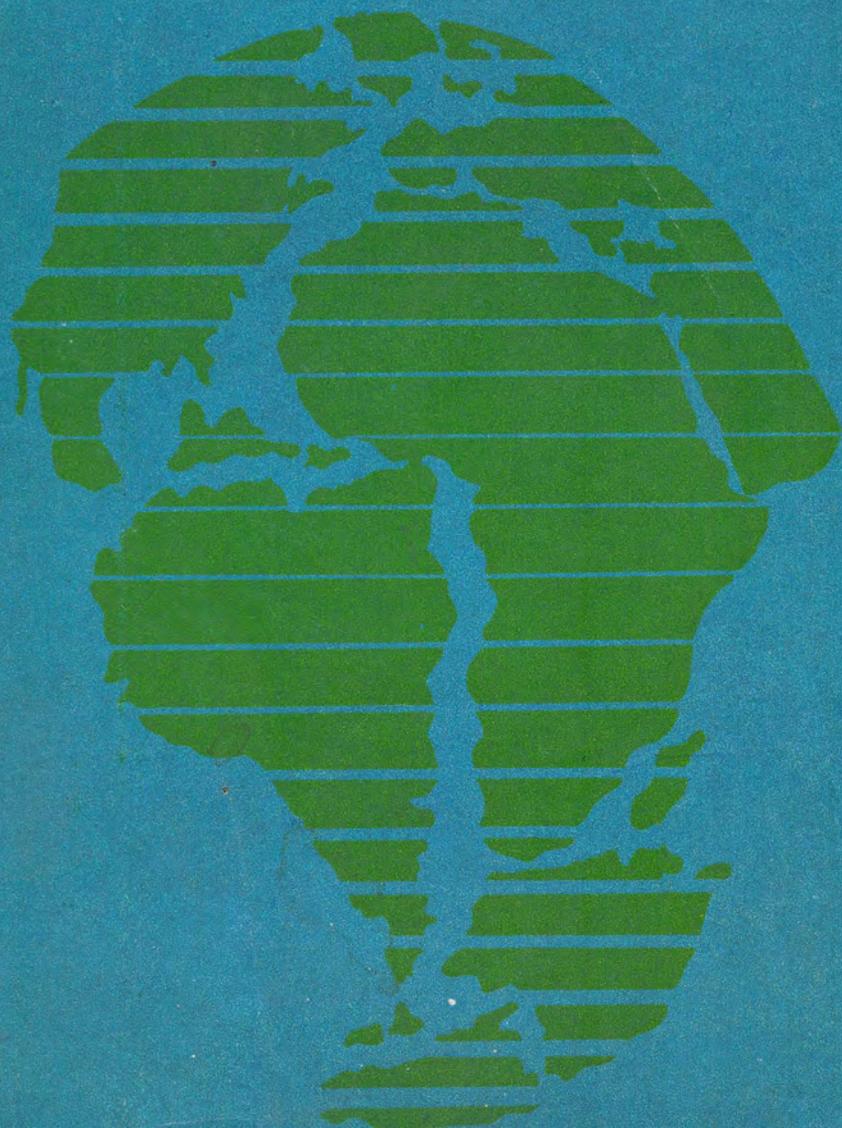


ДВИЖУЩИЕСЯ МАТЕРИКИ

Д.Тарлинг

М.Тарлинг



CONTINENTAL DRIFT

A Study of the Earth's Moving Surface

D. H. Tarling, Ph. D.

and

M. P. Tarling

London

G. Bell and Sons Ltd.

1971

Д. Тарлинг

М. Тарлинг

ДВИЖУЩИЕСЯ МАТЕРИКИ

Перевод с английского

Ю. Н. Авсюка

Под редакцией

Е. Н. Люстиха

С предисловием

П. Н. Кропоткина

Издательство „Мир“

Москва 1973

Эта книга написана для всех, кого интересует планета Земля. Для научного работника — это введение и обзор темы, для широкого читателя без специальной подготовки — это доступная пониманию картина. Мы старались вести изложение, не упрощая научные факты и доказательства, но в достаточно популярной форме, избегая терминологии, требующей постоянного обращения к справочникам. В историческом обзоре мы упомянули имена лишь тех ученых, кто, на наш взгляд, внес наиболее существенный вклад в развитие гипотезы дрейфа материков; из десятков и сотен различных фактов и доказательств мы смогли использовать в книге лишь отдельные примеры. Именно эта многогранность объясняет живой и неослабный интерес к изучению дрейфа материков.

