7,0 до 7,7—8,2 км/сек. Эта сейсмическая граница, получившая название раздела Мохоровичича (или коротко — Мохо, или М), была открыта в 1909 г. югославским сейсмологом Мохоровичичем. Предполагается, что на этом уровне происходит резкое изменение состава или свойств вещества земных недр. Про-

веденные в последние годы детальные сейсмические работы в ряде районов СССР, по мнению некоторых исследователей, в частности профессора Н. А. Беляевского, дают основание считать, что раздел Мохо — это относительно тонкий слой (12—14 км) с множеством отдельных резко ориентированных отражающих площадок. При этом раздел Мохо не является, как это представлялось ранее, единой повсеместно развитой четкой сейсмической поверхностью. Сейсмическая резкость этого раздела неодинакова в различных районах, она сильно

уменьшается, например, когда в нижней части земной коры наблюдаются высокоскоростные слои со скоростью продольных волн 7,6—7,8 км/сек. Это имеет место в южном Тянь-Шане, на Кавказе и в других районах, где сейсмические различия между корой и верхней мантией становятся маловыразительными.

Слои В, С, D входят в состав мантии Земли; первые два из них образуют верхнюю мантию. Слой В (35—400 км)¹ включает область с пониженными значениями

¹ Некоторые исследователи указывают иные интервалы для оболочек Земли.

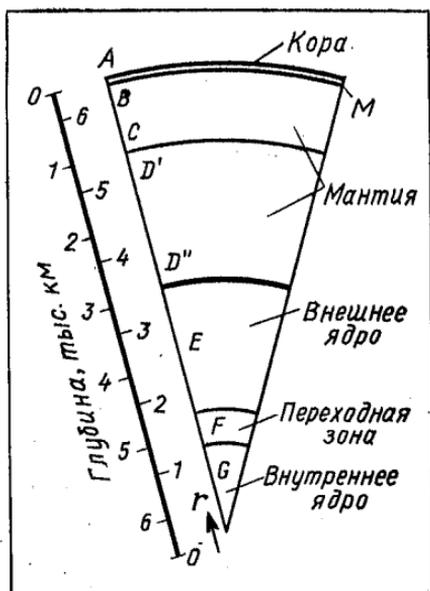


Рис. 2. Слои в Земле (по Б. Гутенбергу, 1963). М — граница Мохоровичича.

скоростей распространения сейсмических волн. Слой *C* (400—1000 км) характеризуется аномально быстрым возрастанием скоростей продольных и поперечных волн (см. рис. 1). Быстрое нарастание в его пределах сейсмических скоростей принимается за указание существенных изменений либо в составе, либо в состоянии вещества. Иногда эту переходную зону называют «слоем Голицина» по имени русского ученого, впервые установившего этот слой. Нижняя мантия представлена слоем *D* (1000—2900 км). Здесь различают слой *D'* (1000—2700 км) — область нормального возрастания скоростей сейсмических волн за счет давления вышележащих слоев и слой *D''* (2700—2900 км) — узкую пограничную область мантии с ядром, характеризующуюся постоянством скоростей продольных и поперечных волн (см. рис. 1).

Слой *E*, *F*, *G* образуют ядро Земли: слой *E* (2900—5000 км) — внешнее ядро, слой *F* (5000—5100 км) — переходную зону ядра и слой *G* (5100—6371 км) — внутреннее ядро. Сейсмическая граница между мантией и ядром на глубине 2900 км, открытая в 1914 г. немецким сейсмологом Б. Гутенбергом, является наиболее резкой границей раздела в недрах Земли. Здесь скорость продольных волн падает от 13,6 км/сек до 8,1 км/сек; скорости поперечных волн соответственно уменьшаются от 7,3 км/сек до нуля.

СВОЙСТВА И СОСТАВ ВНУТРЕННИХ ОБОЛОЧЕК ЗЕМЛИ

Земная кора

Земная кора имеет различную толщину и состав. В химическом отношении она состоит главным образом из кислых (более 65% SiO_2) — преимущественно гранитных и основных (40—52% SiO_2) — преимущественно из базальтовых пород. Их плотность равна 2,7—3,0 г/см³. По мнению многих ученых, существуют резкие отличия в составе и строении земной коры континентов и океанов.

Континентальная кора имеет толщину порядка 35—40 км (а в горных областях до 70 км). Мощность верхнего — осадочного слоя — достигает в глубоких впадинах 20—25 км. Скорость распространения продольных сейсмических волн в нем достигает 2—5,5 км/сек. Под осадочным слоем выделяется так называемый «гранитный» слой, средняя толщина которого — около 15 км. Верхняя часть «гранитного» слоя обнажается на кристаллических щитах и доступна здесь для непосредственного изучения. Этими обнажениями и кончаются наши сколько-нибудь определенные знания о составе земной коры. Скорость продольных волн в «гранитном» слое равна 5,5—6,3 км/сек. Ниже «гранитного» слоя залегает «базальтовый» слой земной коры. Мощность его достигает на континентах 20—35 км; скорость прохождения продольных сейсмических волн равна 6,5—7,2 км/сек. В основании земной коры в ряде районов выделяется слой со скоростями продольных волн 7,4—7,8 км/сек.

Раздел между «гранитным» и «базальтовым» слоями в сейсмическом отношении не всегда резкий. Условно он приравнивается к скоростям продольных волн порядка $6,8 \pm 0,4$ км/сек. Земная кора в пределах континентов не всегда может быть четко подразделена на «гранитный» и «базальтовый» слои. Известны случаи отсутствия «гранитного» слоя в разрезе земной коры континентальных участков. Например, в Прикаспийской синеклизе под исключительно мощной осадочной толщей (18—20 км) обнаружена «базальтовая» кора, лишенная «гранитного» слоя.

Названия «гранитный» и «базальтовый» слои не отражают их действительного петрографического состава. «Гранитный» слой лишь по химическому составу близок к граниту. В петрографическом отношении он, по-видимому, представлен не только гранитами, но также метаморфическими и другими изверженными породами. Поэтому этот слой иногда называют «гранито-метаморфическим» или «гранито-гнейсовым». По мнению ученых, «базальтовый» слой также состоит главным образом из метаморфических пород различной стадии метаморфизма. Член-корреспондент АН СССР В. В. Белоусов указывает, что это преимущественно породы высоких сте-

пёней метаморфизма гранулитовой фации¹ (плагноклазовые гнейсы с гранатом, кордиеритом и другими плотными минералами). Вместе с ними здесь присутствуют также основные и ультраосновные магматические породы, внедрившиеся из мантии. В. В. Белосов подразделяет «базальтовый» слой в прежнем понимании на две части. Верхнюю часть предлагается называть «гранулитобазитовым» слоем (породы гранулитовой фации и интрузии габбро), а нижнюю часть — «гранулитэклогитовым» слоем (смесь эклогитов с породами гранулитовой фации). Для первого слоя скорости продольных сейсмических волн равны 6,4—7,3 км/сек; для второго — 7,4—8,0 км/сек.

Мнение о том, что самый глубокий слой земной коры со скоростями продольных волн 7,2—7,8 км/сек может в значительной степени состоять из эклогита, образовавшегося путем метаморфизации основных магматических пород (базальты, габбро), разделяется также рядом других исследователей. В частности, австралийские ученые А. Рингвуд и Д. Грин считают, что при температуре 400—600°C в сухих условиях основные породы земной коры могут существовать в форме эклогитов или гранатовых гранулитов (при более значительном давлении). Эклогиты по химическому составу — высокому содержанию Mg, Ca, Fe — сходны с основными изверженными породами. Но они значительно превосходят базальты и габбро по плотности. Этим, по мнению ученых, и объясняются повышенные — «промежуточные» между корой и мантией — скорости сейсмических волн в «гранулитэклогитовом» слое.

Океаническая кора. Под океанами толщина земной коры обычно не превышает 4—8 км. В отличие от континентов здесь на обширнейших пространствах отсутствует «гранитный» слой; он выделяется лишь на отдельных структурах. В пределах океанов под верхним слоем осадков мощностью до 1—2 км залегает толща (до 4—5 км) различных по составу базальтовых пород, подстилаемых более плотными породами верхней мантии. Более подробно этот вопрос будет рассмотрен ниже при описании строения океанического дна.

¹ Для гранулитовой фации метаморфизма характерно чрезвычайно низкое содержание воды.

Верхняя мантия

Слой В. Предполагается, что мантия — наибольшая по объему и массе часть Земли — состоит из вещества, сходного с самыми плотными породами, обнаруженными на земной поверхности. Плотность пород мантии на границе с земной корой равна $3,3 \text{ г/см}^3$. Судя по возрастанию скорости сейсмических волн по направлению к земному ядру, плотность вещества должна увеличиваться по мере роста давления с глубиной. Однако в верхней части мантии, внутри слоя В, существует область, в которой скорость прохождения сейсмических волн уменьшается на 3—5% (см. рис. 1). Это связывают с понижением вязкости и, возможно, плотности вещества. Зона понижения скорости сейсмических волн, выделенная впервые в 1926 г. Б. Гутенбергом, получила название волновода, или астеносферы; слой В, в состав которого входит волновод, называют «слоем Гутенберга».

Глубина залегания и толщина волновода неодинаковы под континентами и океанами. Под материками волновод расположен в интервале глубин 100—250 км, а под океанами — 50—400 км. Появление волновода обычно рассматривается как результат изменения фазового состояния вещества верхней мантии. По представлениям Б. Гутенберга, это вызвано преобладанием на некоторой глубине влияния температуры над влиянием давления. При повышении температуры вещество становится менее вязким, и скорость прохождения через него сейсмических волн понижается. Повышение давления увеличивает плотность вещества и обуславливает возрастание скорости сейсмических волн. Исходя из этой концепции, ученые предполагают, что вещество астеносферы находится либо в расплавленном (частично или полностью), либо в аморфном состоянии. Через волновод проходят поперечные волны. По мнению члена-корреспондента АН СССР В. А. Магницкого, это обстоятельство не позволяет считать слой низких скоростей эффективно жидким. Вещество здесь может находиться в размягченном стекловидном, аморфном состоянии.

Астеносфера, таким образом, по своим физическим свойствам протivостоит жесткой литосфере, объединяющей земную кору и самую верхнюю — надастеносферную часть верхней мантии. Вследствие этого именно

астеносфера обладает многими свойствами, которые прежде приписывались «базальтовому» слою земной коры. Крупные блоки литосферы вследствие малой вязкости астеносферы находятся в состоянии изостатического равновесия. В астеносфере расположены первичные магматические очаги вулканов и зарождаются базальтовые магмы, проникающие по вулканическим каналам и трещинам в земную кору. Здесь предполагается существование конвекционных потоков и гравитационной дифференциации вещества. Все эти явления активно влияют на тектоническое развитие земной коры и определяют ее геологическое строение.

В вопросе о природе раздела Мохо и составе вещества слоя *B* существуют три основные гипотезы: одна — эклогитовый состав пород слоя *B*, другая — ультраосновной, а третья — разный состав в различных районах.

Гипотеза эклогитового состава. По мнению ряда исследователей, на границе Мохо происходит фазовый переход основных пород (базальты, габбро) земной коры в эклогиты верхней мантии. Эклогиты — это также основные породы. В химическом отношении они подобны базальтам (табл. 1), отличаясь в то же время от базальтов и габбро минеральным составом и большей плотностью. В базальтах и габбро главные минералы представлены основными плагиоклазами и моноклинными пироксенами. Эклогиты состоят почти полностью из двух минералов: пироксена и граната. Плотность базальтов и габбро 2,9—3,0 г/см³; эклогитов — 3,4—3,6 г/см³.

Таблица 1

Состав базальтов, эклогитов и перидотитов
(в весовых процентах)

Состав	Базальт	Эклогит	Перидотит
SiO ₂	49,9	49,9	43,9
Al ₂ O ₃	16,0	14,5	4,0
Fe ₂ O ₃	5,4	3,8	2,5
FeO	6,5	9,1	9,9
MgO	6,3	8,9	34,3
CaO	9,1	11,5	3,5
Na ₂ O	3,2	2,5	0,6
K ₂ O	1,5	0,7	0,2

Гипотеза ультраосновного состава. Многие ученые считают, что ниже границы Мохо развиты ультраосновные породы, отличающиеся от основных пород земной коры прежде всего химическим составом — значительно меньшим содержанием кремнезема (менее 40% SiO_2). Предполагается, что верхняя мантия сложена преимущественно некоторыми разновидностями перидотита — ультраосновной породы, состоящей главным образом из оливина (до 70—80%) и пироксена. Возможно, такими породами являются гранатовые перидотиты. К подобному выводу приводит, в частности, сопоставление состава гранатовых перидотитов с составом метеоритов (хондритов), из вещества которых, по представлениям ученых, состоит мантия Земли. Петрографический анализ образцов глубинных пород показывает, что при практическом одинаковом химическом составе, близком к гранатовым перидотитам, могут быть породы различного минерального состава, например: оливин + амфиболы; оливин + + плагиоклаз + энстатит + клинопироксены; оливин + + энстатит + диопсид + шпинель; оливин + пироп + + пироксены.

По мнению А. Рингвуда, гранатовые перидотиты развиты только ниже астеносферы. Астеносфера представляется областью распространения пироксеновых перидотитов, содержащих также плагиоклазы, за счет которых происходит понижение скорости сейсмических волн. Над астеносферой, до границы Мохо, А. Рингвуд выделяет дунит¹ — перидотитовый слой, который, возможно, отсутствует под океанами. Именно пироксеновый перидотит в области астеносферы отвечает исходному материалу верхней мантии. Из него в результате частичного плавления выделяется легкоплавкая базальтовая магма, пополняющая земную кору. А дуниты (или перидотиты), слагающие верхнюю часть мантии, остаются после выделения из пироксенового перидотита базальтов. В. В. Белоусов все же считает наиболее вероятной исходной породой верхней мантии гранатовый перидотит, подвергая сомнению возможность существования пироксеновых перидотитов на глубинах, соответствующих астеносфере.

По представлениям А. Рингвуда, породы верхней

¹ Дунит — ультраосновная порода, почти целиком состоящая из оливина.

мантии ниже дунит-перидотитового слоя по составу отвечают гипотетическому веществу, соответствующему трем частям перидотита и одной части базальта. Порода такого состава должна являться главным образом смесью пироксена и оливина. По первоначальным слогам этих минералов она была названа А. Рингвудом пиролитом. Химический состав пиролита (табл. 2) в целом близок к составу хондрита, из вещества которого, как упоминалось выше, образована мантия Земли.

Таблица 2

Химический состав пиролитовой модели и мантии
(А. Рингвуд, 1972)

Состав	Пиролитовая модель	Модель мантии ¹
SiO ₂	45,16	43,25
MgO	37,49	38,10
FeO	8,04	9,25
Fe ₂ O ₃	0,46	9,25
Al ₂ O ₃	3,54	3,90
CaO	3,08	3,22
Na ₂ O	0,57	
K ₂ O	0,13	
Cr ₂ O ₃	0,43	
NiO	0,20	
CoO	0,01	
TiO ₂	0,71	
MnO	0,14	
P ₂ O ₅	0,06	
Сумма	100,00	

¹ Рассчитано по составу хондритов.

Гипотеза различного состава. По мнению ряда ученых, например советского исследователя С. М. Стишова, граница Мохо под океанами является химической границей, отделяющей основные (базальтовые) породы земной коры от ультраосновных (перидотитовых) пород верхней мантии. В то же время под континентами граница Мохо имеет иную природу. Здесь она якобы является следствием фазового перехода базальтов земной коры в эклогиты верхней мантии и разделяет две минеральные фазы, имеющие одинаковый (основной) хими-

ческий состав, но отличающиеся по физическим свойствам (рис. 3).

Некоторые исследователи, полагая, что под материками граница Мохо — преимущественно химическая по своей природе, склонны при этом считать, что в ряде областей молодой тектонической активности эта граница может быть фазовой и отражать переход габбро земной коры в эклогиты верхней мантии. Имеется и другая точка зрения, согласно которой в указанных районах за

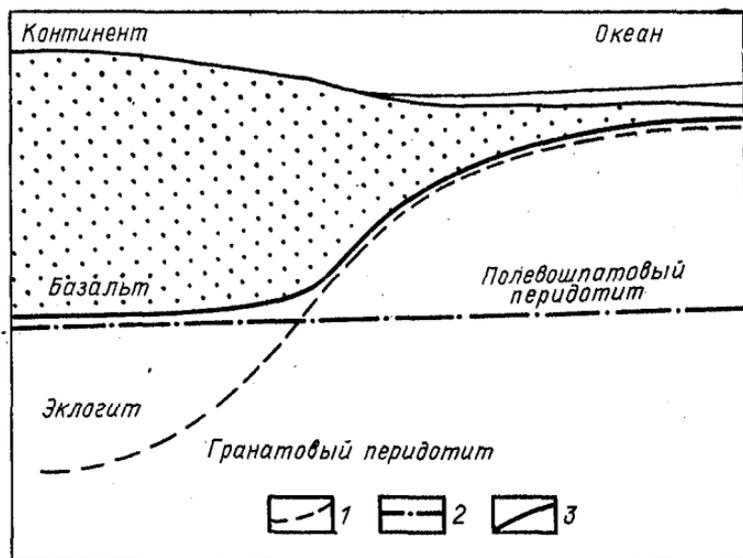


Рис. 3. Взаимное расположение химической и фазовой границ в подошве земной коры (по П. Уайли).

1 — граница химического изменения вещества коры; 2 — граница фазового перехода; 3 — граница Мохо.

раздел Мохо может неправильно приниматься граница, отделяющая габбровую часть «корня гор» от его более глубокой эклогитизированной части. Сторонники этой точки зрения (П. Уайли, В. А. Магницкий) отмечают, что в данном случае действительная граница Мохо (переход эклогитов земной коры в перидотиты верхней мантии) будет располагаться ниже очевидного резкого сейсмического раздела, принимаемого за поверхность Мохо. Эта граница будет слабо выделяться, по данным сейсмо-

логии, из-за малого скачка скоростей при переходе от эклогитов к перидотитам.

Слой С. В последние годы получены данные, указывающие на существование в мантии трех растянутых ступеней скачкообразного изменения плотности вещества мантии. Скачки в нарастании скорости сейсмических волн отмечаются на границе слоев *B* и *C* в интервале глубин 350—400 км; в средней части слоя *C* на глу-

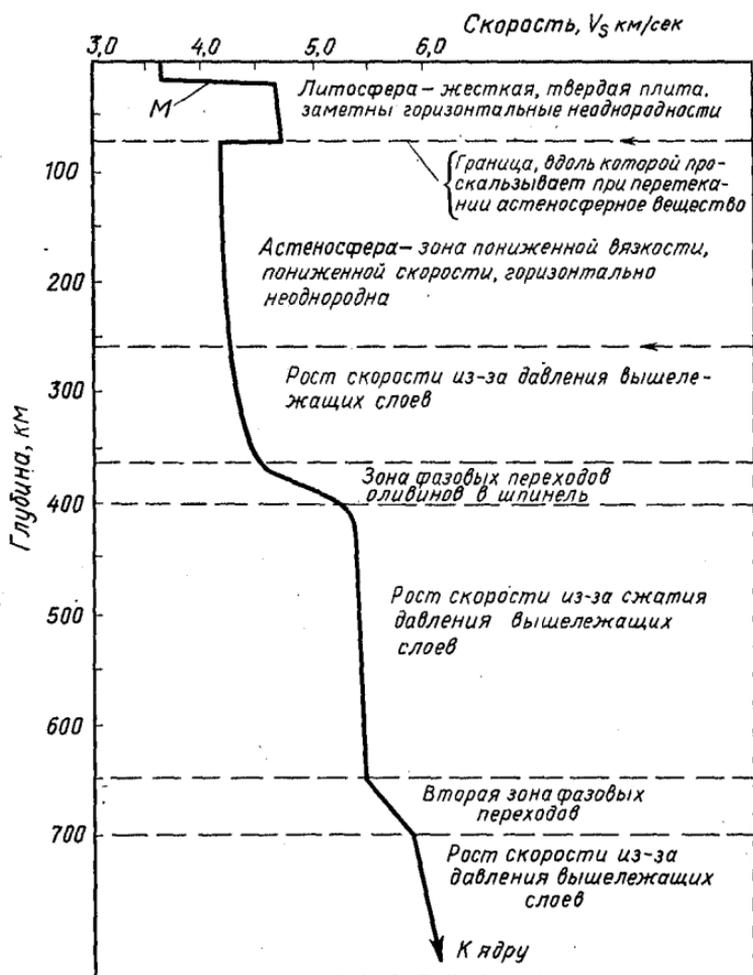


Рис. 4. Модель верхней мантии Земли (по В. Н. Жаркову, 1973).

бине 650—700 км (рис. 4) и на границе между слоями С и D — 1000—1050 км. Экспериментальными работами по физике высоких давлений доказано, что на глубинах, соответствующих аномальным нарастаниям скорости сейсмических волн, возможны фазовые переходы главных минералов ультраосновных пород, слагающих мантию Земли, — оливина и пироксена. Под влиянием веса вышележащих пород в условиях огромных давлений и высоких температур они приобретают более компактную структуру за счет уплотнения упаковки молекул. Так, на глубине 350—400 км обычный оливин из нормальной поверхностной структуры переходит в более плотную шпинелевую модификацию, а пироксен переходит в гранат.

Гипотеза превращения оливина в шпинель. Основным компонентом мантии принято считать оливин $(Mg, Fe)_2SiO_4$, являющийся главной составной частью каменных метеоритов. Поэтому фазовые переходы оливина представляют наибольший интерес.

Кристаллы всех минералов имеют решетку, построенную на закономерном расположении в пространстве точек (узлах). Проведением прямых линий и плоскостей через эти точки пространственная решетка кристаллов разбивается на равные параллелепипеды (ячейки). В 1848 г. французский ученый О. Браве геометрически вывел четырнадцать пространственных решеток. Они принадлежат к четырем типам: примитивному, базоцентрическому, объемноцентрированному и гранецентрированному. В решетках примитивного типа узлы расположены только в вершинах параллелепипеда (параллелепипед, у которого все боковые грани — прямоугольники, называется прямоугольным; параллелепипед, все грани которого квадраты, называется кубом). В решетках базоцентрического типа к ним добавляется еще по одному узлу в центрах двух противоположных граней. Объемноцентрированный тип решетки характеризуется тем, что к узлам примитивного типа добавлен узел в центре ячейки, в решетках гранецентрированного типа — по одному узлу в центре каждой грани. Кристаллы оливина имеют так называемую гексагональную¹ базоцентриче-

¹ Кристаллы гексагональной сингонии имеют одну ось симметрии.

скую пространственную решетку (рис. 5). В ячейках кристаллической решетки оливина ионы кислорода O^{-2} располагаются по вершинам ячейки и в центре одной пары параллельных граней.