Мы надеемся, что читатель этой книги невольно заинтересуется новейшими открытиями о планете, которую мы населяем.

*Из предисловия
Д. Тарлинга и М. Тарлинга*

© Издательство «Мир» 1973 г.

*Редакция космических исследований,
астрономии и геофизики*

Д. Тарлинг, М. Тарлинг
ДВИЖУЩИЕСЯ МАТЕРИКИ

Редактор Л. В. Самсоненко

Художник А. Б. Шкловская. Художественный редактор В. И. Шаповалов.
Технический редактор Т. А. Максимова. Корректор О. Ф. Иванова

Сдано в набор 28/XI 1972 г. Подписано к печати 24/IV 1973 г. Бумага тип. № 2. 60×90^{1/16} = 3,25 бум. л. 6,50 печ. л. Уч.-изд. л. 6,49. Изд. № 27/6751. Цена 32 коп. Зак. 444.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР», Москва, 1-й Рижский пер., 2

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградская типография № 2
им. Евгении Соколовой «Союзполиграфпрома» при Государственном комитете Совета
Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
г. Ленинград, Л-52, Измайловский проспект, 29

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ПЕРЕВОДУ	6
ГЛАВА 1. НАЧАЛО: РОЖДЕНИЕ ГИПОТЕЗЫ	11
ГЛАВА 2. КАРТА МИРА — РАЗРЕЗНАЯ КАРТИНКА-ЗАГАДКА	19
ГЛАВА 3. РИСУНОК НА КАРТИНКЕ-ГОЛОВОЛОМКЕ	28
ГЛАВА 4. ДРЕВНЯЯ ЖИЗНЬ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА	37
ГЛАВА 5. ДРЕВНИЕ КЛИМАТЫ	42
ГЛАВА 6. НАМАГНИЧЕННОСТЬ ДРЕВНИХ ПОРОД	47
ГЛАВА 7. ДНО ОКЕАНА	56
ГЛАВА 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ДРЕЙФА	68
ГЛАВА 9. ПРИЧИНЫ ДРЕЙФА	77
ГЛАВА 10. ЗНАЧЕНИЕ ГИПОТЕЗЫ ДРЕЙФА МАТЕРИКОВ	89

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ПЕРЕВОДУ

Книга, написанная английским геофизиком Д. Г. Тарлингом (геофизический факультет университета в г. Ньюкасле) и М. Тарлинг, рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся новейшими проблемами науки. Она посвящена одному из главных вопросов, волнующих сейчас не только геологов, геофизиков и географов, но и каждого, кто хочет понять историю нашей планеты, ее развитие и формирование ее современной структуры. Это проблема подвижности материков, их «дрейфа» и «растекания» дна океанов.

На смену статичному, упрощенному представлению о неизменном, «фиксированном» взаимном расположении континентов и океанов, якобы сохранявшемся на протяжении всей истории Земли в течение миллиардов лет, приходит новая, более диалектическая концепция. «Все течет, все изменяется» — изменяется постепенно и лик Земли. Вырастают новые величественные горные хребты, равные Гималаям или Кавказу, и затем превращаются в прах, в частицы песка и глины. Снесенный реками со склонов гор, этот обломочный материал оседает на дне соседних морей, образуя комплексы осадочных отложений суммарной толщиной до 10—20 км. Изменяются контуры береговых линий, моря то наступают на сушу, то уходят с нее, и даже огромные материковые глыбы, углубленные в тяжелую мантию Земли на 30—60 км, не остаются на месте, но медленно и плавно плывут в различных направлениях, подобно гигантским плотам...

Однако все эти изменения происходят очень медленно — горы обычно растут не больше чем на десятую долю миллиметра в год, а материки перемещаются со скоростью порядка 1 см в год. И все же, если движение происходит с такой средней скоростью, этого будет достаточно, чтобы произошло перемещение на 1000 км за 100 млн. лет — не очень продолжительный срок с точки зрения геолога: он составляет только 2% времени существования Земли.

Чтобы нагляднее представить себе величавую и неуклонную поступь долгой геологической истории Земли, вообразим, что мы сидим в кино и смотрим фильм, в котором за каждую секунду будет показано то, что произошло на Земле за миллион лет. Демонстрация такого фильма займет 1 час 20 минут! За первые несколько минут, которые соответствуют 100—200 млн. лет, Земля сформируется перед нами из «протопла-

неты» — сгустка космической пыли, газа и более крупных твердых частиц. После этой догеологической истории потянется в течение целых 40 минут (2400 млн. лет) долгая архейская, древнейшая эра. За это время перед нами возникнут океаны и образуется примерно на 80—90% земная кора материковых массивов. Атмосфера, сначала не похожая по составу на современную, постепенно — благодаря жизнедеятельности водорослей и бактерий — будет изменять свой состав и обогатится кислородом, без которого невозможно существование животного мира.

Жизнь в своих самых примитивных формах появится перед нашими глазами уже в первые полчаса просмотра фильма, но вплоть до конца архея будет иметь довольно жалкий вид (водоросли, бактерии, простейшие). В следующую, протерозойскую эру, в особенности во вторую ее половину («рифей»), которая охватывает 1000 млн. лет, растительность начинает завоевывать сушу, бывшую голой пустыней, но заселяет пока еще только прибрежные пространства. В это же время появляются почти все типы многоклеточных животных, — за исключением позвоночных, — губки, кишечнополостные, черви, моллюски, членистоногие и иглокожие.

Быстрый расцвет фауны, связанный с тем, что у животных выработался прочный скелет или твердая внешняя оболочка (раковина, панцирь), происходит в течение последних 600 млн. лет. Это время (фанерозой), в конце которого мы живем, подразделяется на три эры — палеозойскую (370 млн. лет), мезозойскую (163 млн. лет) и кайнозойскую (67 млн. лет). История фанерозоя промелькнет в нашем фильме за 10 минут. Она хорошо изучена геологами благодаря точной датировке, основанной на определении остатков животных и растений. Палеонтологический метод остается основным и наиболее точным при определении возраста горных пород.

Именно это время и рассматривается в книге Тарлингов. Читатель увидит в ней реконструкции крупнейшего древнего южного материка — Гондваны, сформировавшегося к концу протерозоя — началу палеозоя и просуществовавшего до конца палеозойской эры, а также контуры другого материка — Лавразии, который возник из северных глыб в середине палеозоя. На палеогеографических схемах будет показано расположение этих материков в конце палеозоя и их последующий распад и расползание обломков, на которые они раскололись. Из отколотых частей Гондваны образовались материковые плиты (платформы) Южной Америки, Африки, Индостана, Австралии и Антарктиды. Лавразия распалась на две части — Европу, которая вместе с северной половиной Азии образует главный блок, и Северную Америку (с Гренландией), отплывающую на запад.

В течение мезозоя и кайнозоя перемещения материков, при которых возникли или расширились Атлантический, Индийский и Северный Ледовитый океаны, должны были компенсироваться сокращением площади других океанов. И действительно, за это время произошло сокращение площади Тихого океана, на который со всех сторон надвигаются материки и дуги островов — Японских, Курильских, Новой Зеландии и др., а также почти полностью исчез широкий океан Тетис. Этот океан частью был перекрыт надвинутыми на него материковыми глыбами Индостана с северной половины Евразии, частью превратился в складчатые горные хребты Альпийско-Гималайского пояса, которые состоят из смятых слоев отложений, осаждавшихся на дне Тетиса. Остатки океана Тетис сохранились только в виде Средиземного и Черного морей и внутренних морей Индонезии.

Насколько медленно протекали эти геологические события, видно из сравнения с историей самых последних эпох. Конец кайнозойской эры — четвертичный период, который охватывает последние 2 млн. лет — время великих оледенений и появления и развития человека, — займет в нашем фильме только две секунды, а вся история цивилизации за 5000 лет промелькнет на экране за $\frac{1}{200}$ долю секунды.

Именно этой необозримой длительностью геологических процессов, в которых год за годом суммируются ничтожные, незаметные эффекты глубинной жизни Земли, объясняются те парадоксальные на первый взгляд перемены в палеогеографии земной поверхности, которые описывает теория дрейфа материков.

В первоначальном виде, как она была сформулирована А. Вегенером в 1915—1925 гг., эта теория предполагала только дрейф материковых глыб по подкоровым слоям и по коре океанов. Сейчас, как это хорошо показано в книге Тарлингов, теория больших горизонтальных перемещений глыб земной коры — так называемая «тектоника плит» (plate tectonics), или «глобальная тектоника», — понимается иначе, а именно как представление о перемещении огромных плит, включающих не только материки, но и прилегающие к ним обширные площади коры океанов. В одних зонах, где формируются складки, надвиги и происходят наиболее сильные землетрясения, эти плиты надвигаются друг на друга, как торосы при сжатии ледяного покрова в Ледовитом океане. В других поясах, на осевых линиях срединных океанических хребтов, плиты разрываются, расходятся и в промежутке между ними формируется новая океаническая кора.