В 1936 г. английский физик Дж. Берналл¹ высказал теоретическое предположение, что в условиях мантии Земли при достаточно высоких давлениях обычный оливин с гексагональной упаковкой ионов кислорода O^{-2} может переходить в более плотную модификацию, при-

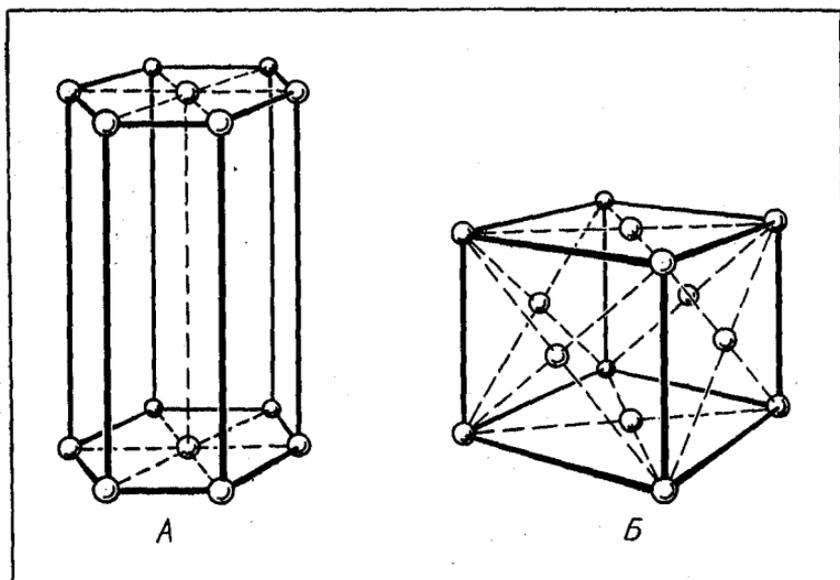


Рис. 5. Расположение узлов в гексагональной базоцентрической (А) и кубической гранецентрированной (Б) решетках.

обретая при этом внутреннюю структуру минерала шпинеля, имеющего состав $(Mg, Fe)Al_2O_4$ и удельный вес 3,55. Эта новая модификация оливина, сохраняя прежний, в целом оливиновый состав, должна отличаться более плотной упаковкой молекул. В структуре шпинеля ионы кислорода O^{-2} также образуют плотную упаковку, но не гексагональную базоцентрическую, как в кристал-

¹ Прогрессивный общественный деятель,

лах оливина, а кубическую¹ гранцентрированную — еще более плотно упакованную. В такой упаковке ионы кислорода O^{-2} располагаются по вершинам ячейки и в центре ее граней. В результате указанного фазового перехода плотность шпинелевой модификации возрастает на 11% по отношению к плотности оливиновой модификации.

Спустя более двадцати лет предположение Дж. Бернала было подтверждено экспериментальным петрологическим исследованием. В 1958 г. австралийский ученый А. Рингвуд впервые обнаружил оливин-шпинелевый переход в процессе лабораторного эксперимента. В химическом отношении оливин представляет собой непрерывный изоморфный² ряд, крайними членами которого являются минералы форстерит (Mg_2SiO_4) и фаялит (Fe_2SiO_4). А. Рингвуд получил шпинелевую полиморфную модификацию фаялита. Впоследствии А. Рингвуд и А. Мейджор экспериментально исследовали систему $Mg_2SiO_4 - Fe_2SiO_4$ при давлениях 50—100 кбар и температурах около $1000^\circ C$. В результате ими было установлено, что при указанных

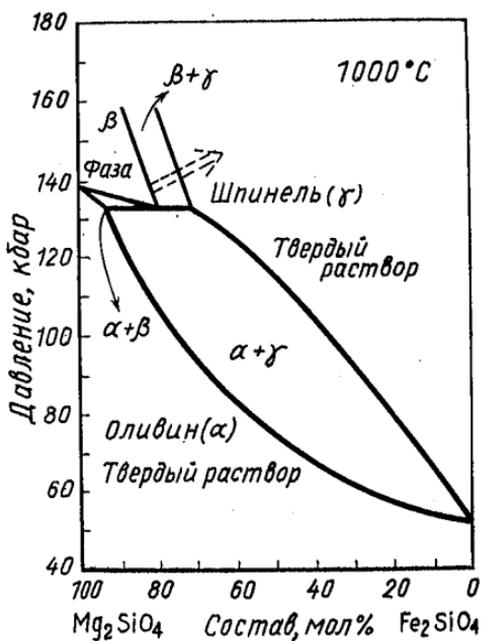


Рис. 6. Фазовая диаграмма системы $Mg_2SiO_4 - Fe_2SiO_4$: α — оливиновая фаза, γ — шпинелевая фаза, β — фаза модифицированного шпинеля.

¹ Кристаллы кубической сингонии имеют три оси симметрии.

² Изоморфизм (греч. «исос» — равный; «морфэ» — форма) — свойство веществ, родственных по химическому составу, кристаллизоваться в близких формах, образуя кристаллы переменного состава.

температурах и давлениях система $\text{Fe}_2\text{SiO}_4 - (\text{Mg}_{50}\text{Fe}_{20})_2\text{SiO}_4$ полностью приобретает шпинелевую структуру. А. Рингвуд и А. Мейджор построили полную фазовую диаграмму данной системы, приведенную на рис. 6. Она соответствует изометрическому сечению $T = 1000^\circ\text{C}$. Из рассмотрения диаграммы вытекает, что при больших концентрациях Mg (Mg_2SiO_4 около 80% и более) и давлении 130 кбар и более появляется фаза (β) модифицированной шпинели. При этом поле стабильности β -фазы расширяется с ростом температуры. На рис. 6 это схематически обозначено стрелкой. В реальных оливинах мантии Земли концентрация магния составляет 80% и больше. Температуры в верхней мантии на глубинах около 400 км, для которых фиксируется поверхность сейсмического раздела, равны примерно 2000°C . В соответствии с полученной фазовой диаграммой (см. рис. 6) на этих глубинах должен происходить фазовый переход оливин-модифицированная шпинель ($\alpha \rightarrow \beta$), а не оливин — шпинель ($\alpha \rightarrow \gamma$), как предполагал Дж. Берналл. При этом плотность должна возрастать на 7%.

Гипотеза превращения пироксена в гранат. Второй главный минерал ультраосновных пород мантии Земли пироксен $(\text{Mg}, \text{Fe}) \text{SiO}_3$ — представляет собой минеральную систему, крайними членами которой являются минералы энстатит (MgSiO_3) и гиперстен (FeSiO_3). По данным А. Рингвуда и Д. Грина, главным переходом, происходящим в мантии с увеличением глубины, является, по-видимому, переход пироксен — гранат. Они изучили поведение при высоких давлениях энстатита, содержащего 5 и 10% алюминия. При давлениях 150 кбар и выше они зафиксировали превращение пироксена в пироповый гранат¹. А в интервале давлений 90—150 кбар образовывались твердые растворы энстатита и граната. На этом основании ученые сделали вывод, что в верхней мантии на глубинах 350—500 км большинство пироксенов переходит в новые фазы со структурой граната (с октаэдрической координацией атомов кремния). Этот переход сопровождается увеличением плотности примерно на 10%.

Среди других переходов представляется также воз-

¹ Пироп — магнезиально-глиноземистый гранат.

Можным превращение пироксенов в смесь шпинели и стишовита (высокоплотная модификация кварца) и в ильменитовую структуру. Японский исследователь С. Акимото установил переход пироксена в оливин с выделением стишовита при давлении 100 кбар и температурах 800—1200°C.

Вторая зона фазовых переходов. Ниже первой зоны фазовых переходов в слое С скорости сейсмических волн плавно возрастают под влиянием роста давления вышележащих слоев. Состав этой зоны, по-видимому, однороден. По А. Рингвуду, для нее характерна β -фаза шпинели, имеющая состав: $(Mg, Fe)_2SiO_4$ — 57%; твердый гранатовый раствор — 39%; щелочной пироксен — жадеит $(Na, Al[SiO_3]_2)$ — 4%. Плотность материала — 3,62 г/см³.

Затем, в интервале 650—700 км происходит резкий скачок скоростей сейсмических волн (см. рис. 4). Аномальный рост скорости сейсмических волн на указанной глубине объясняется по-разному. В начале 50-х годов нынешнего столетия американский ученый Ф. Берч и советский геофизик В. А. Магницкий высказали гипотезу, получившую название «окисной». Согласно этой гипотезе, силикаты при высоких давлениях распадаются на окислы: MgO, FeO, Al₂O₃. По А. Рингвуду и Д. Грину, на глубине 650—700 км происходит фазовый переход основных пороодообразующих минералов мантии Земли в более сложные структуры.

Ниже второй зоны фазовых переходов, начиная с глубины 700 км и до глубины 1000 км, скорости сейсмических волн плавно нарастают под влиянием давления вышележащих слоев. Полагают, что эта однородная зона представляет собой твердый раствор состава: $(Mg, Fe) SiO_3$ — $(Al, Cr, Fe)_2O_3$ — 36%, стронциево-плюмбатная структура вещества, имеющего состав $(Mg, Fe)_2SiO_4$ или $(Mg, Fe) SiO_3$ с ильменитовой структурой + $(Mg, Fe)O$ — 55%, перовскит $(CaSiO_3)$ — 6,5%, кальциевый феррит — 2,5%. Плотность предполагают равной 3,99—4,03 г/см³.

Нижняя мантия

На границе слоев *C* и *D*, в интервале глубин 1000—1050 км предполагаются переходы к ассоциации $(\text{Mg}, \text{Fe}) \text{SiO}_3$ с перовскитовой структурой + $(\text{Ca}, \text{Fe}, \text{Mn})$; перовскит + $\text{Mg} (\text{Al}, \text{Cr}, \text{Fe})_2 + \text{O}_4$ или кальциевый феррит + $(\text{Mg}, \text{Fe})_2 \text{SiO}_4$.

О строении мантии в пределах слоя *D* (1000—2900 км) известно очень мало. Сейсмические скорости здесь характеризуются очень медленным нарастанием с глубиной. Это может быть объяснено влиянием возрастающего с глубиной всестороннего давления при боль-

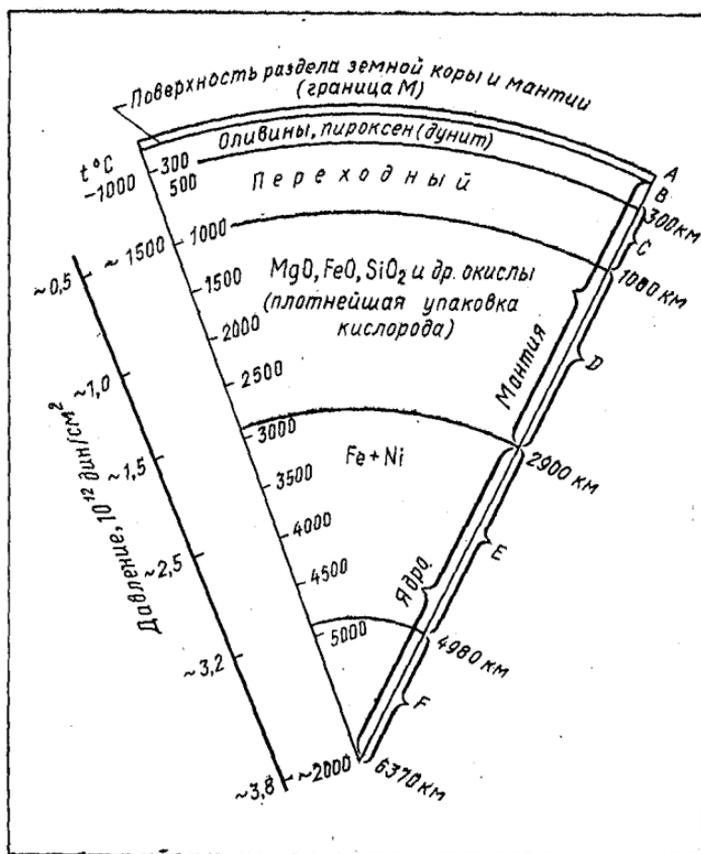


Рис. 7. Разрез земного шара (по А. П. Виноградову).

шой однородности состояния и состава вещества нижней мантии. В. А. Магницкий допускает, что нижняя часть мантии может состоять из смеси окислов: магния, алюминия, кремния, титана, железа. Эта точка зрения разделяется также академиком А. П. Виноградовым (рис. 7). Плотность вещества нижней мантии изменяется от 4,68 до 5,69 г/см³.

Ядро Земли

Плотность наружных пород земной коры равна 2,8 (граниты) — 3,0 г/см³ (базальты), а средняя плотность Земли намного больше 5,5 г/см³. Это привело ученых к выводу о том, что у Земли имеется центральное ядро, плотность которого должна превосходить плотность мантии. Наблюдения за приливами в теле Земли показали, что они в действительности сильнее, чем это можно было ожидать для планеты, состоящей полностью из твердого материала. Эти данные послужили основанием для предположения о возможно жидком ядре. Гипотеза жидкого ядра подтверждается, в частности, тем, что земное ядро не пропускает через себя поперечные волны. Однако поскольку вещество ядра находится при высокой температуре и под колоссальным давлением (более чем в миллион раз превышающим атмосферное), его поведение отлично от поведения жидкости на поверхности Земли. В последние годы были обнаружены слабые отраженные волны от границы внутреннего ядра. Это принимается как указание о том, что внутреннее ядро (зона G) находится в твердом состоянии. Полагают, что в переходной зоне F вещество также является твердым.

Существующие концепции предполагают разный состав ядра Земли. Выше отмечалось, что на границе мантий и ядра происходит скачкообразное уменьшение скорости сейсмических волн. Некоторые исследователи пытаются объяснить это более высоким содержанием водорода в ядре, чем в мантии. Они считают, что эти заметные количества водорода остались в ядре от первичного вещества Земли.

В свое время большое распространение имела гипотеза расплавленного железного ядра. Поводом для ее выдвигания послужило сопоставление двух фактов: высокой плотности железа при нормальных условиях

($7,85 \text{ г/см}^3$) и существование железных метеоритов. Последние рассматриваются как обломки ядра распавшейся планеты. Представление о железном ядре опирается на космогоническую канто-лапласовскую гипотезу о первично огненно-жидком состоянии Земли. Исходя из этой гипотезы, норвежский геохимик В. Гольдшмидт выдвинул гипотезу, согласно которой железо-никелевое ядро образовалось в результате гравитационной дифференциации вещества Земли. Предполагалось, что такая дифференциация земного вещества подобна процессу разделения на металл и шлак в доменной печи.

В 1939 г. советский ученый В. Н. Лодочников предложил гипотезу ядра, состоящего из металлизированных силикатов. В дальнейшем ее развил финский ученый В. Рамзей. Согласно этой гипотезе граница мантии с ядром является не химической границей, как в случае железного ядра, а фазовой. Предполагается, что силикаты мантии на границе с ядром испытывают фазовый переход с примерно двукратным увеличением плотности. При этом силикаты еще и металлизуются, т. е. переходят в металлическое состояние.

Позднее была проведена экспериментальная проверка этой гипотезы. Так, в начале 60-х годов нынешнего столетия советские ученые (Л. В. Альтшулер и другие) исследовали сжатие силикатов (оливина) при сверхвысоких давлениях, достигавших $5 \cdot 10^6 \text{ бар}$. Это значительно больше, чем давление на границе мантии и ядра ($1,35 \cdot 10^6 \text{ бар}$). Однако несмотря на большое передавление, никакого скачка плотности обнаружить не удалось. Это, по мнению ряда ученых, свидетельствует против гипотезы металлизированного ядра.

В последние годы были проведены экспериментальные динамические исследования с целью выяснения зависимости возрастания плотности железа от увеличения давления. Полученные в лабораторных условиях данные сопоставили с теоретически вычисленной зависимостью изменения плотности вещества ядра Земли от изменения давления на глубинах, соответствующих земному ядру. Оказалось, что вещество земного ядра по своим свойствам с точностью до 10% соответствует свойствам железа. Это принимается как важнейшее указание, что земное ядро состоит в основном из железа. При этом предполагается, что в железном ядре содержится небольшо-

примесь легких элементов, по-видимому, кремния и, возможно, серы. По мнению японского ученого А. Масуда, в земном ядре находится основная масса свинца Земли.

СТРОЕНИЕ ОКЕАНИЧЕСКОГО ДНА

В последние годы в геологической науке произошел резкий поворот к изучению океанов, покрывающих около $\frac{2}{3}$ территории земного шара. Геологи стали обращать более пристальное внимание на строение океанического дна и развитие океанических областей, содержащих уникальные запасы различных полезных ископаемых — нефти и газа, железа и марганца, никеля, кобальта, меди и др. В океанографических исследованиях принимают активное участие и советские ученые, изучающие на специальных научно-исследовательских судах различные районы Мирового океана.

Интенсивное геофизическое и геологическое исследование океанов позволило выявить поразительную картину строения океанического дна. На дне океанов открыты обширнейшие абиссальные равнины, глубоководные впадины (желоба), цепи подводных вулканических конусов и срединные океанические хребты, расчлененные глубокими продольными ущельями — рифтовыми долинами. В различных частях Мирового океана были обнаружены также желоба-воронки диаметром 50—100 км и глубиной более 5 км. Советский геофизик Р. М. Деменицкая называет их «антиостровами».

Срединно-океанические хребты и рифтовые долины

К началу 60-х годов была открыта неведомая ранее уникальная по своей природе структура земной поверхности — планетарная система срединно-океанических хребтов. Эта грандиозная подводная цепь горных хребтов, протяженностью около 80 тыс. км; опоясывает весь земной шар. Подводные «срединные» хребты выделены посередине Атлантического и Индийского океанов, между Антарктидой и Австралией, в Тихом и Северном Ле-

довитом океанах (рис. 8). По своей протяженности, ширине и высоте они не уступают складчатым горным сооружениям континентов.

Лучше всех изучен Срединно-Атлантический хребет, расположенный почти на равном расстоянии от Американского континента, с одной стороны, и Европы и Африки, с другой. Этот хребет, возвышающийся почти на

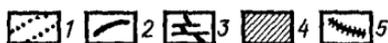
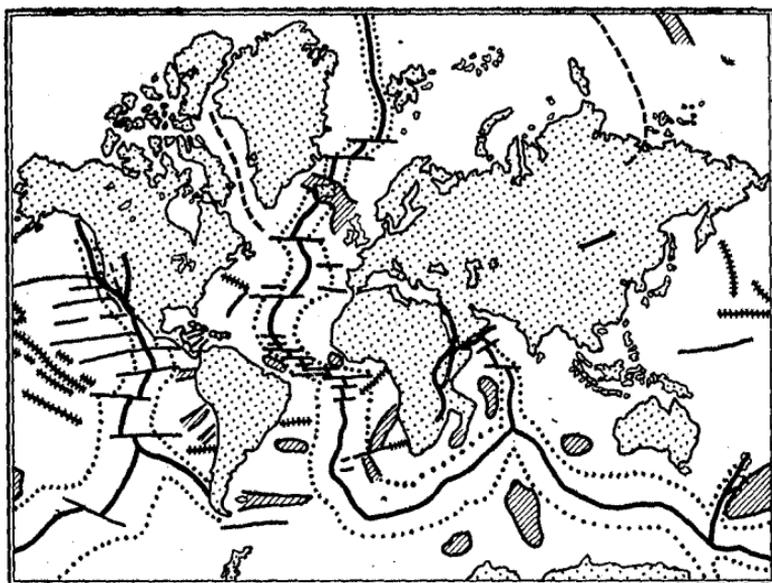


Рис. 8. Мировая рифтовая система (по Б. К. Хейзену, с дополнениями Р. М. Деменицкой):

1 — границы срединно-океанических хребтов; 2 — положение рифтовой зоны; 3 — зоны сдвигов; 4 — асейсмические хребты; 5 — линии вулканов.

3 км, является особенно крутым и неровным. Ширина хребта исчисляется сотнями километров. Подводным акустическим зондированием установлено, что за пределами срединного хребта дно океана является исключительно гладким. В Северной Атлантике остров Исландия лежит прямо на Срединно-Атлантическом хребте и

представляет собой его поднятую часть. Расположенная немного южнее и примыкающая к Исландии часть Срединно-Атлантического хребта называется Рейкьянес.

Система Срединно-Индоокеанского хребта представляет раздробленное широкое поднятие. Его подножие находится на глубине около 4500 м. Средняя относительная высота хребта равна 1500 м. Ширина хребта около 550 км. Сравнительно недавно в Индийском океане был обнаружен второй уникальный — Восточно-Индоокеанский горный хребет. Но он, по мнению ученых, не относится к числу срединных океанических хребтов по своей геологической природе.

По данным американского океанографа Г. Менарда, Тихоокеанско-Антарктический срединный хребет аналогичен Срединно-Атлантическому и Срединно-Индоокеанскому хребтам. С последним он спаян своим западным концом. С Восточно-Тихоокеанским поднятием Тихоокеанско-Антарктический хребет имеет мало общего, хотя он на востоке постепенно переходит в это поднятие. Тихоокеанско-Антарктический хребет сейсмически активен, как и другие срединные хребты, и представляет собой часть изогнутого пояса землетрясений, проходящего в океане между Антарктидой и Австралией. Ширина хребта около 800 км.

В Северном Ледовитом океане обнаружена серия субпараллельных горных сооружений: хребет Менделеева, хребет Ломоносова и хребет Гаккеля. Последний выделяется как типичный срединно-океанический хребет.

В процессе океанографических исследований было установлено, что вдоль вершин срединно-океанических хребтов обычно проходит глубокая расщелина — рифтовая долина, дно которой располагается глубже, чем дно абиссальных котловин, примыкающих к склонам хребта. По обеим сторонам рифтовой долины проходят расчлененные рифтовые горы. В Срединно-Атлантическом хребте рифтовая долина шириной в 25—50 км окаймляется с обеих сторон рифтовыми горами, имеющими ширину около 50 км (рис. 9). Это — глыбовые горы с впадинами и выступами шириной 5—15 км с амплитудой колебания высот до 1 км. Располагаются эти горы на глубине от 1500 до 3000 м под поверхностью океана. Дальше в сторону от рифтовой долины лежит высокое

расчлененное плато, имеющее ширину около 100 км и находящееся на средней глубине 3200 м. Расчлененность рельефа здесь около 700 м при расстоянии между вершинами от 13 до 30 км. Ниже начинается собственно склон шириной 500—700 км, разделенный на три ступени — верхнюю, среднюю и нижнюю. Ступени отделены одна от другой резкими уступами и располагаются на средних глубинах 3600, 3900, 4150 м. Глубина рифтовой долины здесь около 2000 м. Вдоль нее располагается

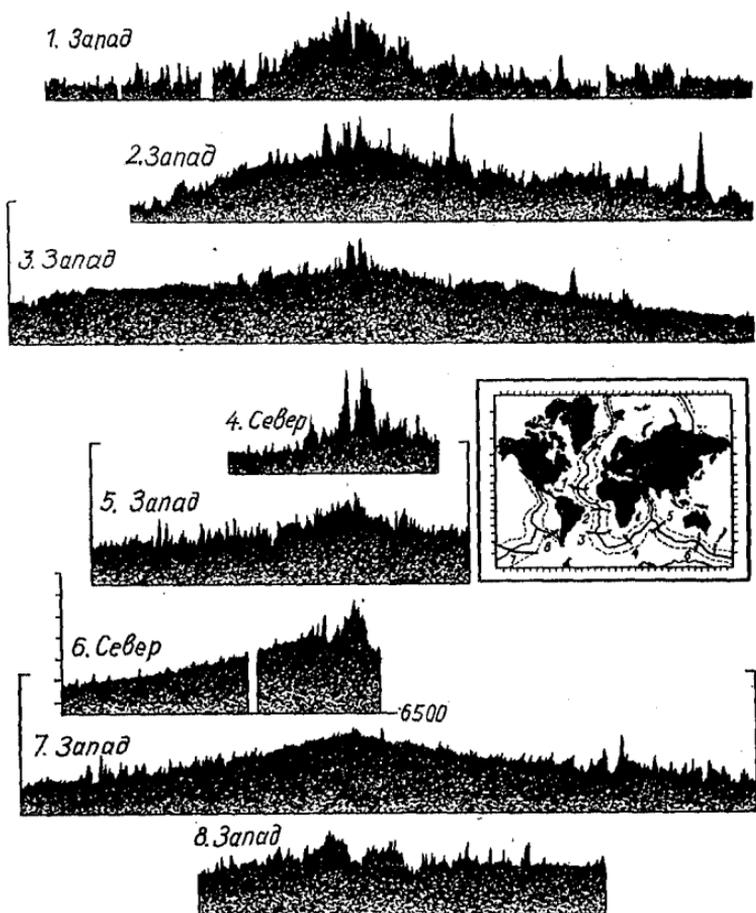


Рис. 9. Профиль через Срединно-Атлантический хребет (по Б. К. Хейзену, 1962).