Книга «Движущиеся материки» представляет собой популярное, доступное широкому кругу читателей и увлекательно

написанное изложение тех фактов, идей и методов, которые привели сейчас большинство зарубежных ученых, работающих в области геофизики, геологии, океанологии, палеоклиматологии и палеоботаники, к признанию концепции «мобилизма», т. е. крупных горизонтальных перемещений глыб земной коры. Этот поворот научной мысли отчетливо проявился в работе XV Ассамблеи Международного союза геофизики и геодезии, происходившей в Москве в 1971 г., Международного геологического конгресса (Канада, 1972 г.) и других представительных научных симпозиумов, происходивших за последние годы.

К недостаткам книги следует отнести то, что авторы почти не коснулись трудностей, стоящих перед теорией мобилизма. Правда, в 10-й главе они отмечают мимоходом, что «хотя факт дрейфа континентов теперь установлен, еще имеются некоторые явления, которые пока не получили объяснения». Но никакого конкретного указания, что это за явления, не дается, и все выглядит в их изложении слишком гладко, когда идет речь о механизме горизонтальных перемещений. В действительности механизм больших горизонтальных перемещений совершенно неясен. Тепловая конвекция, если она происходит в твердом веществе мантии Земли, в принципе подобна перемешиванию жидкости в кастрюле, которую нагревают. Такая конвекция требует высокой однородности материала мантии Земли как по составу (сверху вниз), так и по коэффициенту вязкости — величине, которая тем больше, чем меньше пластичность и текучесть среды. Достаточно небольшой разницы в химическом составе с накоплением более тяжелых атомов (Fe, Ca, Mg) в нижних слоях и более крупных по размеру, а следовательно, более легких атомов O, Na, K — в верхних слоях мантии, чтобы тепловая конвекция была уже невозможна. Хотя тепловое расширение и в этом случае будет уменьшать плотность нижних слоев, этого окажется недостаточно, чтобы сделать их менее плотными по сравнению с веществом верхних слоев. Следовательно, материал нижних слоев не будет всплывать вверх.

Вязкость вещества в верхних слоях Земли велика (10^{23} — 10^{25} пуаз). Она падает примерно в 1000 раз (до 10^{20} — 10^{22} пуаз) на глубине 80—250 км в пластичном слое «астеносферы», где материал нагрет почти до температуры плавления, а затем снова растет с глубиной и увеличивается, вероятно, в 100 раз на глубине 400—700 км в связи с подъемом температуры плавления и возрастанием твердости пород под действием давления. Поэтому астеносфера должна была бы играть роль «смазки». Конвективные движения, если они происходят в мантии ниже астеносферы, не должны передаваться на земную кору.

Возможно, причины горизонтальных движений лежат в попеременном сокращении и увеличении радиуса Земли, о кото-

ром говорили авторы пульсационной геотектонической гипотезы — советские академики В. А. Обручев и М. А. Усов и американский геолог В. Бэчер. В истории Земли наблюдаются ритмы — чередование эпох складчатости и периодов относительного покоя, — которые делают эту гипотезу правдоподобной. В фазы сжатия Земли, согласно пульсационной гипотезе, происходит смятие слоев, утолщение коры и сокращение поверхности складчатых зон, а в фазы растяжения — разрыв и утонение коры с образованием сбросов и тектонических рвов (грабенов), к которым относятся, например, впадины Байкала и Красного моря. Если эффекты сжатия и растяжения распределяются неравномерно на поверхности Земли, то элементарным геометрическим следствием многократного попеременного сжатия и растяжения должен быть дрейф промежуточных глыб 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.

Для лиц, желающих более подробно ознакомиться с проблемой дрейфа материков, можно рекомендовать следующие статьи и книги:

1. П. Н. Кропоткин, Плавают ли материки? Современное состояние теории мобилизма, «Природа», № 11, 1962.
2. П. Н. Кропоткин, Эволюция Земли (Происхождение, строение и геологическая история Земли), изд-во «Знание», М., 1964.
3. Г. Н. Петрова, А. Н. Храмов, Палеомагнетизм и дрейф континентов, «Земля и Вселенная», № 3, 1969.
4. С. В. Мейен, Из истории растительных династий, изд-во «Наука», М., 1971.
5. Проблема палеоклиматологии, под ред. Нейрна, пер. с англ., изд-во «Мир», 1968.
6. Х. Такеучи, С. Уеда, Х. Канамори, Двигаются ли материки? Пер. с англ., изд-во «Мир», М., 1970.
7. Б. Гутенберг, Физика земных недр, пер. с англ., ИЛ, М., 1963.
8. Дрейф континентов, под ред. С. Ранкорна, пер. с англ., изд-во «Мир», 1966.
9. Ф. Стейси, Физика Земли, пер. с англ., изд-во «Мир», М., 1972.
10. Глобальная тектоника (статьи В. Е. Хаина, В. В. Белоусова, П. Н. Кропоткина), изд-во «Наука», М., 1972 (в печати).
11. Л. Кузнецова, Куда плывут материки? Географгиз, М., 1962 (биография А. Вегенера).

Чтение литературы, указанной под № 6—9, требует некоторой физико-математической подготовки.

П. Н. Кропоткин

ГЛАВА I

НАЧАЛО: РОЖДЕНИЕ ГИПОТЕЗЫ

Совмещались ли когда-то материки друг с другом, подобно фрагментам картинки, разрезанной ножницами? Ответ на эту загадку вызывает в современной геологии подлинную революцию и сравним с влиянием знаменитой книги Дарвина на биологию прошлого столетия. Рост наших знаний по геологии поверхности Земли в сочетании с последними достижениями в исследовании ее внутреннего строения позволяет сказать следующее: некогда материки примыкали друг к другу, но впоследствии разошлись; непосредственное участие в этом движении принимает твердое дно океанов.

Идея дрейфа материков в действительности очень стара, и на внешнее сходство очертаний западного побережья Африки и восточного побережья Южной Америки обращали внимание уже исследователи эпохи Великих географических открытий. В «Новом Органоне», опубликованном в 1620 г., Фрэнсис Бэкон отметил, что это сходство вряд ли случайно, но не предложил какого-либо объяснения. Вскоре после этого Пласе (1658) в одной из своих работ высказал предположение, что Старый и Новый Свет разделились после всемирного потопа. Такая точка зрения была общепринятой в течение XVII—XVIII вв. В 1800 г. Александр Гумбольдт, один из первых исследователей Мексики и США, поддержал идею о том, что Ноев ковчег плывал по Атлантическому океану, который в ту пору был чем-то вроде русла огромной реки.

Первые наблюдения геологического сходства материков по обе стороны Атлантики были сделаны Снидером-Пеллигрини в 1858 г. Он отметил и обосновал сходство материков, омываемых Атлантическим океаном, по идентичности ископаемых растений в месторождениях угля в Европе и в Северной Америке. Снидер дал первую схему расположения материков до и после разделения их Атлантикой (рис. 1). Довольно много плодотворных идей возникало в XIX в. в самых разнообразных областях науки, так или иначе связанных с гипотезой дрейфа материков. Дарвин во время своего знаменитого путешествия обнаружил убедительные признаки вертикальных движений больших массивов суши, но не нашел свидетельств значительных горизонтальных перемещений. Один из его сыновей, Джордж Дарвин, в сотрудничестве с Фишером предположил, что Луна была выброшена из области Тихого океана благодаря вращению Земли или вырвана

гравитационным притяжением проходящей звезды*. Фишер развил эту идею следующим образом: материка, разорванные при отделении Луны, впоследствии должны были перестроиться в соответствии с новой формой Земли. Идея связи дрейфа материков с происхождением Луны оказала влияние на многие более поздние гипотезы.

В начале XX в. два американца, Тейлор и Бейкер, независимо друг от друга и почти одновременно развили идею дрейфа материков. Тейлор в 1908 г. привлек это явление для объяснения происхождения современных гор (рис. 2), в то время как Бейкер

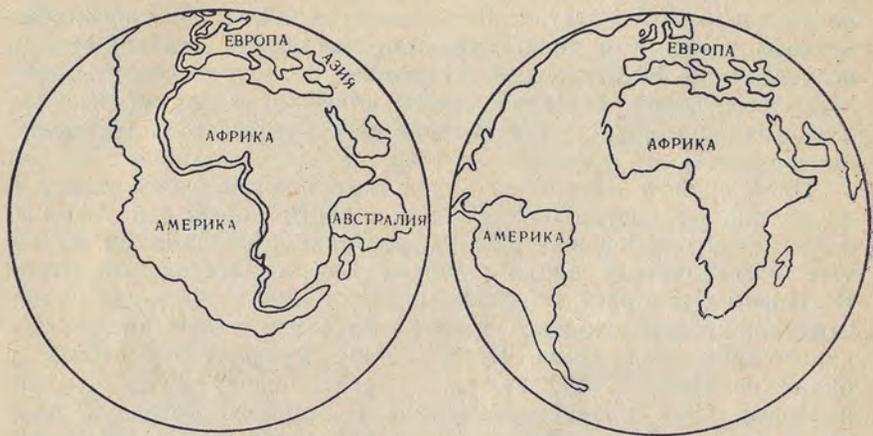


Рис. 1. Схема реконструкции суши Свидером (1858 г.). Это была первая схема соответствия материков друг другу, предложенная для объяснения сходства ископаемых остатков (возраста 300 млн. лет) в месторождениях каменного угля в Европе и Северной Америке.