большинство эпицентров землетрясений Атлантического океана.

По данным советских исследователей — академика А. П. Виноградова, профессора Р. Б. Удинцева и других, в Срединно-Индоокеанском хребте глубина рифтовой долины относительно гребней соседних горных гряд — от 1 до 3 км. Ширина долины — 5—10 км. Крутизна склонов ущелий достигает 30° , а местами они представляют собой скалистые уступы.

Срединно-океанические хребты характеризуются утонченностью земной коры, высокой сейсмической активностью и тепловым потоком, а также специфическими гравитационными магнитными аномалиями. Например, рифтовая долина в Срединно-Атлантическом и других срединных хребтах соответствует эпицентрам неглубоких очагов землетрясений. Пояс мелкофокусных очагов землетрясений, приуроченный к осевой части срединно-океанических хребтов, прослеживается вдоль средней части Атлантики, вокруг всей Африки, через центральную часть Индийского океана и т. д. С небольшими местными перерывами он наблюдается на протяжении около 80 тыс. км. В зоне рифтовой долины наблюдается максимальное в пределах океанов повышение теплового потока (в два—восемь раз больше нормального). Над срединно-океаническими хребтами обнаружены положительные гравитационные аномалии, величина которых меньше, чем в окружающих хребтах абиссальных равнин, примерно пропорционально амплитуде рельефа хребта. Все эти особенности приводят многих ученых к выводу, что срединно-океанические поднятия являются одними из наиболее молодых горных систем Земли, связанными с современным растяжением коры в этой области.

Обычно срединно-океанические хребты и пересекающие их продольные рифтовые долины приурочены к центральной части океанов. Но местами рифтовые долины заходят в область подводных окраин материков и внедряются в материки. Одно из таких мест, например, находится близ дельты р. Лены в Арктике. Отсюда рифтовая зона продолжается через Сибирь к оз. Байкал. Другими примерами являются: центральный грабен Исландии, рифтовые системы Аденского залива, Красного моря и Восточной Африки, Новой Зеландии. По представ-

лениям Г. Менарда, Восточно-Тихоокеанское поднятие к северу от Калифорнийского залива выходит на сушу и выражено здесь в виде плато Колорадо и хребтов Большого бассейна. Затем оно снова уходит в океан севернее зоны разлома Мендосино (см. рис. 8).

Срединно-океанические хребты рассечены многочисленными поперечными разрывами. Вдоль их вертикальных плоскостей наблюдается горизонтальное смещение отдельных участков хребтов друг относительно друга на десятки, а иногда и сотни километров (см. рис. 8). Канадский ученый Дж. Вильсон в 1965 г. высказал предположение, что многие зоны подобных разрывов, смещающие срединно-океанический хребет, не должны рассматриваться как сдвиги более молодые, чем хребет. Оба отрезка хребта и разрыв представляют собой единую, длительно омолаживающуюся зону. Дж. Вильсон назвал такие разрывы трансформными разломами. В пределах трансформных разломов, рассекающих срединные хребты в поперечном направлении, отмечается наибольшая концентрация очагов землетрясений. При этом землетрясения наблюдаются лишь в пределах тех частей поперечных разрывов, которые соединяют два соседних отрезка оси срединного хребта.

Магнитное поле океанов

Изучение магнитного поля океанов показало существенное отличие его от материкового магнитного поля. Оказалось, что магнитные аномалии на дне океанов не беспорядочны, а образуют полосовые магнитные аномалии (рис. 10), вытянутые линейно почти повсеместно на сотни километров параллельно срединно-океаническим хребтам. Там, где срединные хребты смещены вдоль трансформных разломов, соответственно смещены и полосы магнитных аномалий. Полосовые аномалии имеют различную ширину. На магнитных профилях, пересекающих срединные хребты, наблюдается постепенное повышение интенсивности и уменьшение длины волны магнитной аномалии при приближении к осевой линии хребта. Отчетливая осевая аномалия приурочена к осевой части хребта — рифтовой долине (рис. 11). Она выделяется прежде всего своей величиной даже тогда, когда рифтовая долина отсутствует. При переходе от

гребня хребта к его склонам полосовые магнитные аномалии быстро ослабевают. Английские геофизики В. Вайн и Д. Мэтьюз в 1963 г. обратили внимание на то, что на отдельных участках профилей магнитных аномалий наблюдается хорошо выраженная симметрия. Установлено, что аномалии равной интенсивности и равной формы и ширины располагаются симметрично по обе

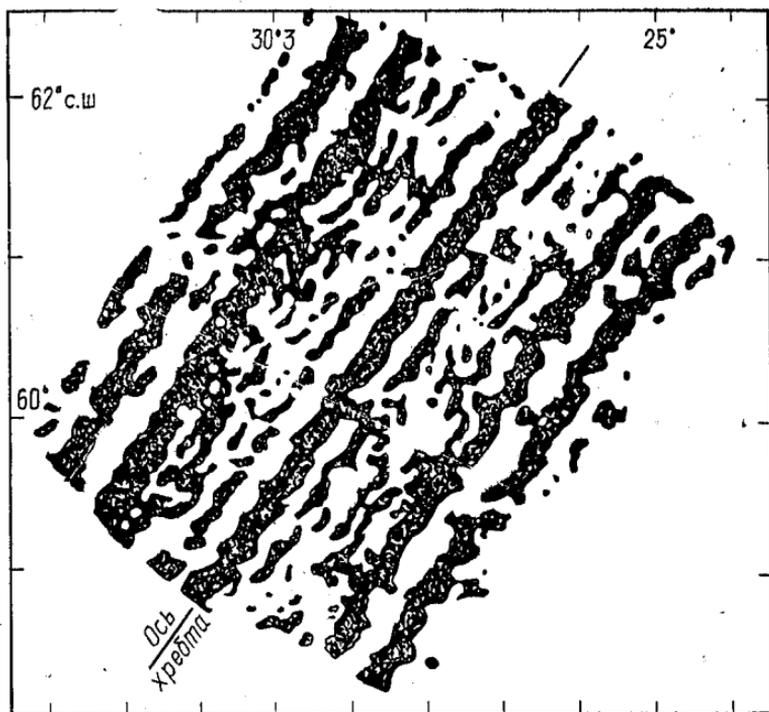


Рис. 10. Полосовые магнитные аномалии над хребтом Рейкьянес.

стороны от центральной аномалии, соответствующей рифтовой долине. В этом случае левая половина магнитного профиля оказывается приближенным зеркальным отражением правой половины и наоборот (см. рис. 10 и 11). Общая ширина чередующихся положительной и отрицательной полос составляет в среднем около 35 км. Подобные полосовые магнитные аномалии обнаружены только над срединно-океаническими хребтами. В других

пунктах земного шара, как в океанах, так и на суше, они не встречены.

Существование в океанах «полосатого» магнитного поля, ориентированного параллельно срединным хребтам, явилось не единственным открытием. Оказалось, что чередование эпох прямой и обратной намагниченности запечатлено и в колонках осадков, накопившихся на океаническом дне. Ученые исследовали намагниченность колонок глубоководных осадков, извлеченных с океани-

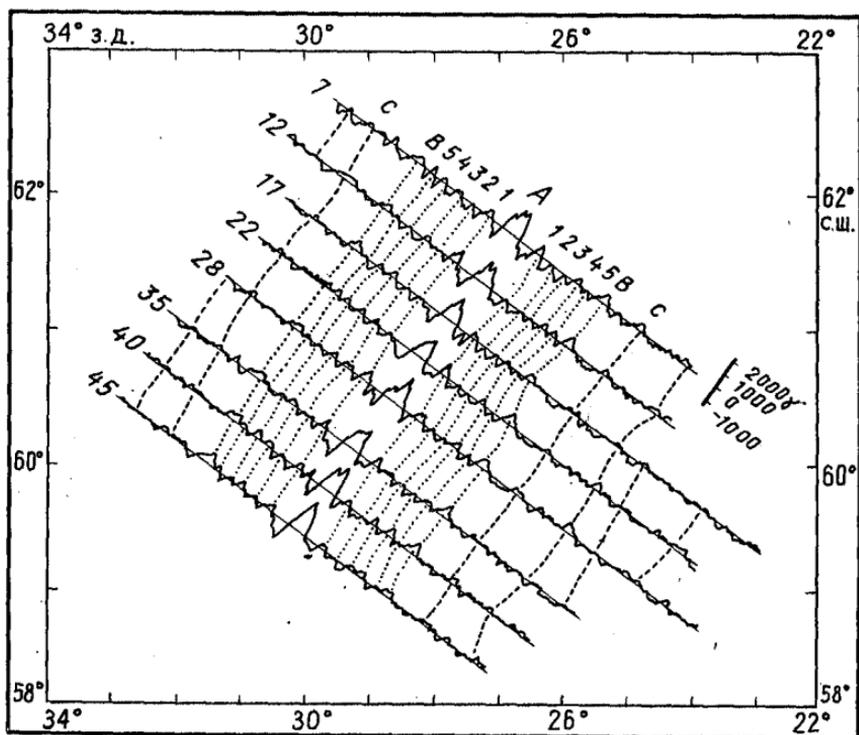


Рис. 11. Восемь профилей аномалий полной интенсивности магнитного поля над частью хребта Рейкьянес (по Д. Хейрцлеру, 1972).

ческого дна. Установлено, что такие колонки, поднятые с научно-исследовательских судов специальными трубками длиной более 30 м, содержат чередующиеся по направлению намагниченности осадки. Так, современные осадки, заполняющие верхнюю часть трубки, характеризуются прямой намагниченностью. Под ними залегают

осадки обратно намагнитченные и т. д. Получались те же полосы, что и на поверхности вдоль срединных хребтов, но только в вертикальном разрезе (рис. 12 и 13). С помощью калий-аргонового метода определения абсолютного возраста базальтовых лав удалось установить возраст инверсий геомагнитного поля для колонки пород, время отложения которых составляет 4,5 млн. лет. При этом обнаружено определенное соответствие чередования осадков разного знака намагнитченности в колонке чередованию полосовых аномалий магнитного поля над

Время (в годах)	Лавовые потоки	Направление магнетизации
	Н	Нормальное
	Н	
	Н	
	Н	
700.000	Н	Обратное
850.000	О	
	Н	Нормальное
950.000	Н	
	О	
	О	
	О	Обратное
	О	
	О	
	О	
1.800.000	Н	Нормальное
	Н	
	Н	
2.000.000	Н	Обратное
	О	
	О	
	О	
	О	
2.400.000	О	Нормальное
	Н	
	Н	
	Н	
3.000.000	Н	Обратное
	О	
	О	
3.100.000	О	Нормальное
	Н	
	Н	
	Н	
	Н	
3.400.000	О	Обратное
	О	
	О	

Рис. 12. Шкала инверсий магнитного поля Земли
(по В. Е. Хаину, 1970).

срединно-океаническими хребтами. Считается, что осевая магнитная аномалия над срединно-океаническим хребтом отвечает современному магнитному полю, а более древние аномалии последовательно смещены к склонам хребта. Путем интерполяции было установлено, что возраст полосовых магнитных аномалий во фланговых зонах срединных хребтов превосходит 10 млн. лет. Со времени мелового периода и до наших дней в вертикаль-

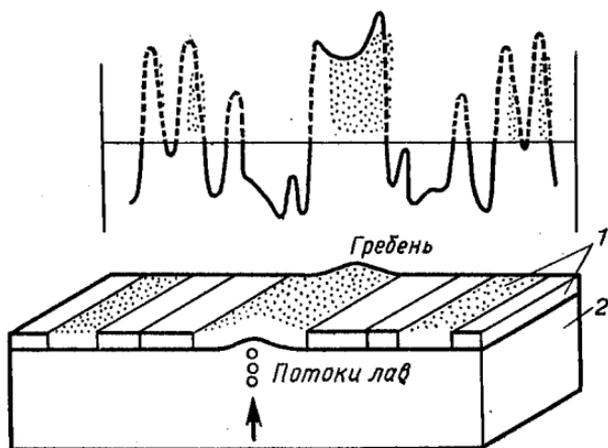


Рис. 13. Схема, поясняющая происхождение полосовых магнитных аномалий (по В. Е. Хаину, 1970):

1 — потоки лав и дайки нормально и обратно намагниченные; 2 — мантия.

ных колонках образцов пород океанов выявлено 136 периодов «нормальной» поляризации магнитного поля Земли и 141 случай обратной поляризации. Американские ученые путем экстраполяции имеющихся данных разработали возрастную шкалу инверсий магнитного поля Земли для последних 75—85 млн. лет.

Тепловой поток на океанах

На континентах поток тепла через поверхность Земли определяется начиная с 1939 г. В 1956 г. английский ученый Е. Буллард произвел первые измерения теплового потока в Атлантическом океане. К настоящему времени на океанах выполнено более 4 тыс. точных опреде-

лений теплового потока. Они показали, что средняя величина теплового потока над океанами и континентами практически одинакова (а по некоторым данным над океанами даже несколько больше, чем на континентах). Это открытие оказалось неожиданным, особенно для сторонников перидотитового состава верхней мантии под океанами. Известно, что радиоактивность ультраосновных пород слишком мала и не может обусловить наблюдающиеся в пределах океанов величины тепловых потоков. Основным источником внутреннего тепла служит распад радиоактивных минералов в гранитных породах. Эксперименты показали, что в гранитах выделяется гораздо больше тепла от распада радиоактивных элементов, чем в базальтах, а в базальтах больше, чем в ультраосновных породах. Однако в океанических областях «гранитный» слой отсутствует, а «базальтовый» слой очень тонок.

Исходя из наличия в континентальной коре 15-километрового «гранитного» слоя и 15-километрового «базальтового» слоя, подсчитано, что при возрастании с каждым километром в глубь Земли температуры на $10-12^\circ$ в раздэле Мохо под континентами можно предполагать температуру $500-550^\circ\text{C}$. Вклад в тепловой поток от «базальтового» и «гранитного» слоев на континентах должен составлять 31 кал/см^2 в год. Под океанической корой, представленной 4—8-километровым «базальтовым» слоем, температура должна равняться около $80-100^\circ\text{C}$. А вклад в тепловой поток от тонкого «базальтового» слоя в пределах океанов должен составлять всего 2 кал/см^2 в год. Основываясь на данном расчете, ученые ожидали, что тепловой поток на океанах должен быть заметно меньшим, чем на континентах. Поэтому результаты измерений теплового потока на океанах оказались сенсационными. Для объяснения этого факта Е. Буллардом были выдвинуты две гипотезы. Согласно одной из них тепловой поток над океанами может быть вызван конвекцией. Другая гипотеза основывается на том, что при усреднении до глубины в несколько сотен километров в первом приближении средний химический состав под континентами и океанами должен быть одинаковым. В последнем случае основное различие между континентами и океанами заключается в том, что вещество континентальной коры более дифференцировано, в

результате чего более легкоплавкие составные части и радиоактивные элементы сконцентрировались у поверхности. А на океанах радиоактивные источники тепла сосредоточены на глубину в несколько сот километров. А. Рингвуд не исключает, что источником некоторой части этого тепла может служить «первичное тепло» Земли, унаследованное от ранней стадии ее развития. Другая часть тепла может поступать за счет распада радиоактивных элементов, глубоко захороненных в недрах Земли.

В океанах высокий тепловой поток, превышающий в несколько раз средний уровень, приурочен к островным дугам и осевым зонам срединных океанических хребтов, где мощность земной коры заметно сокращена и верхняя мантия приподнята. Для зон глубоководных океанических желобов оказались характерными минимальные значения теплового потока. По мнению ряда авторов, высокие значения теплового потока в районах гребней срединно-океанических хребтов трудно объяснить локальными концентрациями радиоактивных веществ. Представляется более вероятным, что их непосредственной причиной являются интрузии изверженных пород из мантии.

Состав и возраст пород океанического дна

В последние годы благодаря бурению со специальных кораблей и драгированию в глубоководных областях океанов были получены интересные и подчас неожиданные сведения о составе, характере распределения и возрасте пород океанического дна. В земной коре океанических областей в основном по геофизическим данным выделяют три главных слоя: «первый» (верхний) слой осадков со скоростью продольных сейсмических волн до 2 км/сек; подстилающий его — «второй» (или «вулканический») слой со скоростью продольных волн 5,07 км/сек и «третий» — основной слой океанической коры со скоростью продольных волн 6,69 км/сек (рис. 14). Под «третьим» слоем залегают породы верхней мантии Земли, скорость продольных волн в которых равна 8,0—8,2 км/сек.

«Первый» слой океанической коры. Первый слой океанической коры представлен толщей неконсолидированных осадков. Средняя их плотность равна $2,3 \text{ г/см}^3$. Первоначально предполагалось, что толщина осадочного покрова в океанах должна достигать многих километров. Но в действительности оказалось, что в большинстве случаев мощность осадков на дне океанов редко превышает

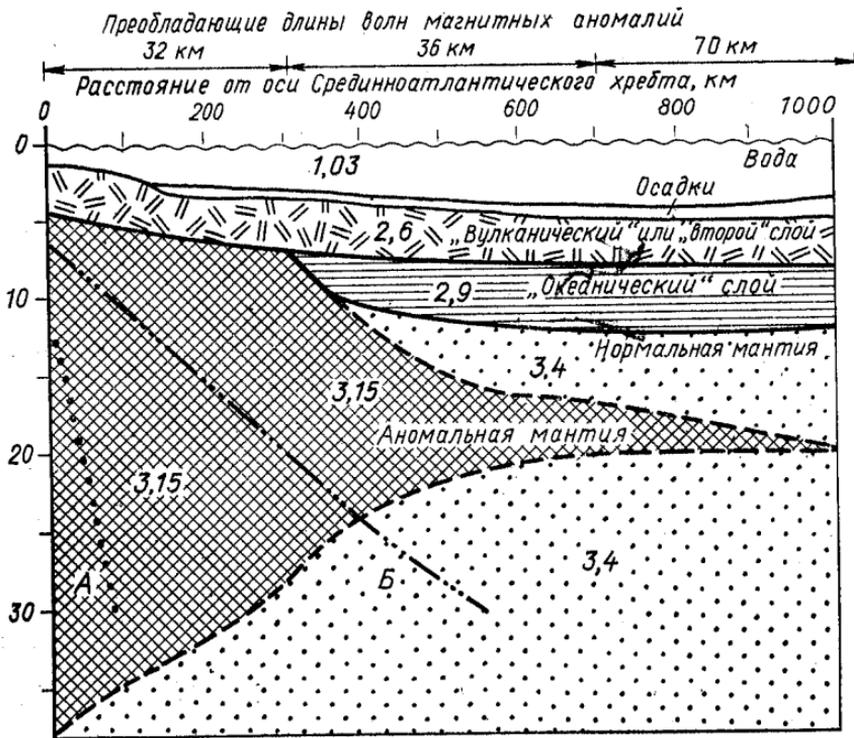


Рис. 14. Разрез земной коры одной половины Срединно-Атлантического хребта (по П. Р. Фогту и др., 1972).

шает несколько километров, а в ряде районов осадков вообще нет. Мощность осадочного покрова в пределах абиссальных равнин составляет в среднем 1 км. А во многих глубоких впадинах Тихого и Индийского океанов и на склонах срединно-океанических хребтов мощность осадков равна 100—200 м и они полностью выклинива-

ются к гребню хребта. Осевая полоса гребня срединного хребта шириной 30—50 км или совсем лишена осадков (см. рис. 14), или же они встречаются там небольшими пятнами в отдельных впадинах. Возраст осадков определяется по содержащимся в них ископаемым остаткам в образцах, поднятых со дна океанов в процессе бурения.

В течение 1968—1970 гг. в Атлантическом и Тихом океанах было проведено бурение на глубинах до 6 км с американского исследовательского судна «Гломар Челленджер». Наибольшая глубина проникновения в осадочную толщу составила около 900 м. Бурением было установлено, что подошва осадочного слоя омолаживается по направлению от краевых зон океанов к осям срединно-океанических хребтов. Наиболее древние осадочные породы, относящиеся к верхней части юрской системы (титонский ярус), были вскрыты относительно близко к берегам Северной Америки на Бермудской возвышенности к северо-востоку от Бермудских островов. Здесь между верхней юрой и базальтовым покровом «второго» слоя расположена осадочная толща, возраст которой остается неустановленным. Верхнеюрские мергели были подняты с океанического дна также севернее острова Сан-Сальвадор (Багамские острова). Отложения верхней юры или близкого возраста выступают на островах Канарских и Зеленого Мыса у берегов Африки. В обоих случаях имеются основания предполагать, что под ними залегают и более древние мезозойские осадки, возможно, даже верхнепалеозойские.

На склонах Срединно-Атлантического хребта непосредственно над базальтами были вскрыты осадки эоценового возраста, а близ оси срединного хребта — только миоценового возраста. В рифтовых долинах вблизи оси срединно-океанического хребта распределены лишь маломощные плиоцен-антропогеновые осадки, подстилаемые излившимися базальтами. В северо-западной части Тихого океана наиболее древние осадки достигнуты на подводной возвышенности Шатского. В ее центральной части установлены верхнемеловые (маастрихт), на склонах также верхнемеловые (сеноман) и в основании разреза — верхнеюрские отложения. Однако позднеюрский возраст здесь, как полагают, не определяет, по-

видимому, начало формирования осадочного чехла. Судя по сейсмоакустическим данным, ниже вскрытых пород залегает осадочная толща, превышающая в 3—4 раза мощность пробуренной части разреза. В ее составе можно предполагать присутствие более древних еще не вскрытых осадков.