в серии статей, опубликованных в 1911—1928 гг., основывал свою точку зрения на движение материков соответствием современных гор на противоположных берегах Атлантического океана. Однако в последующем Бейкер привлек и другие критерии (рис. 3).

Следует отметить, что Тейлору принадлежит разработанная и четкая формулировка аргументов в пользу существования значительных перемещений материков. Тем не менее большинство ученых считают подлинным создателем современной теории

* Согласно гипотезе Дж. Дарвина, развитой затем Г. Джеффрисом, масса, образовавшая Луну, отделилась от Земли в результате приливного воздействия Солнца, когда период собственных колебаний Земли попал в резонанс с периодом ее вращения. Исследования А. М. Ляпунова, а также дальнейшие более точные расчеты Джеффриса доказали неверность этой идеи. — *Прим. ред.*

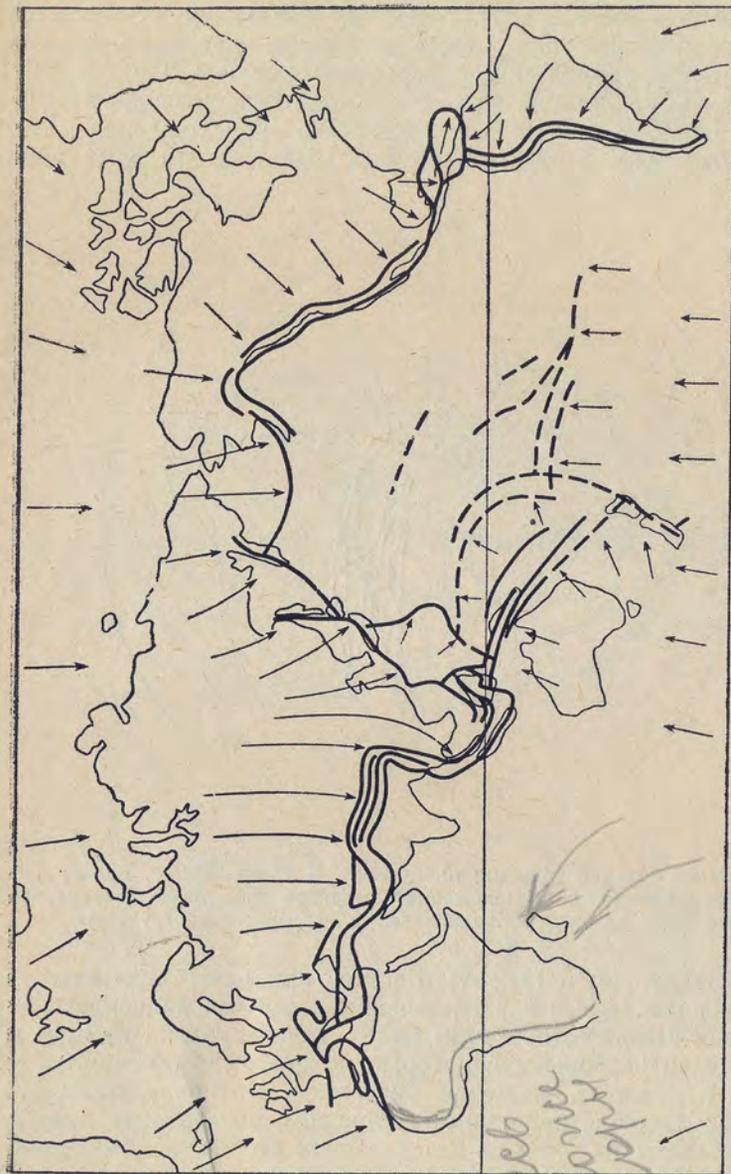


Рис. 2. Направления смещения материков согласно Тейлору. В 1908 г. Тейлор предположил, что материка двигались в направлениях, указанных стрелками. Этим он объяснял образование складчатых гор (сплошные линии) и островных дуг (пунктир).

дрейфа материков немецкого астронома, геофизика и метеоролога Альфреда Вегенера (рис. 4). Он обратился к этой идее первоначально для того, чтобы объяснить древние климаты (гл. 5). Почему тропические папоротники росли в Лондоне, Париже и даже Гренландии, хотя в то же самое время льды покрывали Бразилию и Конго? В своей книге «Происхождение материков и океанов», опубликованной в 1915 г. (хотя сама идея



Рис. 3. Земной шар в прошлом по Бейкеру. В 1911—1928 гг. Бейкер разработал схему взаимного расположения материков так, чтобы современные горные цепи на суше объединялись в непрерывные структуры.

была высказана им в 1912 г.), Вегенер приводит свидетельства из целого ряда наук, не ограничиваясь данными палеоклиматологии. К сожалению, при этом он привел несколько примеров, которые были неверны или которые можно было объяснить, не прибегая к гипотезе движения материков. На почве огромного количества доводов, собранных Вегенером, разгорелись дискуссии, особенно жаркие в 20-х годах нашего столетия.

Основной спор сосредоточился вокруг английского перевода 1924 г. немецкого издания книги Вегенера 1922 г., хотя это было не последнее прижизненное издание. (До гибели Вегенера в Гренландии в 1930 г. вышло еще одно издание его книги.)

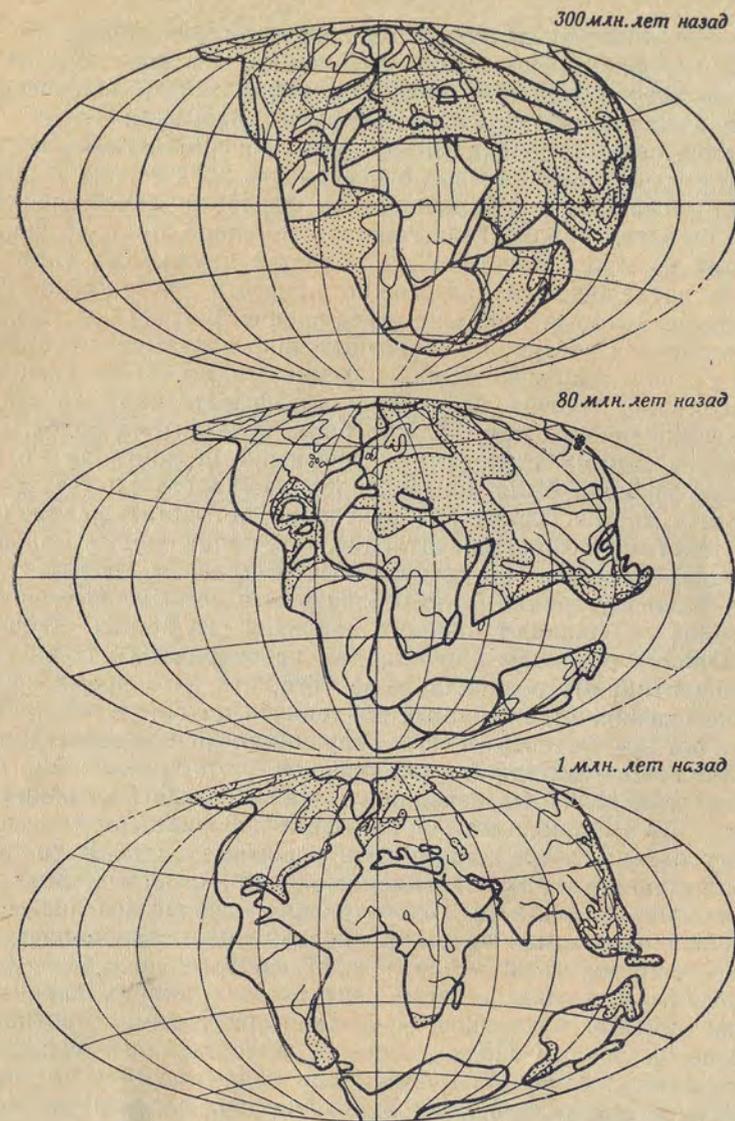


Рис. 4. Представление Вегенера об эволюции материков. Эта схема реконструкции основывалась на фактах из многих областей науки; она удивительно сходна с нашими современными представлениями об эволюции южных материков (рис. 34). Заштрихованные области указывают, в каких местах материки были покрыты мелкими морями.