По мнению члена-корреспондента АН СССР В. В. Белоусова, омоложение подошвы осадочного слоя по направлению к оси срединного хребта может быть объяснено тем, что осадки здесь фациально замещаются одновозрастными базальтовыми покровами «второго» слоя. А отсутствие осадков на самом гребне объясняется тем, что они могут быть погребены под молодыми вулканическими излияниями или переплавлены и поглощены ими.

«Второй» слой океанической коры. «Второй», или «вулканический», слой является твердым основанием для неконсолидированных осадков «первого» слоя океанической коры. Представления о составе «второго» слоя основываются на данных изучения образцов пород, поднятых со дна океанов с помощью драгирования и бурения, и в основном на сведениях о составе вулканических пород океанических островов. Полагают, что «второй» слой представлен главным образом толщей неизменных базальтовых лав и интрузиями габбро. Мощность его достигает 1—2 км; средняя плотность — 2,6 г/см³. В последние годы верхняя часть «второго» слоя была вскрыта под осадочным покровом рядом глубоких скважин. Здесь в нескольких местах обнаружено горизонтальное переслаивание базальтов и рыхлых осадков.

По данным изучения образцов пород, поднятых драгой советскими научно-исследовательскими судами «Витязь» и «Академик Курчатов» в Атлантическом и Индийском океанах, главными породами «второго» слоя являются неизменные кайнотипные (новообразованные) базальты. А. П. Виноградов, Г. Б. Удинцев и другие указывают, что петрографический состав этих пород изменяется от оливиновых толеитов с низким содержанием глинозема (14—16%), выстилающих рифтовую долину, до переходных оливиновых толеитов с исключительно высоким содержанием глинозема — на вершинах срединно-океанического хребта и до щелочных оливиновых базальтов, слагающих пики самых высоких подвод-

ных гор в 5—10 км от оси рифтовой долины. Преимущественно щелочными оливиновыми базальтами образованы острова в Атлантическом океане, расположенные на Срединно-Атлантическом хребте. Один из них — остров Исландия сложен мощной толщей переслаивающихся толеитовых и щелочных базальтов. Базальтовые лавы развиты на вулканических островах Индийского и Тихого океанов. Оливиновый базальт и габбро были подняты с поверхности плато Манихики в Тихом океане. В Марианском и Новобританском глубоководных желобах обнаружены шаровая базальтовая лава, долерит, базальтовый туфоконгломерат и брекчия.

Возраст пород «вулканического» слоя в глубоких океанических котловинах определяется в основном как до меловой (донеокомский). Плато-базальты, выстилающие дно Северной Атлантики, имеют палеогеновый возраст. А в пределах срединных хребтов и океанических островов развиты неогеновые и антропогеновые базальтовые покровы.

«Третий» слой океанической коры. Отбор образцов пород, залегающих под первыми двумя слоями океанической коры, исключительно труден. Драгированием удается отобрать образцы изверженных пород лишь с участков на самом гребне хребта, где отсутствует осадочный покров. Поэтому сведения о составе основного — «третьего» слоя океанической коры очень скудны. Этот слой выделяется главным образом по геофизическим данным. Состав слоя трактуется различными исследователями по-разному. Так, американский ученый Г. Хесс считает, что «третий» слой представлен серпентинитом, образовавшимся в результате серпентинизации перидотитов, слагающих верхнюю мантию. Серпентинизация перидотитов происходит в верхних слоях мантии при температуре ниже 500°C и достаточном притоке воды из глубины. Нижняя граница зоны серпентинизации (т. е. подошва «третьего» слоя) определяется изотермой 500°. В рифтовой долине Срединно-Индоокеанского хребта и в зоне Срединно-Атлантического хребта (к северу от Пуэрториканского глубоководного желоба) со дна океана были подняты серпентинизированные перидотиты. Однако несмотря на эти находки, гипотеза Г. Хесса не получила широкого распространения.

Наиболее распространенной является гипотеза, сог-

ласно которой «третий» слой океанической коры сложен магматическими породами основного состава и соответствует «базальтовому» слою континентальной коры. Поэтому этот слой иногда называют также «базальтовым», или «океаническим». Мощность «третьего» слоя 4,2—5,0 км; плотность — 2,9 г/см³. Предполагают, что он представлен главным образом метаморфизованными зеленокаменными эффузивами (зеленые сланцы, амфиболиты) и интрузиями габбро. Скорость распространения сейсмических волн в породах «третьего» слоя равна 6,7 км/сек. Обычно он подстилается породами верхней мантии со скоростью сейсмических волн, равной 8,3 км/сек. Зеленокаменные метаморфизованные породы, по мнению советских исследователей Л. В. Дмитриева и А. Я. Шараськина, могли возникнуть в результате замещения базальтов и долеритов вторичными минералами. По данным Г. Б. Удинцева, в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов породы зеленокаменной формации представляют большую редкость. Здесь на слое со скоростью продольных сейсмических волн 7,3—7,5 км/сек чаще всего залегают покровные базальты «второго» слоя.

Относительно природы «третьего» слоя океанической коры существуют различные представления. Одни исследователи предполагают, что «третий» слой, как и вышележащий «второй» слой, сложен продуктами дифференциации верхней мантии и образовался одновременно со «вторым» слоем. Другие исходят из предположения об определенной стратифицированности разрезов океанической коры и считают, что «третий» слой повсюду образовался ранее «второго» слоя. Возраст большинства образцов, полученных в зоне гребня срединно-океанического хребта драгированием, не может быть точно датирован радиологическими методами, так как эти поверхностные породы были подвержены химическому взаимодействию с морской водой.

Верхняя мантия океанических областей. Еще меньше данных имеется у нас о действительном составе верхней мантии океанов. Ученые полагают, что высокий тепловой поток в океанах может указывать на более кислый состав океанической верхней мантии по сравнению с континентальной. По представлениям В. В. Белоусова, например, непосредственно под океанической корой со-

став верхней мантии должен выражаться смесью, содержащей 80% перидотита и 20% базальта. В основании гребней срединно-океанических хребтов залегает слой со скоростью продольных сейсмических волн 7,3—7,5 км и плотностью 3,15 г/см³. Одни исследователи относят этот слой к нижней части земной коры. По мнению американских ученых П. Фогта, Э. Шнейдера, Г. Джонсона, он принадлежит к верхней мантии — «аномальная мантия» (см. рис. 14).

Образцы ультраосновных пород, которые могут быть отождествлены с породами верхней мантии, были подняты драгой с океанического дна в рифтовых зонах Срединно-Атлантического и Срединно-Индоеокеанского хребтов. Образцы, отобранные, в частности, советскими научно-исследовательскими судами «Витязь» и «Академик Курчатов», представлены гарцбургитами, перидотитами, дунитами, хромитами, серпентинитами. По данным А. П. Виноградова, Г. Б. Удинцева и других, преобладающими среди них являются серпентинизированные гарцбургиты (около 60%). Это плотные зеленовато-черные массивные породы с пятнистой текстурой, образованной неправильными, величиной 5—10 мм, выделениями ортопироксена в полигональнозернистом оливине. Более 30% ультраосновных пород составляют лерцолиты и плагиоклазовые лерцолиты, по текстуре и структуре мало отличимые от гарцбургитов. Единичные образцы перидотита содержат повышенное количество оливина и условно отнесены А. П. Виноградовым, Г. Б. Удинцевым и другими к дунитам. По мнению указанных исследователей, лерцолиты — это не что иное, как останцы верхней недифференцированной мантии (пиролит А. Э. Рингвуда), «законсервированные» под тонкой океанической корой. Высокогиперстенные гарцбургиты представляют собой «остаточное» мантийное вещество, а дуниты — остаток после выплавления толеитов, пополняющих базальтовый слой.

КОНЦЕПЦИЯ НОВОЙ ГЛОБАЛЬНОЙ ТЕКТониКИ

В геологической науке противостоят два основных направления в объяснении характера и причин движения отдельных участков земной коры относительно друг

друга. Представители одного из них признают ведущую роль первично горизонтальных движений отдельных глыб земной коры. Они развивают концепцию «мобилизма», в основе которой лежит признание существенных горизонтальных перемещений материков в течение последних 150—300 млн. лет. Проведенное в последние годы изучение геологического строения океанов, открытие планетарной системы срединно-океанических хребтов и рифтовых долин и т. д. дали ученым принципиально новые геологические и геофизические данные. Эти материалы послужили толчком для бурного развития идей мобилизма на качественно новой фактической и методологической основе. На состоявшейся в 1971 г. в Москве XV ассамблее Международного геодезического и геофизического союза концепция новой глобальной тектоники (или «тектоники плит»), наиболее полно выражающая современные идеи мобилизма, была принята в качестве рабочей гипотезы большинством участников ассамблеи.

Концепция новой глобальной тектоники базируется на совокупности современных мобилистских гипотез, среди которых основная роль принадлежит гипотезе разрастания океанического дна, гипотезе дрейфа плит литосферы и ряду других гипотез.

Классическая гипотеза дрейфа материков

Ученые давно уже обратили внимание на загадочное географическое явление. Если сопоставить противоположные берега Атлантического океана, то нельзя не заметить совпадения очертаний восточного побережья Южной Америки и западного побережья Африки. На то, что это сходство вряд ли случайно, указывали, например, в начале XVII в. английский философ Ф. Бэкон, на рубеже XVIII—XIX вв. немецкий натуралист А. Гумбольдт и другие. В середине XIX в. итальянский ученый А. Снидер (Пеллегрини) попытался дать первое объяснение этой загадки природы. Подметив сходство ископаемых растений в месторождениях каменного угля Северной Америки и Европы, он высказал идею, что Северная и Южная Америка в прошлом составляли единое целое с Европой и Азией. Впоследствии они откололись и, переместившись относительно друг друга, заняли современное положение. В начале XX в. идея дрейфа матери-

ков получила определенное освещение в трудах ряда ученых. Но наибольшее распространение в первой трети XX в. приобрела гипотеза, выдвинутая известным немецким геофизиком А. Вегенером.

Кроме очевидного факта сходства очертаний береговых линий ряда материков, А. Вегенер опирался и на другие, в частности, геологические и палеогеографические данные. Среди аргументов в пользу своей гипотезы А. Вегенер выдвигал также большое сходство геологического строения материков Южного полушария и Ин-

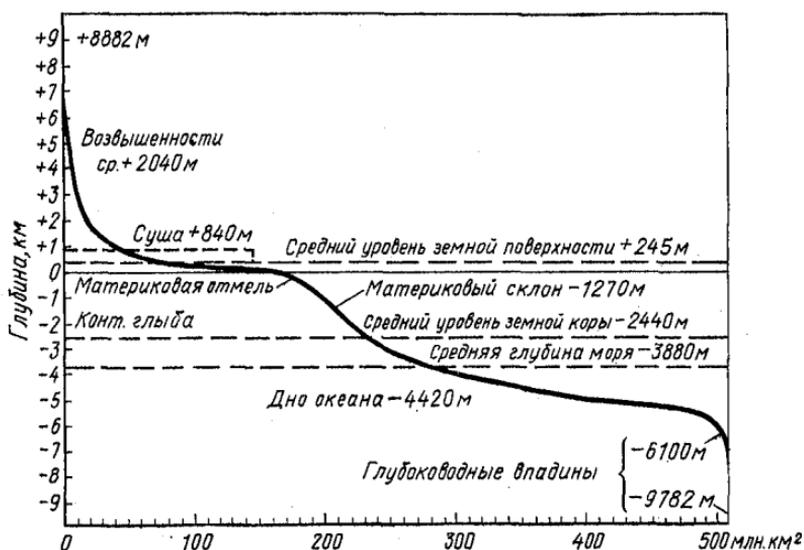


Рис. 15. Гипсографическая кривая земного шара.

достана, а также большое сходство между их позднепалеозойско-раннемезозойской флорой и наземной фауной. Указанием на общность их геологической истории, по мнению А. Вегенера и его последователей, является также широкое развитие позднепалеозойского оледенения на обширной площади материков Южного полушария и Индостана. Анализируя форму гипсографической кривой земного шара, на которой континенты и океаническое дно представляются в качестве различных ступеней в рельефе Земли (рис. 15), А. Вегенер пришел к вы-

воду о различном строении и составе океанической и континентальной коры. Исходя из этого, он предположил отсутствие «гранитного» слоя в составе океанической коры. Предполагалось, что океаническая кора состоит только из «базальтового» слоя, породы которого обогащены кремнием (силиций) и магнием (отсюда широко распространенное в прошлом название этого слоя — «сима»). Гранитные породы континентальной коры обогащены кремнием и алюминием (отсюда название — «сиаль»). Породы «сиали» имеют меньший удельный вес, чем породы «симы». Опираясь на гипотезу изостатического равновесия, А. Вегенер предположил, что континенты, сложенные более легким гранитным материалом, словно айсберги, плавают (скользят) на подстилающей их более тяжелой «базальтовой» («сима») оболочке.

Он полагал, что в древние геологические эпохи гранитный материал был распространен по всему земному шару и первоначально покрывал сплошным тонким слоем всю поверхность Земли. Затем, в палеозойскую эру весь гранитный материал собрался в один блок, образовав поднявшийся над уровнем океана единый праматерик Пангею (греч. «пан» — всеобщий; «гео» — земля). Это могло произойти под воздействием приливных сил, связанных с притяжением Солнца и Луны и действующих на земной поверхности с востока на запад, а также центробежных сил, вызванных вращением Земли и направленных от полюсов к экватору. Праматерик Пангеа был окружен безбрежным Мировым океаном. Впоследствии, в юрский период мезозойской эры под влиянием тех же сил Пангеа стала раскалываться на отдельные крупные глыбы. Эти глыбы — континенты расходились в разные стороны относительно друг друга. После того как, например, Америка откололась от Европы и Африки и продвинулась на запад, в промежутке между ними возник Атлантический океан (рис. 16). Южная Америка и Африка в своем движении испытали поворот по часовой стрелке. В результате перемещения Антарктиды к югу, Австралии к юго-востоку, а Индостана к северо-востоку между ними образовался Индийский океан. Таким образом, в гипотезе Вегенера Атлантический и Индийский океаны рассматриваются как вторичные, а Тихий океан — как остаток первичного океана, площадь

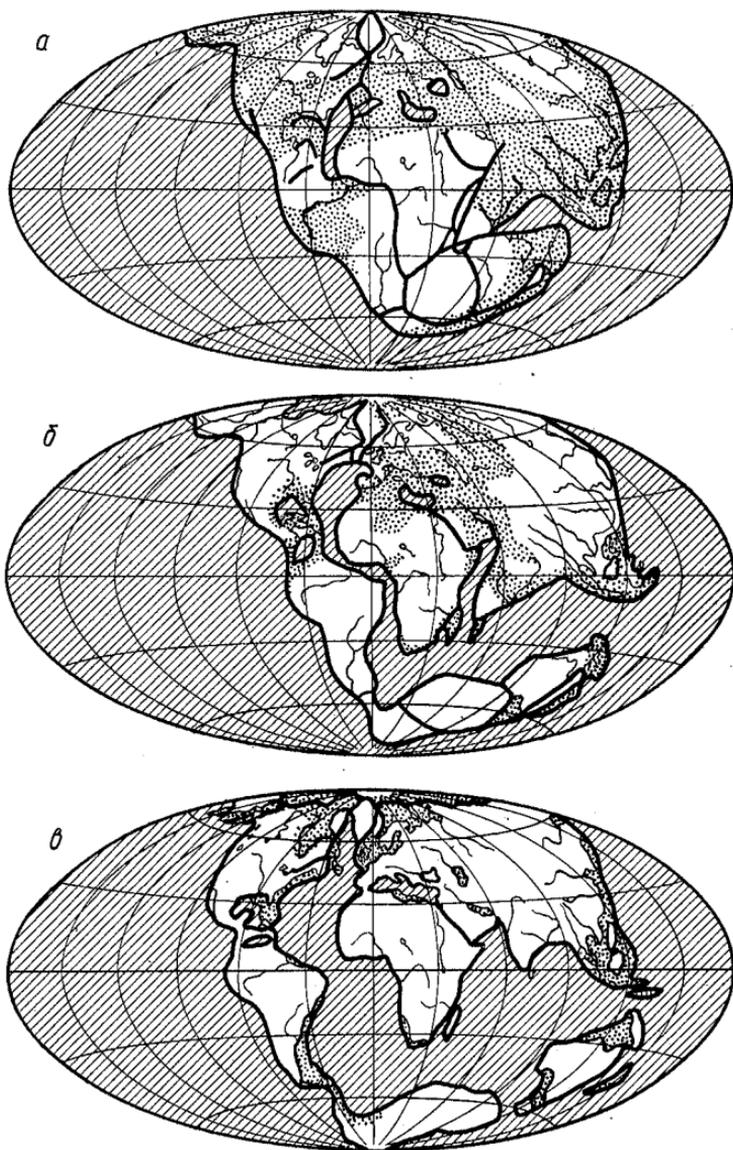


Рис. 16. Движение материалов по гипотезе Вегенера:
a — положение 300 млн. лет назад, *б* — положение 80 млн.
 лет назад, *в* — положение 1 млн. лет назад.

которого последовательно уменьшалась в результате надвигания на него со всех сторон материков.

В начале XX в. австрийский геолог Э. Зюсс назвал Гондваной (по племени гондов, населявших Индостан) сверхконтинент, объединяющий в прошлом материки Южного полушария и Индостан. Впоследствии южноафриканский ученый А. дю Тойт выдвинул гипотезу, согласно которой первоначально существовали два прама-терика — Лавразия (включавший Северную Америку, Европу и Азию) и Гондвана (включавший Индостан и материки Южного полушария). Между ними располагался древний океан Тетис, на месте которого впоследствии образовался Альпийско-Гималайский складчатый пояс.

По А. Вегенеру, при движении материков передние их края испытывали на своем пути сопротивление нижнего «базальтового» слоя («симы») и вследствие этого сминались в складки. Так, вдоль переднего края Северной и Южной Америки образовалась система Кордильер и Анд. Вследствие надвигания Индостана на Азию возникли Гималаи. При продвижении Австралии на восток на ее переднем краю сформировались Ново-Гвинейские горы. Некоторые островные дуги — Алеутская, Курильская, Японская, Филиппинская, Индонезийская, а также Больших и Малых Антильских островов, Новой Зеландии и другие рассматриваются как обломки материков, отколовшиеся и отставшие от последних в их движении.

Гипотеза разрастания океанического дна

В 1962 г. американский геолог Г. Хесс выдвинул оригинальную гипотезу, возродившую интерес ученых к идеям мобилизма. По Г. Хессу, рифтовые долины срединно-океанических хребтов являются исходными трещинами в континентальной земной коре. В эти трещины из астеносферы проникало расплавленное мантийное вещество. На подъем нагретого вещества сквозь рифтовые расщелины указывают, в частности, высокий тепловой поток и современный вулканизм, характерные для осевых зон срединных хребтов. Поступающие из верхней мантии расплавленные базальтовые лавы выходят через рифтовые расщелины наружу, по обе стороны от оси срединно-океанического хребта. Остывая и твердея, эти лавы образуют вулканический слой океанической коры.

А в трещине рифтовой долины происходит новообразование и наращивание океанической коры. Эта новообразованная литосфера вынуждает океаническое дно сместиться в обе стороны от оси срединного хребта. Процесс внедрения в рифтовую долину новых порций магматического расплава многократно повторяется. Новая трещина вновь делит недавно образованную застывшую литосферу в расщелине срединного хребта пополам. Остывая, каждая новая порция лавы еще дальше расталкивает старую литосферу в горизонтальном направлении в обе стороны от срединного хребта к материкам.

По мнению сторонников гипотезы разрастания океанического дна, материал из срединно-океанических хребтов переносится на огромные расстояния и затем вновь погружается в астеносферу в зоне глубоководных желобов, образующихся у краев континентов. Благодаря этому океаническое дно передвигается подобно гигантскому конвейеру и постоянно обновляется. Поэтому возраст пород океанического дна должен быть наиболее молодым в районе осей срединных хребтов и непрерывно возрастать по мере удаления от осей в сторону материков. Имеющиеся фактические данные подтверждают это положение. Бурением установлено, что мощность и геологический возраст осадочного слоя возрастают по мере удаления от осей срединно-океанических хребтов.

Канадский ученый Дж. Вильсон увязал с гипотезой разрастания океанического дна образование островных дуг. Он установил, что чем старше остров, тем дальше находится он от оси хребта. Основываясь на этом, Дж. Вильсон так трактует историю возникновения Гавайского архипелага. В результате извержения на дне океана лава, поднимаясь по трещине из верхней мантии, образует вулкан. Затем появляется вулканический остров. По прошествии некоторого времени остров отодвигается в сторону континента в результате разрастания океанического дна. На его месте после повторного извержения нового вулкана образовывается новый остров. Через определенное время и этот вулканический остров перемещается в сторону, уступая место следующему острову, и т. д.

Гипотеза соответствия полосовых магнитных аномалий раздвигам океанического дна

В качестве существенного подтверждения разрастания океанической коры в обе стороны от осей срединно-океанических хребтов в настоящее время принимается факт существования полосовых магнитных аномалий, параллельных оси срединных хребтов.

Установлено, что магнитное поле Земли через определенные промежутки времени (сотни тысяч лет) меняет свою полярность. Северный полюс становится Южным, а Южный — Северным. Опираясь на этот факт, английские геофизики Ф. Вайн и Д. Мэтьюз в 1963 г. предположили, что при излиянии базальтовой магмы через рифтовую расщелину магма, остывая, должна приобрести намагниченность в направлении существующего в данную эпоху магнитного поля Земли. При очередном излиянии магмы базальтовое тело, ранее внедрившееся вдоль оси хребта, делится пополам вдоль оси рифтовой долины. Каждая половина, смещаясь в сторону континента, сохраняет знак приобретенной намагниченности. В случае постоянного излияния и растекания базальтов инверсия магнитного поля должна запечатлеться на дне океанов в виде похожих на шкуру зебры магнитных полос.

Открытие симметричной структуры полосовых магнитных аномалий и признание их соответствия шкале инверсии магнитного поля Земли рассматривается многими учеными как основное доказательство того, что осевые зоны срединно-океанических хребтов испытывали последовательное расширение, а внедрявшиеся в них базальты в процессе разрастания океанического дна попеременно намагничивались в прямом и обратном направлениях.

Ряд ученых относится к гипотезе Вайна — Мэтьюза с определенной степенью осторожности или даже отрицательно. Предполагают, например, что полосовые магнитные аномалии могут быть связаны с наличием сильномагнитных пород, заполняющих многочисленные линейные параллельные разломы на дне океанов. Однако несмотря на определенные трудности в объяснении ряда существенных фактов, эта гипотеза в целом принимается многими зарубежными и советскими геологами.

Гипотеза движения плит литосферы

Классическая гипотеза мобилизма предполагает дрейф гранитных континентов по базальтовому ложу океанического дна. В основе современной концепции новой глобальной тектоники лежит представление о больших горизонтальных перемещениях гигантских жестких плит литосферы (состоящих из земной коры и самой верхней части мантии) по поверхности расплавленной астеносферы. В состав плит входят не только континенты, но и смежные части океанического дна. Подобные плиты образно сравнивают с льдинами, в которые вмержли бревна (материки). По мнению сторонников гипотезы, представление о разделении литосферы на плиты подтверждается распределением по поверхности Земли очагов землетрясений. Так, подавляющая масса неглубоких (мелкофокусных) землетрясений приурочена к осям срединно-океанических хребтов и трансформным разломам. А очаги глубоководных землетрясений в основном приурочены к глубоководным океаническим желобам и островным дугам, а также к молодым горноскладчатым областям. Именно эти зоны и принимаются за границы плит.

В качестве главных границ плит литосферы принимаются оси разрастания срединно-океанических хребтов. Здесь, в зоне рифтовых долин происходит разрыв и вслед за ним относительное расхождение пластин литосферы в стороны от оси срединного хребта. А в образовавшейся трещине формируется новая океаническая кора.

Вторым типом границы между плитами являются глубоководные желоба. Нарастание коры океанической плиты вдоль осей срединных хребтов, по представлениям сторонников гипотезы движения плит, должно компенсироваться ее разрушением на противоположном краю, у материкового края смежной плиты — в зоне глубоководного желоба. Предполагается, что здесь движущаяся от срединного хребта пластина океанической литосферы толщиной 50—100 км изгибается и погружается вниз под углом 45° под пластину движущейся навстречу континентальной литосферы. Погружение это происходит до глубины 700 км (рис. 17, 18). Подобное «всасывание» литосферной пластины вдоль перифериче-

ских глубоководных желобов Тихого океана, по мнению сторонников гипотезы, компенсирует разрастание океанического дна в полосе Восточно-Тихоокеанского срединного хребта. Предполагается, что к числу аналогичных зон могут относиться также участки Атлантического океана, примыкающие к Антильской и Южно-Сандвичевой дугам, и участки Индийского океана, примыкающие к Зондским островам.

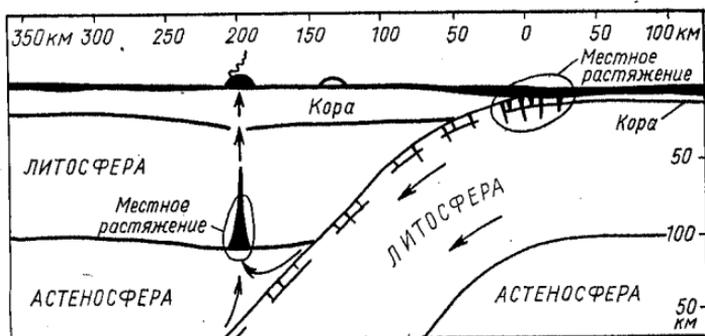


Рис. 17. Погружение пластины литосферы в мантию в области глубоководного желоба (по В. Е. Хаину, 1970).

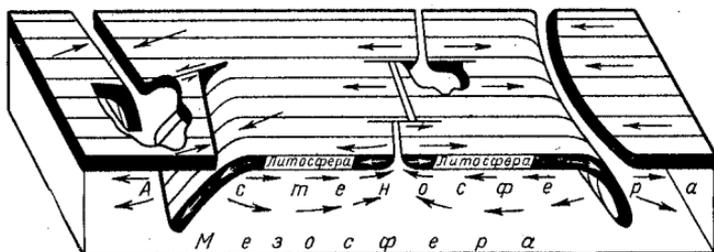


Рис. 18. Блок-диаграмма, иллюстрирующая движение плит литосферы (по В. Е. Хаину, 1972).

В основе указанных представлений лежат следующие наблюдения. Во-первых, величина теплового потока, значительно повышенная в зоне рифтовых долин, оказалась существенно пониженной вблизи глубоководных желобов. Кроме того, в районах глубоководных океанических желобов и прилегающих к ним островных дуг, обрамляющих, в частности, западную часть Тихого океана, плотно концентрируются глубоководные землетрясения.

На некоторых островах регулярно происходит несколько землетрясений в день. По данным сейсмологии, непосредственно под глубоководными желобами очаги землетрясений лежат на глубинах до 70—80 км. Но по направлению к континенту их глубина последовательно возрастает до 700 км. Линия расположения очагов этих землетрясений, спроектированная на поперечный разрез земной коры и мантии Земли, круто падает под углом 45° от глубоководного желоба в сторону материка. Такая фокальная поверхность очагов глубокофокусных землетрясений, названная «зоной Беньофа», обнаружена, например, в восточной части Тихого океана. Она простирается от Чилийско-Перуанского глубоководного желоба под континент Южной Америки. Предполагается, что подобная поверхность, проходящая через очаги глубокофокусных землетрясений, и является тем каналом, вдоль которого пластина океанической литосферы погружается в мантию до глубин 700 км. Ряд исследователей считает, что эта гипотеза очень слабо аргументирована и вследствие этого является самым слабым местом гипотезы дрейфа плит.

Третьим типом границы между плитами являются молодые складчатые горы. Согласно представлениям сторонников гипотезы дрейфа плит, при столкновении материковых краев плит одна плита надвигается на другую, как торосы при сжатии ледяного покрова. Это приводит к образованию молодых складчатых гор. Например, столкновением континентальных масс при замыкании Тетиса, разделявшего Лавразию и Гондвану, объясняется возникновение Альпийско-Гималайской складчатой системы. Образование высочайших в мире гор — Гималаев — связывают со столкновением отколовшейся от Африки и движущейся на северо-восток Индостанской плиты с Азиатской плитой. Индостанская плита при этом якобы погрузилась под Азиатскую, образовав область сдвоенной толщины литосферы (или глубокие «корни» гор). Происхождение молодой горно-складчатой цепи Перуанских Анд представляется следствием одностороннего давления с запада океанической коры на Южно-Американский материк. По мнению члена-корреспондента АН СССР В. Е. Хаина, в ряде случаев в результате соударения древних плит могли возникнуть древние складчатые горы, например, такие, как Ураль-

ские; их современное срединно-материковое положение, вероятно, не является изначальным.

Вдоль таких «нейтральных» границ между плитами, какими являются трансформные разломы, не имеет места ни образование новой коры, ни ее разрушение. Здесь происходит скольжение (сдвиг) одной плиты относительно другой. Такое сдвигание имеет место, например, вдоль Азорско-Гибралтарского разлома на границе Европейской и Африканской плит.

Гипотеза полюсов вращения плит

Некоторые ученые утверждают, что в прошлом направления движения плит литосферы и положения их краёв в ряде случаев существенно отличались от современных. Следы этих изменений, как полагают, зафиксированы в структурах аномальных магнитных полей и в ориентировке древних трансформных разломов. Согласно данной гипотезе плиты литосферы, раздвигаясь от осей срединно-океанических хребтов, испытывали одновременно поворот вокруг определенных осей. Точки пересечения этих осей с поверхностью Земли называются «полюсами вращения», или «полюсами поворота». Такие полюса являются общими для двух смежных плит.

Полагают, что почти все океаны раскрывались в результате поворота плит вокруг полюсов вращения, расположенных в северо-западной Атлантике у юго-западной оконечности Гренландии. Так, полюс поворота Северной Атлантики лежит между Гренландией и островом Ньюфаундленд. Здесь же неподалеку расположен и полюс вращения северной части Тихого океана. В районе Девисова пролива лежат полюса вращения Южной Атлантики и южной части Тихого океана. В то же время раскрытие Индийского океана связывают с полюсом вращения, расположенным в Ливии.

Плиты литосферы поворачиваются вокруг своих полюсов вращения с постоянной угловой скоростью. Но линейные скорости движения на границе между плитами зависят от положения («широты») поворачивающейся точки относительно полюса вращения. Непосредственно вблизи полюсов вращения линейная скорость движения дна океана на оси срединного хребта должна быть близка к нулю, а на «экваторе вращения» — максимальной.

Скачкообразные изменения скорости разрастания океанического дна приурочены к трансформным разломам. Последние совпадают с «широтами», проведенными из «полюсов вращения», и вследствие этого параллельны «экватору вращения».

Считая, что современное положение движущихся плит литосферы подчинено описанной закономерности, сторонники данной гипотезы, однако, не смогли объяснить, что лежит в ее основе и чем именно определяется само положение «полюсов вращения» плит.

Механизм перемещения плит литосферы

Для того чтобы передвинуть даже малые плиты литосферы, нужны огромные усилия, в объяснении которых существующие гипотезы являются в основном лишь умозрительными. Поэтому вопрос о механизме перемещения плит литосферы в горизонтальном направлении относится к числу наиболее сложных и уязвимых в концепции новой глобальной тектоники. А. Вегенер объяснял смещение материков действием центробежных и приливных сил. Однако большинство исследователей сомневается в том, что эти силы или какая-либо иная внешняя сила способны вызвать на вращающейся Земле разнонаправленные постоянные перемещения огромных плит.

В конце 20-х годов шотландский геолог А. Холмс выдвинул гипотезу конвекционных подкорковых течений, согласно которой силы, перемещающие материки, находятся внутри мантии Земли. Сущность гипотезы заключается в следующем. Распад радиоактивных элементов приводит к разогреву земных недр. Разогретые горные породы разуплотняются, становятся более легкими и вследствие этого поднимаются (всплывают) вверх. Вблизи земной поверхности они растекаются в горизонтальном направлении. Здесь происходит охлаждение и уплотнение этих пород. Это, в свою очередь, обуславливает их погружение обратно в глубь Земли. Образующиеся, таким образом, потоки подкоркового вещества вызывают движение континентов.

Многие современные сторонники дрейфа плит литосферы также видят причину поднятий, опусканий и горизонтальных движений земной коры в существовании конвекционных течений вещества внутри мантии Земли.

Они считают, что повышенные значения тепловых потоков над срединно-океаническими хребтами указывают на то, что здесь всплывают восходящие потоки разогретого менее плотного мантийного вещества. При достижении верхних горизонтов мантии над ними образуется сводовое поднятие в земной коре. В зоне поднятия восходящий поток разделяется на две самостоятельные ветви (рис. 19, 20), расходящиеся в противоположные сто-

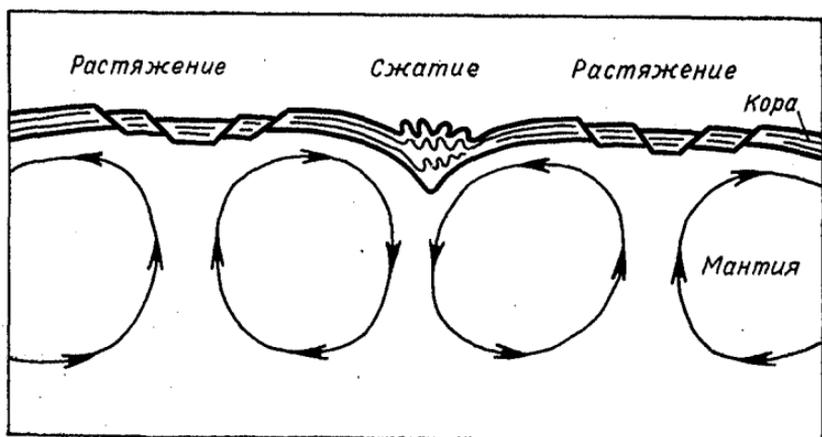


Рис. 19. Направление циркуляции конвекционных потоков в мантии (по В. В. Белоусову, 1963).

роны от оси хребта. В процессе дальнейшего горизонтального передвижения эти потоки мантийного вещества охлаждаются и опускаются обратно в глубь Земли. Таким образом, происходит кругообращение мантийного вещества, описывающего конвекционные петли внутри мантии (см. рис. 19). Следствием такой циркуляции будет перемещение литосферы от зон поднятия горячего мантийного вещества к областям его погружения в мантию.

В месте расхождения двух соседних петель конвекционных потоков происходит растяжение земной коры. Вследствие этого в сводовой части поднятий, возникших при подъеме кверху мантийного вещества, кора становится тоньше. В конечном итоге здесь образуются продольные разрывы коры и рифтовые расщелины. Если

раздвоение конвекционного потока происходит под континентом, то расходящиеся потоки могут разорвать континентальную кору на части и переместить континент в сторону фланга поднятия. В свое время это произошло, например, на месте современной Атлантики. В месте схождения нисходящих ветвей конвекционных течений образуются прогибы. Земная кора здесь испытывает сжатие, вследствие чего образуются складки, разрывы, надвиги и т. д.

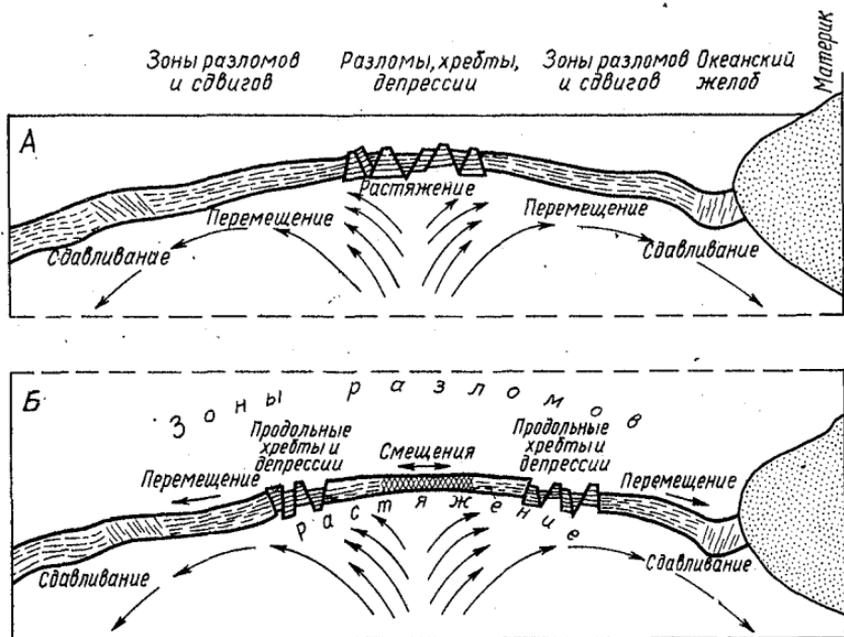


Рис. 20. Иллюстрация гипотезы конвекционных течений (по Г. У. Менарду, 1966):

А — образование рифтов на гребне в местах растяжений; перемещение блоков коры между зонами разломов на флангах; Б — образование рифтов на флангах; перемещение блоков коры в стороны, за пределы рифтовых районов, смещения в зоне гребня меньшего масштаба, чем смещения на флангах.

В океанах движущиеся в горизонтальном направлении от срединных хребтов плиты литосферы могут встретить движущиеся им навстречу плиты континентальной коры. В этом случае передние края океанических плит

испытывают сдавливание и начинают прогибаться, образуя глубоководные желоба (см. рис. 20). А на передовых краях материков возникают складчатые горные цепи. Предполагают, что подобным образом, например, образовались глубоководные желоба и складчатая система Анд у западного побережья Южной Америки, где движущаяся на восток океаническая кора столкнулась с движущимся на запад материком Южной Америки.

А. Рингвуд предложил следующую модель механизма раздвигания океанического дна. К осевой части срединно-океанического хребта из астеносферы устремляется разогретое пиrolитовое вещество. По пути оно частично плавится, образуя базальтовую магму и остаточный нерасплавленный перидотит. Базальтовая магма формирует океаническую кору. Верхние ее горизонты вследствие более быстрого охлаждения и взаимодействия с морской водой, по-видимому, частично окисляются. А более глубокие горизонты новообразованной базальтовой океанической коры не испытывают воздействия морской воды, оставаясь относительно сухими и неокисленными. Базальтовая кора вместе с истощенным ультраосновным (перидотитовым) слоем перемещается от оси срединного хребта, скользя по ослабленному начальным плавлением слою астеносферы. По мере удаления от срединного хребта океаническая кора и подстилающий ее перидотитовый слой мантии все более охлаждаются. Безводный базальт нижнего слоя коры постепенно переходит в безводный эклогит. Плотность безводного эклогита (около $3/5 \text{ г/см}^3$) выше плотности перидотита ($3,3 \text{ г/см}^3$). В связи с этим пластина, состоящая из земной коры и перидотитового слоя, погружается в мантию в области глубоководных желобов. По мнению А. Рингвуда, этот процесс необратим. Остаточный дифференцированный материал входит в состав глубоководных горизонтов мантии и уже не участвует в следующем цикле. Он отвергает развиваемую рядом авторов идею о перемешивании вещества земной коры и мантии и дальнейшем повторном участии этого материала в новом цикле.

Принципиально также трактуется общая схема развития литосферы океанических областей советскими исследователями — А. В. Дмитриевым, Г. Б. Удинцевым, А. Я. Шараськиным, О. Г. Сорохтиным (рис. 21).

Проблема конвекционных течений в мантии обсуждалась на XV ассамблее Международного геодезического и геофизического союза в Москве в 1971 г. Большинство участников обсуждения рассматривали конвекционные течения в мантии как наиболее вероятную движущую силу предполагаемого расширения океанов. Вместе с тем гипотеза конвекционных течений наталкивается на ряд трудностей, ставящих под сомнение возможность существования в мантии Земли конвекции большого масштаба.

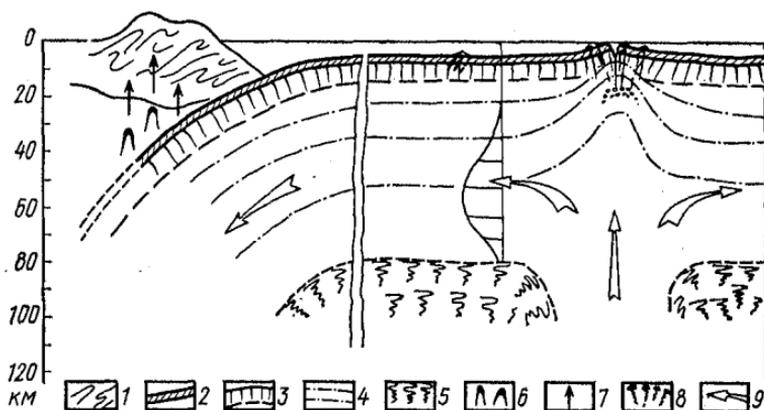


Рис. 21. Общая схема развития литосферы океанических областей (по Л. В. Дмитриеву и др., 1972):

- 1 — кора островных дуг; 2 — океаническая кора, 3 — океаническая литосфера; 4 — астеносферный слой; 5 — нижняя мантия; 6 — очаги выплавления; 7 — гидротермальный метаморфоз; 8 — очаг выплавления базальтов и вулканический аппарат срединных хребтов; 9 — общее направление движения мантийного вещества.

Одним из основных вопросов гипотезы является вопрос о глубине проявления конвекционных процессов — охватывает ли конвекция, если она существует, всю мантию в целом или ограничивается только областью астеносферы? Для того чтобы получить конвекционные ячеек с горизонтальными размерами в несколько тысяч километров, конвекция должна охватывать всю мантию в целом. Ряд ученых полагает, что это вполне вероятно. Однако другие исследователи, в частности советские

ученые В. В. Белоусов, Е. Н. Люстих, В. А. Магницкий, считают, что конвекция во всей мантии маловероятна и даже невозможна вследствие слишком быстрого возрастания плотности с глубиной, а также значительной вертикальной неоднородностью, в частности слоя С. Теоретически конвекция может проявляться лишь при высокой однородности земного вещества по составу и вязкости. Член-корреспондент АН СССР П. Н. Кропоткин указывает, что достаточно небольшой разности в химическом составе с накоплением более тяжелых атомов железа, кальция и магния в нижних слоях и более крупных по размеру (более легких) атомов кислорода, натрия, калия в верхних слоях мантии, чтобы тепловая конвекция была уже невозможной. Тепловое расширение и в этом случае будет уменьшать плотность нижних слоев, но это окажется недостаточно, чтобы сделать их менее плотными по сравнению с веществом верхних слоев. Следовательно, материал нижних слоев не будет всплывать вверх. Пластичная астеносфера обладает вязкостью, в сто раз меньшей вязкости нижних горизонтов мантии и в тысячу раз меньшей вязкости литосферы. В связи с этим астеносфера, по П. Н. Кропоткину, будет играть роль «смазки» и конвекционные движения, если они происходят в мантии ниже астеносферы, не будут передаваться на земную кору.

Поэтому существует мнение, что отдельные конвекционные ячейки могут возникать только между корой и уровнем на глубине 400 км. Учитывая ограниченную толщину этого слоя, невозможно допустить возникновения конвекции в масштабе целого континента или океана. Некоторые исследователи считают, что горизонтальные размеры отдельных конвекционных ячеек не могут превышать 1000—1200 км и, таким образом, конвекция, если она существует, может иметь только местный характер. На масштабы горизонтальных перемещений плит литосферы существенно влияет величина горизонтального температурного градиента. Так, в некоторых районах, например в центральной части Тихого океана, расстояние между осью срединного хребта, где предполагается новообразование океанической коры, и западной системой глубоководных желобов, где предполагается погружение коры в мантию, очень велико. Местами оно достигает 5—6 тысяч километров. На таком расстоя-

нии температурный градиент в мантии оказывается не столь большим. Поэтому, как отмечает член-корреспондент АН СССР В. Е. Хаин, возникают сомнения в том, может ли такой температурный градиент поддержать существование однонаправленного подкорового конвекционного течения. И если такие течения существуют, то могут ли они создать усилия, достаточные для смещения литосферы.

Некоторые исследователи объясняют механизм раздвигания океанического дна не конвекционными течениями, а «стеканием» (соскальзыванием) литосферы в противоположные стороны от осей срединных хребтов под действием силы тяжести. Одну из таких гипотез **гравитационной неустойчивости** выдвинул голландский геолог Р. Ван Беммелен. Он предполагает, что в нижней мантии на глубине более 1000 км происходят процессы дифференциации, в результате которых в некоторых областях уменьшается плотность вещества мантии и вследствие этого происходит его расширение. Это обуславливает возникновение выпуклостей на поверхности нижней мантии, что, в свою очередь, вызывает выгибание вверх верхней мантии вместе с континентальной земной корой, если поднятие образовалось под материком. Такое поднятие Р. Ван Беммелен называет «мегаундацией». Вследствие поднятия нарушается гравитационное равновесие, и верхняя мантия вместе с земной корой «стекают» в стороны по склонам мегаундации. В подобном гравитационном течении участвуют слои, мощность которых достигает нескольких сотен километров. Скорость «стекания» сверху больше, чем на глубине. Поэтому континентальная кора и верхние сотни километров мантии, разрываясь, соскальзывают вниз. При этом на своде поднятия обнажаются более глубокие слои верхней мантии, и на их обнаженной поверхности формируется новая базальтовая океаническая кора (рис. 22).

По-иному подходит к определению механизма движения материков советский исследователь Е. В. Артюшков. Он считает, что для объяснения причин движения земной коры нет необходимости привлекать какие-либо внешние или внутренние источники (космические, конвекционные течения в мантии и т. д.). По мнению Е. В. Артюшкова, земная кора движет самое себя. Пластина

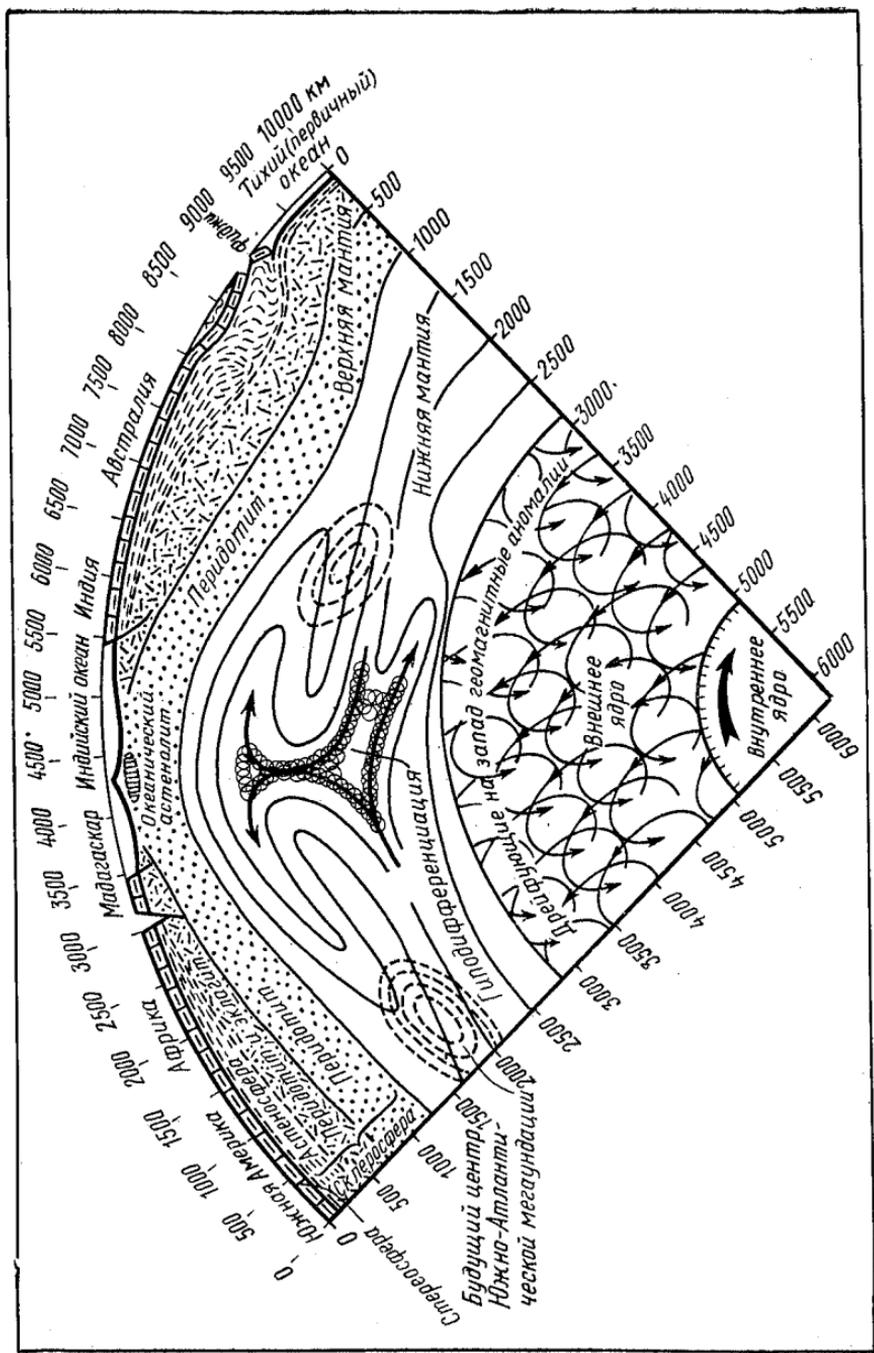


Рис. 22. Схема мегаундаций (по Р. Ван Беммелену).

литосферы, залегающая на астеносфере, уравновешена вертикально, но не горизонтально. Поэтому любое утолщение земной коры будет стремиться растечься в стороны с силой, достаточной, чтобы привести в движение всю остальную пластину. Таким образом, движение континентов является поверхностным явлением. Е. В. Артюшков сравнивает растекание дна океанов с растеканием капли масла в супе.

Скорость разрастания океанического дна и возраст океанов

Магнитные профили и карты позволяют установить ширину полос магнитных аномалий, параллельных срединно-океаническим хребтам. В то же время известны точные даты нескольких последних изменений полярности магнитного поля Земли. Сопоставление этих данных дает возможность подсчитать скорость разрастания дна океанов для данного времени. На основании сопоставления чередования полосовых магнитных аномалий над срединно-океаническими хребтами с обращением магнитного поля Земли в донных колонках пород ученые вычислили вероятные скорости разрастания океанического дна для последних 4,5—5 млн. лет. Определение возраста пород различных участков океанического дна производилось по формуле $T = \sum_{i=1} t_i$, где T — время образования (возраст) пород океанического дна на участке полосовой магнитной аномалии — n (считая от оси рифтовой долины); t_i — длительность одной палеомагнитной эпохи. Эти данные были затем экстраполированы на отрезок геологического времени в 200 млн. лет.

По оценке ряда ученых, скорости разрастания океанического дна колеблются в широких пределах от 1 до 15 см/год. Так, в Атлантическом океане дно разрастается со скоростью от 1 до 4 см/год; при этом предполагают, что к югу от линии Азорско-Гибралтарского разлома скорость разрастания океанического дна значительно большая, чем севернее этой линии. В Индийском океане наибольшая скорость — 6 см/год приурочена к широтному хребту, расположенному в южных широтах. В Тихом океане скорость разрастания дна изменяется от 4,4 до 15 см/год. Указанные ско-

рости разрастания океанической коры соразмерны скоростям горизонтальных смещений континентальных блоков. Например, в Калифорнии, Японии, Венгрии, Таджикистане и других районах внутри материков установлены горизонтальные смещения, происходящие со скоростью 0,5—5 см/год. Изучение полосовых магнитных аномалий во фланговых зонах срединно-океанических хребтов привело исследователей к выводу о том, что скорости разрастания океанического дна не были постоянными во времени.

В основе концепции новой глобальной тектоники лежат представления о том, что океанические впадины в течение эволюции Земли не существовали в своей современной форме, и почти две трети дна океанов Земли сформировались в течение последних 80 млн. лет. Гипотеза А. Вегенера исходит из того, что когда-то в прошлом все материки входили в один единый массив суши — праматерик Пангею, омываемый со всех сторон Мировым океаном. По другим воззрениям, первоначально существовали два сверхматерика — Лавразия, объединяющий континенты Северного полушария, и Гондвана, объединяющий континенты Южного полушария. Их разделял широтный океан Тетис. На западе эти два сверхматерика смыкались: Северо-Западная Африка примыкала к Северной Америке и Южной Европе. На определенном этапе развития Земли — Пангеа (или Лавразия и Гондвана) начала раскалываться на отдельные глыбы — материки, которые вследствие горизонтального перемещения постепенно заняли современное положение. Сторонники гипотезы существования двух сверхконтинентов считают, что Лавразия пересекалась в то время экватором и после раскола дрейфовала к северу. Гондвана располагалась так, что ее южная часть была покрыта полярной ледяной шапкой, а северные области находились в тропических широтах. В процессе горизонтального дрейфа Гондвана в основном двигалась от полярных областей к экваториальным.

Информация о времени движения континентов очень малочисленна. Для тех областей, в которых характер изменения полосового магнитного поля расшифрован, эволюция океанов может быть прослежена в течение последних 100—200 млн. лет. В остальных случаях ученые опираются в основном на геологические данные. При

этом, в оценке возраста океанов и времени заложения срединно-океанических хребтов сторонники концепции новой глобальной тектоники расходятся во взглядах. У разных исследователей картина общей эволюции дрейфующих материков выглядит по-разному. Некоторые ученые на основании интерпретации магнитных данных считают, что образование океанического дна в Северной Атлантике началось около 200—300 млн. лет назад — в начале мезозойской эры, либо в конце палеозоя. Отделившиеся в это время друг от друга Северная Америка и Европа стали удаляться в обе стороны от Срединно-Атлантического хребта со скоростью от 1 до 1,5 см/год. В Южной Атлантике отделение Южной Америки от Африки произошло около 150—200 млн. лет назад. Это совпадает с геологическими данными, по которым раскрытие экваториальной Атлантики приурочено к раннемеловому времени. Южная Америка и Африка двигались в противоположные стороны со скоростью 1,5—2,2 см/год. С тех пор эти материки отодвинулись друг от друга более чем на 4—5 тыс. км. По данным других авторов, раскол афро-южноамериканской глыбы и образование Южной Атлантики произошли около 120 млн. лет назад.

Зарождение Индийского океана произошло 160 млн. лет назад. В это время Антарктида и Австралия отделились от Африки. Но существенного расширения площади Индийского океана до момента около 100 млн. лет назад не последовало. Индостан тогда входил еще вместе с Антарктидой и Австралией в состав Гондваны. Согласно одной точке зрения Срединно-Индоокеанский хребет, положивший начало отделению Индостана от Африки, возник в неогеновый период — около 60 млн. лет назад. По другим представлениям, Индостан уже в меловом периоде был достаточно далеко удален от Африки и Австралии. Австралия и Антарктида, сначала перемещавшиеся вместе, окончательно разделились в палеогеновый период. По мнению сторонников первоначального существования Пангеи, около 30 млн. лет назад возникла рифтовая система Аденского залива и Красного моря. Вследствие этого Африканский материк стал отделяться от Евразийского материка. Полагают, что процесс отделения Африканского материка продолжается и сейчас.

Анализ магнитных данных по Северному Ледовито-

му океану привел ученых к выводу, что образование котловины Нансена—Амундсена началось во второй половине неогенового периода около 30—40 млн. лет назад. А еще ранее — около 60—70 млн. лет назад, в первой половине неогенового периода, северное окончание Срединно-Атлантического хребта изменило свое направление и сместилось к востоку. При этом оно пересекло часть Европейского материка. Отколовшийся вследствие этого «обломок» континентального блока — Гренландия стал двигаться к западу.

Ученые существенно расходятся во взглядах на возраст Тихого океана. Одни ученые, в частности А. Л. Яншин, П. Н. Кропоткин, В. Е. Хаин и другие, опираясь в первую очередь на геологические данные, считают, что мезозойский и кайнозойский возраст имеют только впадины Атлантического, Индийского, Северного Ледовитого океанов. А возраст Тихого океана определяется ими как докембрийский и, в частности, как раннепротерозойский. Это — около 1500 млн. лет назад. По мнению других исследователей, наиболее древний возраст образования коры, существующей в границах современного Тихого океана, вероятно, близок к 200 млн. лет. Такого взгляда придерживаются, например, В. В. Федынский, С. А. Ушаков, Н. А. Шабалин. Вследствие этого, сторонниками этой гипотезы предполагается, что вся океаническая кора образовалась не позднее начала мезозойской эры.

КОНЦЕПЦИЯ ФИКСИЗМА

Концепции новой глобальной тектоники, основывающейся на идеях мобилизма, противостоит концепция фиксизма. Ее последователи исходят из положения о том, что взаимное расположение материков сохранялось неизменным, фиксированным в течение всей геологической истории Земли. Фиксисты отстаивают концепцию первично-вертикальных движений. Согласно их представлениям, океаны образовались на месте континентов в мезо-кайнозойский этап развития Земли. Процесс этот объясняется различно: либо с позиций классической гипотезы

контракционизма — простым опусканием отдельных частей материков, либо процессом «базификации», предполагающим механическую или физико-химическую переработку континентальной коры в океаническую.

Контракционная гипотеза

В первой половине XIX в. французский геолог Эли де Бомон выдвинул идею, которая в конце века была развита австрийским геологом Э. Зюссом и получила название «контракционной гипотезы» (лат. «контракцио» — стяжение). Суть гипотезы сводится к следующему. Согласно космогонической гипотезе Канта—Лапласа, первичная Земля представляла собой раскаленное тело, постоянно излучающее свою теплоту в мировое пространство. По мере остывания Земли происходило последовательное сокращение объема ее внутренней массы и уменьшение вследствие этого радиуса Земли. Остывшая и затвердевшая наружная оболочка Земли — земная кора должна была приспособиться к сокращавшемуся ядру Земли. Под действием сил тяжести земная кора обрушивалась, стремясь занять новое положение, соответствующее уменьшившемуся в объеме ядру Земли. Площадь земной коры сокращалась и вследствие этого слагающие ее горные породы испытывали сжатие. По образному определению сторонников гипотезы, кора сморщивалась, как кожа высушенного яблока. На ней образовывались «морщины» — складчатые горные цепи, разрывные нарушения, впадины. Бурно проявлялись процессы магматизма и вулканизма.

В конце XIX в. было открыто явление радиоактивного распада пород с выделением при этом тепла. Опираясь на это открытие, академик В. И. Вернадский в начале XX в. высказал идею, что первичная Земля не была расплавленной, а находилась в холодном состоянии. Эта идея в дальнейшем была развита академиком О. Ю. Шмидтом в гипотезу первично холодной Земли. В связи с этим контракционная гипотеза, опиравшаяся на представления космогонической канто-лапласовской гипотезы, потеряла свое значение и была отвергнута многими исследователями. На смену ей пришли гипотеза дрейфа материков и гипотеза расширяющейся Земли. Однако в последние годы идеи контракционизма вновь привлекли

внимание ученых. По мнению ряда исследователей, земная кора периодически, в частности в нынешнюю геологическую эпоху, испытывает сжатие. Ряд наблюдений указывает на уменьшение радиуса Земли.

Гипотеза базификации континентальной коры

Член-корреспондент АН СССР В. В. Белоусов, отвергая концепцию новой глобальной тектоники, предлагает в качестве альтернативы гипотезу «базификации» материковой коры и образования океанов на месте материков. Общая картина развития океанических бассейнов, по В. В. Белоусову, представляется следующим образом.

Длительное время Земля медленно разогревалась внутренними радиоактивными источниками тепла на глубинах в несколько сотен километров. В результате частичного расплавления ультраосновных пород из верхней мантии выплавлялись базальты. Дальнейшая дифференциация базальтов приводила к обособлению из них кислого (гранитного) материала. Так формировалась материковая кора, которая уже в археозойскую эру покрывала весь земной шар. На этой коре существовали лишь мелкие внутриконтинентальные морские бассейны. Океанов на поверхности Земли в то время еще не было. Возрастание радиоактивного разогрева приводило к появлению очагов полного расплавления ультраосновного вещества мантии. Ультраосновной и основной расплав устремлялся вверх и в областях современных океанов внедрялся в земную кору и изливался на ее поверхность. При этом основные породы первичной коры испытывали эклогитизацию. Удельный вес их значительно возрастал. Утяжеленные глыбы земной коры вместе с внедрившимися тяжелыми ультраосновными интрузиями погружались обратно в мантию и растворялись в ней. Таким образом, часть кислого или среднего по составу материала континентальной коры замещалась ультраосновным материалом мантии. Так формировалась кора нового типа. Этот процесс увеличения основности пород новой коры В. В. Белоусов называет «базификацией» («базиты» — то же, что основные породы). А конечный результат базификации, выраженный в образовании океана на месте материка, называется «океанизацией».

Растворяющиеся в верхней мантии кислые и средние породы материковой коры привносят с собой содержащиеся в них радиоактивные элементы. В связи с этим верхняя мантия под океанами содержит больше радиоактивных элементов, чем под материками. Этим объясняется равенство тепловых потоков в океанах и материках. Опускание поверхности континентальной коры приводило к образованию депрессий, заполнявшихся водой. Главным источником этой воды была вода, выделяющаяся из основных пород материковой коры в процессе их эклогитизации. Некоторое количество воды могло поступить также и из мантии вместе с извержением ультраосновной и основной магмы.

Весь процесс обновления коры, по мнению В. В. Белоусова, в основном закончился в начале мелового периода. Образование океанов и опускание их дна обычно шло от периферии к оси. Например, восточная и западная окраины современного Атлантического океана были втянуты в опускание и достигли последней степени базификации раньше, чем его осевая зона. Здесь, в пределах Срединно-Атлантического хребта, процесс базификации продолжается до сих пор. Предполагается, что именно с этим связаны высокая сейсмичность, вулканизм и близость к поверхности ультраосновных интрузий. Рифтовые долины рассматриваются как зоны, опускающиеся под влиянием отяжеляющих их интрузий из мантии. Здесь процесс базификации продвинулся дальше всего на срединном хребте.

В Тихом океане прогибание началось с центральной части, а по периферии его имел место захват океаном участков прилегающих материков. Этот процесс продолжается до последнего времени. В результате такого наступления океана на материк в неогеновом периоде образовались окраинные моря на севере и западе Тихого океана. Подобным образом идет развитие и в других океанах на периферических участках, имеющих тихоокеанский характер. Здесь также происходит глыбовое обрушение коры и захват базификацией новых участков суши. Так, в кайнозойское время образуются Карибское море и Мексиканский залив; базификация проникает в раздробленную Средиземноморскую геосинклинальную зону. Здесь на месте всей западной части Средиземного моря до конца олигоцена, а в Тирренском и Лигурий-

ском морях до миоцена включительно располагались размывавшиеся участки суши, в строении которой, судя по составу обломков, участвовали граниты и гнейсы. Сейчас в этих областях кора имеет субокеанический характер, т. е. состоит из «базальтового» океанического слоя, прикрытого осадками. Субокеаническая кора характеризует часть Охотского и Японское моря. Между тем до плиоцена в первом случае и до миоцена во втором на месте этих морей существовали крупные участки суши.

Превращение материковой коры в океаническую ставит вопрос о возможности нахождения реликтов материковых структур на дне океана. Такие реликты существуют там, где базификация не зашла слишком далеко. Например, район Сейшельских островов в западной части Индийского океана характеризуется типичным материковым строением. Многочисленные «микроконтиненты» в Индийском океане тоже представляют не вполне переработанные обломки материковой коры. В. В. Белоусов относит к остаткам разрушенной материковой коры среди открытого океана также остров Роколл и плато Манихики. По его мнению, состав лав Исландии, среди которых кислые разновидности имеют ненормально большое (для океанических островов) значение, сохраняет в себе «воспоминания» о недавно существовавшей на этом месте глыбы материковой коры.

Отвергая возможность горизонтальных перемещений материков, В. В. Белоусов предлагает вернуться к старой идее Гондваны и считать, что материки, входившие в последнюю, соединялись между собой в конце палеозоя и начале мезозоя временными полосами суши и мелкими морями и что впоследствии такие «мосты» опустились.

С развитием тихоокеанских периферий В. В. Белоусов связывает формирование наклоненных под континент каналов, в пределах которых сосредоточиваются очаги глубоких землетрясений. Предполагается, что в этих каналах идет усиленная циркуляция материала: тяжелые глыбы коры опускаются, а выплавляемый из них андезит и базальт поднимаются и питают вулканы островных дуг. Эти каналы приурочены к границе между относительно холодной материковой мантией и относительно нагретой океанической.

Гипотеза базификации материковой коры вызывает ряд критических замечаний со стороны последователей концепции мобилизма. Так, П. Н. Кропоткин отмечает, что коренные различия в строении континентов и океанов не могут быть объяснены гипотезой базификации. Эта гипотеза не соответствует принципам изостазии и физико-химическим условиям фазовых превращений силикатов. Сколько бы мы ни добавляли в континентальную кору более плотного симатического материала, она не станет тяжелее плотных перидотитовых масс, которыми сложена мантия, и не сможет утонуть в субстрате. Кроме того, по мнению П. Н. Кропоткина, опускание без раздвигания материков в области Атлантического и Индийского океанов, которое предполагает В. В. Белоусов, привело бы к перемещению вод океана во вновь образовавшиеся впадины и, следовательно, к понижению уровня океана на 1000 м, т. е. к величайшей мировой регрессии в течение мезозоя и кайнозоя. Ничего подобного мы не видим. Наоборот, в это время (в сеномане и палеогене) имели место крупнейшие трансгрессии моря.

КОНЦЕПЦИЯ СОПРЯЖЕННОСТИ СЖАТИЯ И РАСШИРЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Гипотеза расширения Земли

Параллелизм очертаний южноамериканского и африканского берегов Атлантики привел ряд исследователей к выводу о том, что образование Атлантического океана является следствием расширения Земли. Подсчитано, что тепловая энергия радиоактивного распада давно бы приостановила или повернула вспять процесс охлаждения Земли, предполагаемый контракционной гипотезой. По данным советского исследователя Е. А. Любимовой, расчеты термической эволюции Земли указывают на возможность разогрева и расширения ее.

Сторонники гипотезы расширения Земли считают, что первоначально земной шар по объему был намного меньше, чем сейчас. Радиус его равнялся 3500—4000 км. Поверхность Земли была вдвое меньше современной, и

материки, составлявшие единое целое, сплошной оболочкой покрывали весь земной шар. Океанов еще не существовало. По мнению одних исследователей, расширение Земли началось с конца палеозойской эры. Другие считают, что оно началось лишь в меловом периоде. С этого момента радиус Земли стал увеличиваться приблизительно на 0,6 мм ежегодно. Расширение вызвало растрескивание первоначально единой материковой коры и образование отдельных континентов. По мере дальнейшего расширения Земли континенты все дальше и дальше отодвигались друг от друга, оставаясь прочно связанными с верхней мантией. В промежутках между материками обнажался подкорковый слой. Сюда проникало поднимающееся снизу мантийное вещество, образуя новую кору океанического типа. Эту гипотезу в конце 50-х годов нынешнего столетия выдвинул венгерский геофизик Л. Эдьед. В СССР ее разрабатывают, в частности, Н. В. Кириллов, В. Б. Нейман и другие.

Причину огромного и быстрого расширения земного шара одни исследователи видят в уменьшении с течением времени гравитационной постоянной и, следовательно, силы тяжести. Другие ученые объясняют расширение Земли разуплотнением глубинного вещества с постепенным переходом его в менее плотные фазовые состояния. Высказывается предположение, что в ядре Земли вещество находится в том состоянии уплотнения, которое было создано до образования Земли при давлениях, какие сейчас в Земле не наблюдаются. Поэтому эти фазы неустойчивы, и в недрах Земли идет непрерывный процесс разуплотнения с увеличением объема. По данной гипотезе средняя плотность земного шара до расширения должна была бы достигать $15,5 \text{ г/см}^3$, а ускорение силы тяжести на поверхности Земли вдвое превышало бы современное.

Гипотеза расширения Земли вызывает ряд возражений как со стороны последователей мобилизма, так и со стороны фиксистов. Мобилисты указывают, что на земной поверхности преобладает меридиональная ориентировка срединно-океанических хребтов. Благодаря этому океаническая кора нарастает в широтном направлении значительно быстрее, чем в меридиональном. Поэтому причиной разрастания дна не может быть общее расширение Земли. Иначе такое расширение происходило бы

с разной скоростью в разных направлениях, и Земля потеряла бы свою сферическую форму. Поэтому считается, что расширение океанической коры за счет нарастания ее в зоне срединных хребтов должно компенсироваться разрушением новообразованной коры в других зонах. По мнению В. В. Белоусова, эта гипотеза совершенно неприемлема, так как нет никаких оснований предполагать, что вещество внутри Земли постепенно становилось все менее плотным. Другим возражением гипотезе расширения Земли является существование эпох складчатости в истории Земли и наличие складчатых деформаций и надвигов, возникающих в земной коре в обстановке сжатия.

Пульсационная гипотеза

Ряд ученых видят возможные причины горизонтальных движений материков в попеременном сокращении и увеличении радиуса Земли. В начале XX в. была высказана идея о том, что в истории Земли эпохи расширения сменяются эпохами сжатия земной коры. Позднее эта — пульсационная гипотеза была развита американским геологом В. Бэчером и советскими академиками В. А. Обручевым и М. А. Усовым. В основе пульсационной гипотезы лежит представление о том, что Земля периодически испытывала то сокращение, то увеличение в объеме и вследствие этого попеременно то сжималась, то растягивалась. Таким образом, гипотеза исходила из абсолютного преобладания вертикальных движений. Однако В. А. Обручев указывал, что она предполагает в конечном итоге перемещение континентов. Это перемещение должно происходить от зон растяжения к зонам сжатия. Идею о взаимной сопряженности процессов растяжения и сжатия активно развивают некоторые современные последователи пульсационной гипотезы, в частности член-корреспондент АН СССР П. Н. Кропоткин. П. Н. Кропоткин указывает, что наблюдающаяся в истории Земли ритмичность чередования эпох складчатости и периодов относительного покоя делают пульсационную гипотезу правдоподобной.

Согласно пульсационной гипотезе под влиянием космических или иных факторов происходит нерегулярное изменение радиуса Земли. Эпохам сжатия соответству-

ют орогенические фазы, эпохам расширения — периоды покоя и прогибания бассейнов. Растяжение земной коры сосредоточено главным образом в рифтовых зонах. В фазы растяжения здесь происходит разрыв и утонение коры с образованием сбросов и тектонических рвов (грабен). Примерами грабенов являются впадина Байкал и Красное море. Растяжение земной коры в рифтовых зонах компенсируется ее сжатием в области глубоководных желобов и горноскладчатых систем, где породы земной коры более податливы к изгибу, складкообразованию. В горноскладчатых системах происходит смятие слоев, утолщение коры и сокращение поверхности складчатых зон. Если эффекты сжатия и растяжения распределяются неравномерно на поверхности Земли, то элементарным геометрическим следствием многократного попеременного сжатия и растяжения должен быть дрейф промежуточных глыб коры от зон растяжения к зонам сжатия — например, движение Сирийско-Аравийской плиты от грабенов Красного моря и Аденского залива в сторону складчатых хребтов Тавра, Загроса и Кавказа.

Предполагая неравномерное распределение эффектов сжатия и растяжения земной коры, большинство сторонников пульсационной гипотезы считают, что эпохи расширения лишь осложняют процесс сокращения объема Земли, и сжатие преобладает, особенно в настоящую эпоху. В пользу прогрессирующего уменьшения радиуса Земли свидетельствует ряд геологических фактов. К последним относятся, в частности, преобладание опусканий над поднятиями в истории Земли, существование планетарных эпох складчатости и господства напряжений сжатия в очагах землетрясений под складчатыми горными сооружениями. На существование попеременных изменений радиуса Земли указывают, по мнению ученых, в частности, и такие астрономические факторы, как, например, наблюдаемые изменения угловой скорости вращения Земли вокруг своей оси, устанавливаемые по изменениям продолжительности суток. Имеются также данные палеомагнетизма, указывающие на колебания величины радиуса Земли в пределах 10% на протяжении последних 500 млн. лет (рис. 23).

Вопрос о причинах пульсации остается неясным. М. А. Усов связывал их с космическими факторами. По В. А. Обручеву, одной из причин расширения Земли мо-

жет быть переход магмы из твердого состояния в жидкое в зависимости от выделения тепла при радиоактивных процессах или от уменьшения давления после прекращения сжатия. А причиной сжатия является интенсивное выделение тепла в эпохи расширения, благодаря выносу его лавами, газами, парами и горячими источниками. По мнению П. Н. Кропоткина, общее движение вещества в земной коре и мантии Земли должно быть похоже на то, которое предполагается в гипотезах подкоровой конвекции.

В последние годы были произведены непосредственные измерения напряженного состояния горных пород

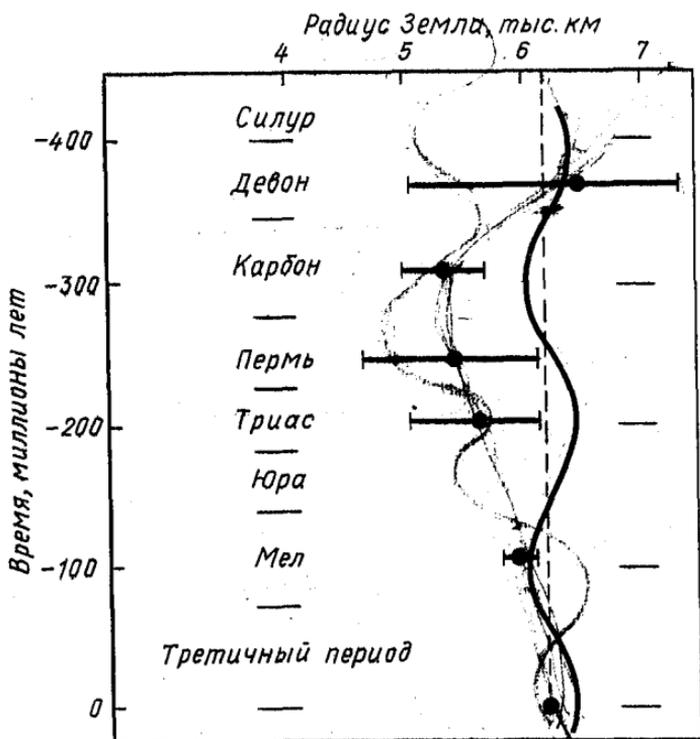


Рис. 23. Изменения радиуса Земли во времени (по П. Н. Кропоткину, 1970):

Кружком указано значение, полученное как среднее из различных определений; отрезками в обе стороны от кружка — разброс данных, полученных разными авторами.

земной коры и, в частности, горизонтально ориентированного напряжения сжатия в земной коре. Были исследованы кристаллические породы «гранитного» слоя земной коры, обнажающиеся в шахтах, штольнях и котлованах. На глубине горные породы сдавливаются как по вертикали под силой веса вышележащих пород, так и по горизонтали. Оказалось, что уже на небольшой глубине горные породы находятся под действием сильнейших усилий, ориентированных горизонтально. Эти фактически существующие горизонтальные напряжения

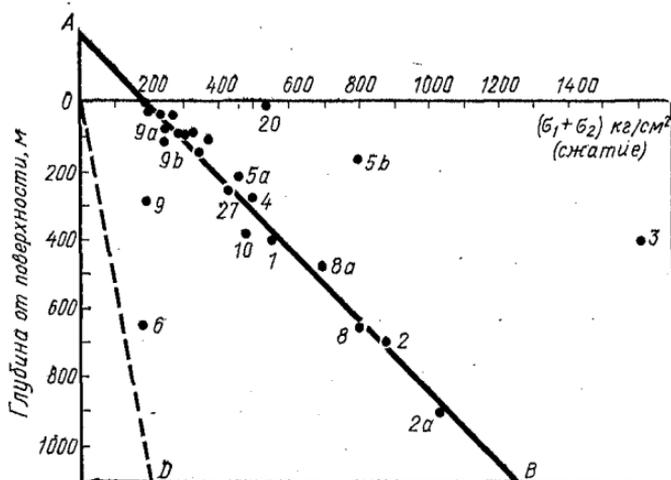


Рис. 24. Изменение горизонтальных напряжений с глубиной в скальных породах Швеции, Норвегии, Финляндии (по П. Н. Кропоткину, 1970):

АВ — по данным экспериментальных исследований.

OD — горизонтальные напряжения, которые должны были бы возникнуть под действием веса слоев, лежащих выше.

сжатия земной коры значительно превышают те, которые предполагались расчетным путем. Так, горизонтальное сжатие на 100—500-кг/см² превышает ту величину, которую можно было бы отнести за счет давления, обусловленного весом лежащих выше слоев. Шведским геофизиком Н. Хастом проанализированы измерения горного давления в различных районах Швеции, Финляндии, Норвегии, где «гранитный» слой выступает на поверхность. В кристаллических породах Балтийского щита и

в скальных породах каледонид Норвегии сумма напряжений по двум взаимно перпендикулярным горизонтальным осям обычно уже у поверхности составляет 180 кг/см^2 (рис. 24) — вместо нулевого значения, которое можно было бы ожидать в связи с отсутствием нагрузки.

На глубине 400 м это давление таково, каким оно должно было быть по расчетам лишь на глубине 1 км. А то давление, которое должно быть на глубине 400 м, на самом деле господствует уже на глубинах 30—50 км (см. рис. 24). Подобные исследования проведены в шахтах и скважинах, в тоннеле под Монбланом и в скалах Шпицбергена, в Канаде, Египте, Малайзии, Португалии, Иране и других районах. В СССР аналогичные результаты были получены при измерениях горизонтально ориентированных напряжений на Кольском полуострове, в Саянах и в Средней Азии. На основании обобщения всех отмеченных данных Н. Хаст и П. Н. Кропоткин делают вывод, что в нынешнюю геологическую эпоху вся земная кора в самых различных геологических условиях — в альпийской складчатой области под горными хребтами, на платформах под долинами и в таких районах, как Исландия, где предполагают растяжение, — охвачена боковым сжатием, связанным с прогрессирующим сокращением радиуса Земли.

По мнению П. Н. Кропоткина, измерение напряжений в земной коре кладет конец спору о том, какие движения вызывают сгибание складок земных слоев и горообразование, — горизонтальные или вертикальные? Основная доля давления в сильно сжатых складчатых поясах приходится на «бока» хребтов. П. Н. Кропоткин сравнивает образование складок с выгибанием лежащего на столе листа бумаги при сдвигании навстречу друг другу его противоположных сторон.

Зависимость горизонтальных напряжений с глубиной имеет линейный характер. П. Н. Кропоткин указывает, что это дает все основания предполагать, что дополнительное к расчетному горизонтальное сжатие увеличится до $200\text{—}500 \text{ кг/см}^2$ на глубинах около 10—30 км, т. е. на тех глубинах, где на земном шаре выделяется наибольшее количество сейсмической энергии. На еще больших глубинах это горизонтальное сжатие, вероятно, сходит на нет по мере перехода в пластичную зону астено-

сферы. Здесь должны господствовать напряжения, близкие к гидростатическому давлению. Установлено, что количество землетрясений возрастает в те годы, когда скорость вращения Земли увеличивается, а момент инерции и радиус уменьшаются. Горизонтально ориентированное сжатие в земной коре и подкоревой оболочке в такие годы должно возрастать.

Дифференциация вещества мантии Земли и образование магматических расплавов

Исследование глубин Земли относится к числу важнейших проблем геологии. Одним из основных направлений глубинной геологии является изучение внутренней динамики Земли, в значительной мере связанной с дифференциацией вещества мантии и образованием магматических расплавов. В период господства космогонической гипотезы Канта—Лапласа ученые считали, что недра Земли состоят из раскаленной огненной массы. Это раскаленное вещество принималось за тот исходный первозданный магматический расплав, который сначала, остывая, образовал земную кору, а затем проникал сквозь трещины на поверхность Земли.

На смену гипотезе о первично-жидком состоянии Земли пришла разработанная академиком О. Ю. Шмидтом гипотеза, согласно которой Земля образовалась из холодного метеоритного вещества. В связи с этим перед геологами встала новая проблема — как научно объяснить возникновение значительных магматических масс в области земной коры? Как объяснить различие в химическом составе пород земной коры и верхней мантии? Каков механизм преобразования вещества мантии Земли; как возникают магматические расплавы, внедряющиеся в земную кору?

В проблеме химической эволюции Земли главным является вопрос о способе дифференциации вещества земного шара на оболочки — мантию с ее зонами (см. рис. 2), земную кору, гидросферу и атмосферу. Ученые по-разному объясняют дифференциацию вещества в области верхней мантии. Одна из наиболее распространенных гипотез исходит из предположения, что мантия Земли состоит из вещества каменных метеоритов.

Каменные метеориты разделяются на две большие группы — ахондриты и хондриты, различающиеся по своему минеральному составу. На поверхность Земли хондритов выпадает значительно больше. Это привело к возникновению представлений о том, что вещество мантии Земли соответствует составу хондритов. Последние представляют собой смесь нескольких фаз — силикатной, железной — сульфидной, хромитной, углистой и другие. Наиболее изучена силикатная фаза, составляющая свыше 80% вещества каменных метеоритов и состоящая в основном из двух молекул — ортосиликата магния Mg_2SiO_4 и метасиликата магния $MgSiO_3$. Первая из них соответствует по составу минералу форстериту, являющемуся крайним членом оливиновой системы Mg_2SiO_4 (форстерит) — Fe_2SiO_4 (фаялит). Вторая молекула силикатной фазы хондрита по составу соответствует минералу энстатиту — крайнему члену пироксеновой системы $MgSiO_3$ (энстатит) — $FeSiO_3$ (гиперстен).

Академик А. П. Виноградов произвел эксперимент, результаты которого подтверждают предположение, что первичное вещество мантии соответствовало по составу силикатной фазе хондритов. По А. П. Виноградову, в течение геологической истории Земли происходил необратимый направленный процесс обогащения поверхности Земли веществом более легкоплавким и легколетучим, чем вещество мантии. Это привело к образованию земной коры, толщина которой составляет менее 1% толщины мантии Земли. Однако расчеты показывают, что в случае полного проплавления всей мантии, соответствующей по своему составу силикатной фазе хондритов, толщина земной коры могла бы быть значительно больше. Под влиянием тепла от радиоактивного распада из глубинных недр мантии Земли должно происходить выплавление и дегазация легкоплавкой и легколетучей фракции мантийного вещества. А. П. Виноградов восстановил этот процесс в лабораторных условиях, используя метод так называемой зонной плавки. А. П. Виноградов подверг зонной плавке небольшой цилиндрок спрессованного тонкого порошка хондрита при $1600^\circ C$ в течение 40 часов. Вещество хондрита нагревалось в узкой зоне до проплавления. Затем нагреватель медленно передвигался вдоль цилиндра. При многократном повто-

рени опыта вещество хондрита расщеплялось на две фазы. Легкоплавкая (жидкая) фаза оттеснилась в верхний конец цилиндрика и застыла здесь в виде стеклообразной базальтической массы. Оставшаяся твердая — тугоплавкая фаза представляла собой ультраосновную оливиновую породу — дунит. А металлическое железо собралось в каплю. Таким образом, в процессе зонной плавки произошло расщепление вещества каменного метеорита на базальтическое вещество — породу земной коры и дунит — породу верхней мантии Земли.

По мнению А. П. Виноградова, результаты опыта дают основание рассматривать образование оливиновых пород (дунитов) и базальтических магм в природных условиях как подобие процесса зонной плавки. Дуниты, слагающие самую верхнюю часть верхней мантии, могут рассматриваться как остаток от выплавления и дегазации первичного метеоритного вещества мантии. А. П. Виноградов считает, что дуниты никогда не были жидкими. Они подобно штокам соли текут и, таким образом, внедряются в виде твердого нагретого тела.

Процесс образования базальтического магматического расплава, по А. П. Виноградову, представляется следующим образом. Под влиянием теплоты радиоактивного распада в мантии происходит разложение первичного метеоритного вещества на легкоплавкую и тугоплавкую фазы. Легкоплавкая фаза (базальтическая магма) идет на построение земной коры, а тугоплавкая фаза (дуниты) слагает верхние горизонты верхней мантии. Согласно произведенным расчетам из каменных метеоритов в процессе зонной плавки может выплавиться максимум около 15% вещества силикатов. Химические элементы семейства металлического железа, никеля, кобальта, хрома и др. при зонной плавке остаются неподвижными и накапливаются в тугоплавкой фазе. А легкоплавкая (базальтовая) фаза обогащается именно теми химическими элементами, коэффициенты концентрации которых в земной коре наибольшие.

Областью питания земной коры веществом мантии, по А. П. Виноградову, являются зоны мантии с глубин наиболее глубокофокусных землетрясений, т. е. 800—900 км и может быть глубже. В процессе выплавления и дегазации мантийного вещества на земную поверх-

ность выносились наиболее летучие вещества. Это приводило к образованию гидросферы и атмосферы.

Согласно гипотезе различного состава верхней мантии (см. рис. 3) под континентами верхняя мантия сложена эклогитами, а под океанами — перидотитами. В. В. Белоусов предполагает, что в области астеносферы при определенных температурных условиях может произойти частичное плавление вещества. В этом случае между твердыми кристаллами появляются капли и пленки жидкого расплава, из которого может быть выплавлен базальт. Так образуется, в частности, базальт из перидотита в области океанов. Здесь пироксен, входящий в состав перидотита, плавится при сравнительно невысокой температуре, когда другие минералы еще остаются твердыми. Капли базальта, всплывая, собираются в самостоятельные жидкие массивы, называемые «астенолитами». Последние пополняют базальтовую магму земной коры. В случае эклогитового состава верхней мантии (под материками) базальт, по В. В. Белоусову, может образоваться путем полного плавления исходного материала.

По гипотезе А. Рингвуда, верхняя мантия сложена гипотетическим веществом — пиролитом, состоящим из трех частей перидотита и одной части базальта. В. В. Белоусов указывает, что за этой характеристикой скрывается состав разности перидотита, называемой гарцбургитом. В целом такой пиролит близок к составу хондрита. В зависимости от давления и температуры в пиролит могут входить полевые шпаты, шпинель, гранат. Экспериментальным путем А. Рингвуд выплавил из пиролита 25—30% базальта.

А. П. Виноградов отмечает, что в случае хондритового состава мантии базальтическая оболочка земной коры и дуниты верхней мантии Земли образуются в результате расщепления вещества мантии. Дуниты являются остаточной породой мантии от выплавления базальтов. Следовательно, речь может идти только об одной базальтической магме. Из остаточного дунита уже невозможно вторично получить базальты. Согласно расчетам, произведенным советским исследователем Ю. М. Шейнманном, подобная картина получается и в случае выплавления материковой земной коры из перидотитовой верхней мантии. Здесь также остался бы в

остатке дунит, из которого уже невозможно получить базальты. Это исключает проявления вулканизма после образования земной коры. Однако в действительности известно, что мощные извержения вулканов и излияния базальтовых лав имели место в течение всей геологической истории Земли вплоть до наших дней. По мнению Ю. М. Шейнманна, только в случае пиrolитовой модели верхней мантии можно объяснить наблюдаемый состав земной коры и многократное проявление вулканической деятельности на материках.

Однако с пиrolитовой моделью не согласен другой советский исследователь В. С. Соболев. Он указывает, в частности, что при рассмотрении проблемы образования магмы для достаточно длительного позднего периода жизни Земли следует исходить не из гипотетического пиrolита, а из существования различных пород, значительно различающихся по своему составу и температурам плавления. По В. С. Соболеву, верхняя мантия Земли, особенно под континентами, дифференцирована в широких пределах на значительную глубину (до 200 км). Эта область характеризуется чередованием преобладающих гипербазитов (лерцолиты, дуниты, гарцбургиты) с основными породами (эклогитами). Подобная дифференциация произошла более 2 млрд. лет назад в период образования земной коры. По В. С. Соболеву, на глубинах 100—250 км происходит частичное плавление вещества. Причем в поздний период развития Земли магмы образуются в значительной части не за счет выплавления из первичного пиrolита, а путем селективного, а иногда и полного плавления эклогитов и близких к ним пород.

В основе рассмотренных выше гипотез лежит представление о существовании только одной — основной (базальтовой) магмы, являющейся исходной для всех магматических пород, известных на поверхности Земли. Однако в вопросе о составе магмы ученые далеко не единодушны. Большое разнообразие магматических пород привело одних исследователей к предположению о существовании двух родоначальных магм — основной (базальтовой) и кислой (гранитной). А другая группа ученых предполагает существование трех самостоятельных исходных магм, отвечающих по своему составу известным горным породам. К числу этих магм относят-

ся — ультраосновная (перидотитовая), основная (габбро-базальтовая) и кислая (гранит-липаритовая). Считается, что каждая из этих магм образует соответствующий тип магматических горных пород.

Почти все исследователи ограничивают рассмотрение дифференциации глубинного вещества областью верхней мантии. Советский геофизик Е. В. Артюшков выдвинул гипотезу глубинной дифференциации вещества на границе мантии и ядра Земли. По представлениям Е. В. Артюшкова, первичное вещество Земли в нижней части мантии под влиянием огромных давлений и высоких температур разделяется на тяжелую жидкую фазу и легкую твердую фазу. Жидкая фаза, представленная либо расплавленным железом, либо силикатами, стекает вниз и образует ядро Земли. Твердая легкая силикатная фаза стремится подняться вверх, так как она легче вещества нижней мантии. Прорываясь в верхнюю мантию, она образует радиальную зону пониженной вязкости. По этому каналу, вверх устремляются все новые и новые порции легкой фазы. Достигнув верхней мантии, эти силикатные массы испытают частичное плавление. В результате на этой второй стадии их дифференциации образуется базальтический расплав и твердый ультраосновной остаток. Существование астеносферы — слоя пониженной вязкости, по мнению Е. В. Артюшкова, практически исключает прямое воздействие поднимающихся силикатных масс на более высокие горизонты. Предполагается, что такой процесс продолжается до настоящего времени. По мнению Ю. М. Шейнманна, использование этой гипотезы может удачно объяснить многие процессы внутренней динамики Земли.

Проблема поисков полезных ископаемых

Геологии, как никакой другой науке, характерна исключительная близость между общей теоретической концепцией и практикой геологического поиска. Народное хозяйство находится в постоянной зависимости от умения геологов находить и использовать природные богатства. Поэтому выяснение состава и структуры оболочек Земли и истории ее эволюции является главной задачей теоретической геологии. Эти сведения в конечном счете помогают геологам глубже раскрыть закономерности

происхождения и размещения в земной коре полезных ископаемых и содействуют скорейшему обнаружению их залежей и месторождений, необходимых для развития народного хозяйства.

В недалеком прошлом областью деятельности геологии были самые верхние, внешние слои Земли. Но в последние годы научные интересы геологов устремлены к исследованию более глубоких слоев земной коры и верхней мантии. Изучение вещества Земли, ее строения и эволюции приобретает глобальный характер. При этом традиционное описательное знание в геологии приблизилось к физико-химическим экспериментальным исследованиям и вытесняется анализом и открытием первопричин. Это, естественно, способствовало появлению новых научных гипотез и развитию новых направлений в геологии. Благодаря этому в последние годы стало возможным разрешение целого ряда научных общегеологических проблем. Однако многие теоретические представления о составе, свойствах и эволюции земной коры и мантии Земли еще в значительной мере умозрительны и противоречивы. Многие гипотезы далеки еще от действительного приближения к истине и пока не могут быть объединены в одну цельную — общепринятую концепцию теории Земли. Несмотря на огромный качественный сдвиг, происшедший в последние годы в науках о Земле, ученые еще не создали общую теорию Земли. В настоящее время ни одна из рассмотренных основных гипотез строения и развития Земли не может быть принята безоговорочно. Каждая из них имеет свои сильные и слабые стороны и каждая по-своему ориентирует геологов-практиков на поиски месторождений полезных ископаемых. Тем не менее, как справедливо отмечает ряд ученых, в частности известный советский исследователь в области глубинного строения Земли профессор Н. А. Беляевский, общее направление развития таких представлений, по-видимому, уже наметилось. Это позволяет выразить уверенность, что в недалеком будущем наши знания о земных недрах приобретут в своих основных чертах достаточную определенность, чтобы стать теоретической базой для развития общей геологии и выводов практического характера.

В последние годы невиданными ранее темпами ускоряется процесс вовлечения достижений геологической

науки в сферу практического использования в технике и промышленности. Это обусловило резкое сокращение разрыва между реализованными в народном хозяйстве научными разработками и накопленным теоретическим «заделом», еще не нашедшим практического применения. Поэтому усиление фундаментальных теоретических исследований в геологии и создание общей теории Земли является одной из наиболее актуальных задач, стоящих перед геологической наукой. Опираясь на общую теорию Земли, геологи смогут более целенаправленно и успешно развивать перспективные поисковые исследования.

Одним из важных вопросов, связанных с прогнозированием месторождений полезных ископаемых, является вопрос о строении земной коры, а также об источниках и способах переноса вещества, формирующего месторождения того или иного полезного ископаемого. Это делает, в частности, проблему магмообразования одной из актуальных проблем теоретической геологии. Решение ее ведет к расшифровке кардинальных вопросов магматизма, тектоники и рудогенеза.

В верхней оболочке Земли — земной коре концентрируются важнейшие минеральные богатства, составляющие материальную основу развития промышленности. Современные технические средства позволяют искать, открывать и эксплуатировать месторождения полезных ископаемых на очень больших глубинах. И чтобы на этих глубинах делать обоснованные научные прогнозы, необходимо знание геологии «базальтового» слоя земной коры. Без этого, в частности, трудно выяснить природу и условия залегания полезных ископаемых на значительных глубинах от поверхности Земли. Необходимо также иметь представление о том, в каких условиях зарождаются рудоносные растворы, каким путем происходит их концентрация в месторождения. В этом отношении формированию правильных представлений о состоянии вещества в глубинах Земли содействует экспериментальное исследование различных силикатных систем с целью определения их поведения при высоких давлениях и температурах. По имеющимся данным, зоны, характеризующиеся разным проявлением эндогенной металлогении, различаются мощностью и строением земной коры. Например, золоторудные и оловорудные провинции Тихоокеанского подвижного пояса имеют в це-

лом меньшую мощность земной коры и менее развитый гранитный слой, чем районы с полиметаллической и медной минерализацией в Центральном Казахстане.

Подробные сведения о глубинном строении и составе земной коры необходимы также для предсказания катастрофических землетрясений и вулканических извержений, которые являются следствием разрядки глубинных напряжений в земной коре.

Большое практическое значение имеет вопрос о том, существуют ли действительно два различных по строению типа земной коры — океанический и континентальный. Так, по мнению члена-корреспондента АН СССР Г. Д. Афанасьева, гипотеза о «двухтипности» земной коры сужает перспективы прогнозирования потенциальных ресурсов некоторых важнейших видов минерального сырья, ограничивая их площадями современных континентов и прибрежной полосы. По Г. Д. Афанасьеву, основные закономерности геологического развития земной коры, в том числе и закрытой ныне океаническими водами, одинаковы. В результате более определенным становится подход к решению теоретических и практических проблем геологии. Поскольку земная кора едина, то скопления, например, нефти возможны не только в пределах прибрежной полосы — шельфа, но и в платформенных осадочных отложениях дна глубоководных частей океана. Единый подход к изучению вопросов зарождения магмы в глубинах Земли позволит быстрее выявить общие законы, управляющие магматической деятельностью и рудообразованием.

До недавнего времени все минеральные вещества — нефть и уголь, черные, цветные и редкие металлы, сырье для химической и строительной промышленности — извлекались из недр континентов. Однако запасы минерального сырья на материках быстро уменьшаются. Поэтому все более необходимым становится использование минеральных ресурсов океанического дна. В последние годы особенно остро встал вопрос о добыче полезных ископаемых, находящихся под водами морей и океанов. В связи с этим изучение строения и эволюции океанического дна является одной из актуальных задач геологии.

По подсчетам ученых, в прибрежной — шельфовой

части Мирового океана на глубинах до 200 м сосредоточено, например, не менее одной трети мировых запасов нефти и газа. Из морских месторождений добывается ныне около 20% всей мировой добычи нефти и газа. А к началу 80-х годов, по оценкам ученых, мировая добыча морской нефти составит 35—44% всей ее добычи. По прогнозам геологов, крупные запасы нефти содержатся в Черном, Азовском, Балтийском, Баренцевом и Карском морях. Громадные запасы природного газа открыты в Северном море. Найдена нефть в прибрежных районах Индонезии, Малайзии, на восточном и южном побережье Африки. Крупные нефтепроявления выявлены на западном побережье Африки в районе прибрежного нигерийского бассейна. Нефтяные залежи открыты в Мексиканском заливе, предполагаются они в Бискайском заливе и Охотском море. Богатой кладовой нефти и газа является дно Северного Ледовитого океана. Здесь недавно на побережье северной части Аляски обнаружено крупнейшее нефтяное месторождение.

В зоне морского шельфа содержатся также большие россыпи титана, платины, железа, радиоактивных элементов, алмазоносных песков, циркония, олова, золота.

Вопреки первоначальному мнению, оказалось, что материковый склон и даже прилегающая зона глубоководных впадин также таят огромные запасы минерального сырья. В пределах континентального склона можно найти залежи нефти и газа, серы, угля и рудных полезных ископаемых. А на дне глубоководных частей морей и океанов, где земная кора имеет океанический тип строения, реально получение в больших количествах марганца, железа, меди, свинца, цинка, хрома, никеля, кобальта и платины. Обширные пространства океанического дна усеяны железо-марганцевыми конкрециями. Химический анализ показал, что они содержат марганец, железо, никель, кобальт, медь и молибден. Большим содержанием железа, марганца, цинка, свинца, меди, золота и серебра характеризуются высокотемпературные рассолы, изливающиеся на морское дно вдоль осевой линии срединно-океанических хребтов.

Исследования, проведенные в последние годы в Красном море, открыли геологам процесс образования минералов, ранее неизвестный. На дне Красного моря были обнаружены скопления горячих соляных растворов, на-

сыщенных такими ценными элементами, как медь, золото, серебро, железо, никель, цинк, кадмий. Здесь под воздействием различных факторов — давления, температуры и химической среды — растворенные элементы осаждаются, образуя богатые глубоководные месторождения полезных ископаемых. Здесь на глубине около 2000 м обнаружен более чем 100 м слой осадков сульфидов железа, марганца, свинца и цинка.

Одним из актуальных вопросов, имеющих большое общетеоретическое и практическое значение, является изучение и объяснение причин и характера движений отдельных участков земной коры относительно друг друга и, в частности, проблема перемещения материков. Если будет доказано, что плиты литосферы, действительно, перемещаются горизонтально, будут решены многие неясные проблемы геологии. Знание законов движения земной коры позволит выявлять месторождения полезных ископаемых. С позиций концепции мобилизма, первоначальная рифтовая трещина может разорвать, например, нефтеносные пласты пополам. После расхождения в разные стороны от оси разрыва обеих половин, если нефть будет обнаружена в одной из них, то геологи смогут определить положение и той части, которая в древности составляла вторую половину нефтеносного бассейна. Сопоставление контуров материкового склона Атлантического океана по изобате 910 м указывает на их совпадение. Отмечается также полное соответствие тектонических и металлогенических зон в окраинных частях Южной Америки и Африки. Опираясь на эти данные, группа бразильских и американских геологов по расположению одного рудного месторождения, идущего вдоль Атлантического побережья Африки, предсказала месторождение аналогичных руд на атлантическом побережье Бразилии.

Большое теоретическое и практическое значение имеет дальнейшее изучение и развитие теоретических исследований, связанных с выявлением природы вертикальных движений. Именно вертикальными движениями обусловлено распределение на земной поверхности областей денудации и осадконакопления. Эти движения сопровождают магматические процессы, гравитационные явления, образование разнообразных форм складок и разрывов.

В настоящее время становится трудно объяснить ряд закономерностей в развитии Земли без привлечения космических факторов. Поэтому в геологии успешно развивается космогеологическое направление, сторонники которого ищут связь между периодичностью в истории развития Земли и космическими процессами.

Краткий словарь терминов

- Астеносфера** — область верхней мантии Земли на глубинах 50—400 км, в пределах которой вещество обладает меньшей вязкостью, чем в остальной части мантии, и, по-видимому, находится в размягченном состоянии.
- Базальтовый слой** — нижний слой земной коры, скорость прохождения через который сейсмических волн соответствует скоростям упругих колебаний, полученным экспериментальным путем для базальтов.
- Базальты** — основные магматические породы черного или темно-серого цвета, изливающиеся при вулканических извержениях либо через огромные трещины в земной коре.
- Базификация** — процесс формирования вторичной более основной по составу океанической коры вследствие погружения в мантию первичной континентальной земной коры, пронизанной интрузиями ультраосновных пород.
- Габбро** — основные магматические породы, близкие по составу базальтам; являются глубинными аналогами последних.
- Гондвана** — по племени гондов, населявших Индостан. Сверхматерик, существовавший с конца протерозойской эры и почти до конца мезозойской эры и объединявший территорию Бразилии, значительную часть Африки, Аравии, Индии, Австралии, Антарктиды. По представлениям многих ученых, в Гондвану входили также и разделяющие южные материка пространства, занятые впадинами Индийского и южной части Атлантического океанов.
- Гранитный слой** — средний слой земной коры, скорость прохождения через который сейсмических волн совпадает со скоростью упругих колебаний, полученных в лаборатории для образцов гранитных пород.
- Земная кора** — верхняя, наружная оболочка Земли, состоящая из осадочного, гранитного и базальтового слоев.
- Конвекция** — перемещение разогретого разуплотненного мантийного вещества вверх и последующее его погружение обратно в глубокие горизонты мантии при охлаждении и уплотнении.
- Контракция** — уменьшение объема (сжатие) подкорковых масс мантийного вещества Земли вследствие ее охлаждения.
- Лавразия** — по реке Св. Лаврентия и Азии. Сверхматерик, который, по мнению одних исследователей, с палеозойской эры, а по мнению других, в мезозойской эре, объединял материка Северного полушария.

- Литосфера** — жесткая верхняя оболочка Земли, включающая земную кору и твердую надстеносферную часть верхней мантии.
- Мантия** — промежуточная оболочка Земли, располагающаяся между твердой земной корой и, по-видимому, размягченным ядром Земли.
- Мобилизм** — концепция, согласно которой отдельные материки или плиты литосферы испытывают продолжительное горизонтальное перемещение относительно друг друга.
- Океанизация** — конечный результат базификации материковой коры, выраженный в образовании океана на месте материка.
- Оливины** — группа магнево-железистого силиката, являющегося одним из главных минералов ультраосновных пород мантии Земли.
- Осадочный слой** — верхний слой земной коры, сложенный продуктами разрушения пород гранитного слоя.
- Основные горные породы** — магматические породы, характеризующиеся содержанием кремнезема в пределах 40—50%.
- Пангеа** — праматерик, объединяющий в начальные эры развития Земли все современные континенты и омываемый со всех сторон Мировым океаном.
- Пироксены** — группа магнево-железистого силиката, являющегося вторым по значению минералом ультраосновных пород мантии Земли.
- Плиты литосферы** — огромные блоки литосферы, совершающие горизонтальный дрейф по поверхности размягченной астеносферы.
- Полюс вращения** — точка пересечения с поверхностью Земли воображаемых осей, вокруг которых происходит поворот плит литосферы, раздвигающихся в разные стороны от срединно-океанических хребтов.
- Пульсация** — попеременное сжатие и расширение Земли.
- Рифтовая долина** — глубокая расщелина в осевой части срединно-океанического хребта, параллельная его оси.
- Сейсмическая модель Земли** — график, отражающий изменение с глубиной скорости распространения сейсмических волн.
- Срединно-океанический хребет** — подводная цепь горных хребтов, расположенная обычно в средней части океана и осложненная центральной рифтовой долиной и поперечными трансформными разломами.
- Тетис** — древний вытянутый в широтном направлении океан, разделявший сверхматерики Гондвану и Лавразию.
- Трансформный разлом** — вертикальный разрыв земной коры, пересекающий срединно-океанический хребет в поперечном направлении, вдоль которого происходит горизонтальное смещение двух блоков срединного хребта.
- Ультраосновные породы** — магматические породы, слагающие мантию Земли и содержащие менее 40% кремнезема.
- Фиксизм** — концепция, утверждающая, что взаимное расположение материков сохранялось неизменным в течение всей геологической истории Земли.
- Эклогит** — основная магматическая порода, по составу сходная с базальтами и габбро, но отличающаяся большей плотностью.
- Ядро Земли** — центральная часть земного шара, состоящая из жидкого внешнего ядра и твердого внутреннего ядра.

Литература

- Белоусов В. В. Земля, ее строение и развитие. М., Изд-во АН СССР, 1963.
- Белоусов В. В. Земная кора и верхняя мантия материков. М., «Наука», 1966.
- Белоусов В. В. Земная кора и верхняя мантия океанов. М., «Наука», 1968.
- Белоусов В. В. Взаимоотношение между корой и верхней мантией Земли. — В сб.: «Земная кора и верхняя мантия». М., «Мир», 1972.
- Верхняя мантия Земли. Собрание статей. М., «Мир», 1964.
- Виноградов А. А. Верхняя мантия — земная кора (геохимический аспект). М., 1964.
- Виноградов А. П., Удинцев Г. Б., Дмитриев Л. В. и др. Строение рифтовой зоны Индийского океана и ее место в мировой системе рифтов. Изв. АН СССР, серия «Геология», № 10, 1969.
- Геншафт Ю. С., Шейнманн Ю. М. Термодинамическая неустойчивость в верхней мантии океанов и некоторые возможные геологические следствия. — «Геотектоника», № 4, 1972, стр. 35.
- Грин Д. Х., Рингвуд А. Э. Петрология верхней мантии. М., «Мир», 1968.
- Гутенберг Бено. Физика земных недр. М., Иностранная литература, 1963.
- Деменицкая Р. М. Кора и мантия Земли. М., «Недра», 1967.
- Дмитриев Л. В., Удинцев Г. Б., Шараськин А. Я., Сорохтин О. Г. К вопросу о природе основных слоев земной коры океанического типа. — В сб.: «Исследования по проблеме рифтовых зон Мирового океана». Т. II. М., «Наука», 1972, стр. 216.
- Дмитриев Л. В., Шараськин А. Я. Петрография и петрохимия коренных пород Аравийско-Индийского хребта. — В сб.: «Исследования по проблеме рифтовых зон Мирового океана». Т. II. М., «Наука», 1972, стр. 156.
- Дрейф континентов. Горизонтальные движения земной коры. Сборник статей. М., «Мир», 1966.
- Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли, Луны и планет. М., «Знание», 1973.
- Земная кора и верхняя мантия. М., «Мир», 1972.
- Исследования по проблеме рифтовых зон Мирового океана. Т. II. М., «Наука», 1972.
- Кнопов Л. Дрейф материков и конвекция. — В сб.: «Земная кора и верхняя мантия». М., «Мир», 1972, стр. 595.
- Кропоткин П. Н. Соотношение поверхностной и глубинной структуры и общая характеристика движения земной коры. — В сб.: «Строение и развитие земной коры». М., «Наука», 1964.
- Любимова Е. А. Термика Земли и Луны. М., «Наука», 1968.
- Люстих Е. Н. Неомобилизм и конвекция в мантии Земли. Бюлл. МОИП, отд. геол., т. XL, вып. 1—2, 1965.
- Магницкий В. А. Внутреннее строение и физика Земли. М., «Недра», 1965.
- Магницкий В. А. Волновод в верхней мантии. М., «Наука», 1968.

- Менард Г. У. Геология дна Тихого океана. М., «Мир», 1966.
- Проблемы строения земной коры и верхней мантии. Верхняя мантия, № 7. М., «Наука», 1970.
- Равич М. Г. Загадки Гондваны. М., «Знание», 1972.
- Ранкорн С. К. Конвекция в мантии. — В сб.: «Земная кора и верхняя мантия». М., «Мир», 1972, стр. 602.
- Рингвуд А. Э. Состав и эволюция верхней мантии. — В сб.: «Земная кора и верхняя мантия». М., «Мир», 1972, стр. 7.
- Рингвуд А. Э., Грин Д. Х. Изучение фазовых переходов. — В сб.: «Земная кора и верхняя мантия». М., «Мир», 1972, стр. 574.
- Соболев В. С. Строение верхней мантии и способы образования магмы. М., «Наука», 1973.
- Судо М. М. Геология для всех. М., «Знание», 1973.
- Фогт П. Р., Шнейдер Э. Д., Джонсон Г. Л. Кора и верхняя мантия под океанами. — В сб.: «Земная кора и верхняя мантия». М., «Мир», 1972, стр. 481.
- Хаин В. Е. Общая геотектоника. М., «Недра», 1964.
- Хаин В. Е. Метаморфическая регенерация областей повторного орогенеза и проблема новообразования океанических впадин. — «Геотектоника», № 3, 1969, стр. 31.
- Хаин В. Е. О современном положении в теоретической геотектонике и вытекающих из него задачах. — «Геотектоника», № 4, 1972, стр. 3.
- Хейцлер Дж. Геомагнитные исследования в Атлантическом океане. — В сб.: «Земная кора и верхняя мантия». М., «Мир», 1972, стр. 359.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Сейсмическая модель Земли	5
Свойства и состав внутренних оболочек Земли	8
Земная кора	8
Верхняя мантия	11
Нижняя мантия	22
Ядро Земли	23
Строение океанического дна	25
Срединно-океанические хребты и рифтовые долины	25
Магнитное поле океанов	30
Тепловой поток на океанах	34
Состав и возраст пород океанического дна	36
Концепция новой глобальной тектоники	42
Классическая гипотеза дрейфа материков	43
Гипотеза разрастания океанического дна	47
Гипотеза соответствия полосовых магнитных аномалий раздвигам океанического дна	49
Гипотеза движения плит литосферы	50
Гипотеза полюсов вращения плит	53
Механизм перемещения плит литосферы	54
Скорость разрастания океанического дна и возраст океанов	62
Концепция фиксизма	65
Контракционная гипотеза	66
Гипотеза базификации континентальной коры	67
Концепция сопряженности сжатия и расширения земной коры	70
Гипотеза расширения Земли	70
Пульсационная гипотеза	72
Дифференциация вещества мантии Земли и образование магматических расплавов	77
Проблема поисков полезных ископаемых	82
Краткий словарь терминов	89
Литература	91

НОВЫЙ ПОДПИСНОЙ ФАКУЛЬТЕТ

«ЧЕЛОВЕК И ПРИРОДА»

Свойства окружающей среды, природные условия жизни человека теперь уже заметно меняются на глазах одного поколения. Общеизвестны цифры и факты, говорящие о том, как быстро идет загрязнение окружающей среды, как истощаются ресурсы природы, грубо нарушается экологическое равновесие. Деятельность человека начинает существенно влиять на планетарные процессы.

В основе современного этапа эволюции Земли лежит взаимодействие человеческой деятельности и окружающей среды.

Роль человека в воздействии на окружающую среду растет в небывалых ранее масштабах. Это заставляет искать пути наиболее рационального, целенаправленного использования природных ресурсов.

Человечество поставлено перед необходимостью принять разумные решения, которые помогут спасти нашу планету для дальнейшей жизни на ней. В основу этих решений должны лечь действительно надежные, научно обоснованные данные.

Научно-технический прогресс, который ныне определяет рост интенсивности воздействия человека на окружающую среду, в то же время служит источником оптимизма и веры в могущество человека. Именно научно-

технический прогресс обеспечивает сегодня и более высокий уровень и большую глубину научных исследований.

В 1975 году научно-популярная литература пополнится новой подписной серией — факультетом «Человек и природа». Ежемесячно будет выходить книжка удобного небольшого формата, хорошо иллюстрированная, написанная известным ученым, ведущим журналистом.

Новая подписная серия книг имеет целью обозначить и осветить круг знаний, которые необходимы для решения проблемы рационального использования природных ресурсов и защиты окружающей среды. В основе ее — несколько общих принципов.

Глубина содержания, фундаментальность, достоверность и надежность информации, актуальность исследований, доступность изложения, простота и занимательность формы — все это плюс высокий уровень полиграфического исполнения, несомненно, вызовет интерес у самого взыскательного читателя.

В 1975 году подписчики получают 12 книг. В том числе:

О. В. Бароян, действительный член АМН СССР, **А. М. Лепихов**. **Зачем ее беречь?** (Охрана природы — охрана здоровья человека).

В. В. Дежкин, кандидат биологических наук. **Земля под колесами** (Транспорт и охрана природы).

И. Б. Литинецкий, кандидат технических наук, **В. И. Левин**. **Многоэтажная земля**. (Город, архитектура, природа).

Н. М. Пожарицкая, биолог. **Тайны живой оболочки** (Основы учения о биосфере).

Б. Ц. Урланис, доктор экономических наук, **Л. В. Бобров**. **Живут люди на земле** (Демографический взрыв).

В свободную продажу — на прилавки магазинов — книги серии будут поступать в ограниченном количестве. Советуем своевременно оформить подписку, чтобы каждый месяц иметь их в своем почтовом ящике.

Факультет «**ЧЕЛОВЕК И ПРИРОДА**» в каталоге «Союзпечати» расположен в разделе «Научно-популярные журналы» под рубрикой «Брошюры издательства «Знание».

Индекс серии 70109. Подписная цена на год 1 р. 80 к.

СУДО Михаил Масаович

**ОСНОВНЫЕ КОНЦЕПЦИИ СТРОЕНИЯ
И РАЗВИТИЯ ЗЕМЛИ**

Редактор Н. И. Феоктистова
Худож. редактор Т. И. Добровольнова
Техн. редактор Е. Б. Дацковская
Корректор О. Ю. Мигун

А. 06830. Индекс заказа 46731. Сдано в набор 11/III 1974 г. Подписано к печати 14/V 1974 г. Формат бумаги $84 \times 108^{1/32}$. Бумага типографская № 3. Бум. л. 1,5. Печ. л. 3. Усл.-печ. л. 5,04. Уч.-изд. л. 4,82. Тираж 20 000 экз. Издательство «Знание». 101835, Москва, Центр, проезд Серова, д. 3/4. Заказ 497. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.
Цена 15 коп.

15 коп.