Многие из оппонентов просто высказывали свое полное и абсолютное неверие, нисколько не пытаясь его обосновать, но большинство возражений шло по двум направлениям. Так, специалисты в какой-нибудь области науки указывали на ошибки в деталях своего раздела знаний, который привлекался Вегенером, и отсюда делали вывод о неверности всей теории в целом. Другие соглашались с большинством фактов по своей специальности, но затем опровергали гипотезу Вегенера, приводя доказательства из мало известных им областей науки. Как типичный пример последнего случая можно привести рассуждения биогеографов, которые приняли утверждение Вегенера о том, что жизнь древних растений и животных явно доказывает существование сухопутной связи между материками, но тут же заявляли, что поскольку геологи не верят в дрейф материков, то эти соединяющие мосты суши, должно быть, исчезли под водой. В то же время самими геологами и геофизиками почти за сто лет до этого времени была доказана невозможность существования подобных мостов. Такой разбор теории по частям различными специалистами создал впечатление, что подавляющее большинство доказательств, представленных Вегенером, попросту неверно. Поэтому трудно было осознать, что несомненные ошибки в деталях не снижают важного значения его общих утверждений. Однако основная причина для недоверия или по крайней мере скептицизма возникла из-за того, что в то время не был известен механизм, способный раздвинуть материки так, как это предполагали Вегенер и его сторонники и предшественники. В конце концов материки и дно океанов — это чрезвычайно твердые породы. И, чтобы передвинуть даже самый маленький материк — Австралию, с массой примерно 500 млн. млн. кг, — по дну океана, нужно приложить огромные силы. В то время наиболее приемлемым механизмом казались последствия отделения Луны от области Тихого океана. Сейчас мы знаем, что Луна возникла иным путем, поскольку она образовалась в то же самое время, что и Земля, т. е. 4,5 млрд. лет назад.

Оглядываясь назад, легко считать этих ранних оппонентов теории дрейфа материков ультраконсерваторами, противящимися всему новому. Но даже сейчас имеется много фактов, которые нельзя объяснить одним лишь перемещением материков. Поэтому не удивительно, что в течение двух десятилетий между первой и второй мировыми войнами научная общественность в основном сторонилась этой идеи. Тем не менее гипотеза имела именитых сторонников. В частности, первые специальные исследования как в Африке, так и в Бразилии были предприняты видным южноафриканским геологом Дю Тойтом. Эта работа, продолженная Мартином, является одним из лучших геологических доказательств в пользу теории дрейфа материков. Другим из-

вестным сторонником гипотезы был шотландский геолог Холмс, пионер радиоактивного метода определения возраста пород. Он выдвинул в 1927 г. и развил более широко в 1929 г. гипотезу о конвективных потоках в недрах Земли, создаваемых за счет радиоактивного разогрева. Он предположил, что внутренние области Земли нагреваются от тепла, которое высвобождается при распаде небольших количеств радиоактивных элементов, содержащихся во всех породах. В результате разогретые породы начнут всплывать, а вблизи поверхности Земли они станут растекаться в горизонтальном направлении, постепенно охлаждаться и погружаться обратно вглубь в виде остывшего более тяжелого материала. Холмс предполагал, что эти перемещения вещества внутри Земли могут вызвать и движение материков; при этом материки как бы передвигаются по поверхности Земли подобно гигантским айсбергам. Такого же рода движение рассматривал известный голландский геофизик Венинг-Мейнес при объяснении результатов геофизических наблюдений в Ост-Индии и Вест-Индии. Наши современные взгляды на конвективные потоки отличаются от этих первых идей рядом существенных деталей, но представление об основной движущей силе остается по существу тем же самым (см. гл. 9).

Таким образом, к 40-м годам нашего столетия уже существовала гипотеза о возможном механизме, способном вызвать дрейф материков. И по мере того как накапливались геологические данные, все большее и большее число ученых убеждалось в реальности дрейфа. Это особенно характерно для геологов южного полушария. Одними из самых восторженных сторонников гипотезы дрейфа материков были Кинг (ЮАР) и Кэри (Австралия), получившие много новых существенных доказательств. Еще более широкое распространение гипотезы дрейфа произошло в 50-х годах. Этот перелом был вызван быстрым развитием палеомагнитных исследований, последовавшим после создания Блэкеттом новых чрезвычайно чувствительных приборов, способных измерять очень слабый остаточный магнетизм. Используя эти приборы, английский геофизик Ранкорн пришел к выводу, что измерения палеомагнетизма пород Европы и Северной Америки могут быть согласованы лишь при условии принятия гипотезы движения материков (гл. 6). Проведение палеомагнитных исследований на других материках, в основном под руководством Криера в Южной Америке и Ирвинга в Австралии, придало гипотезе движения материков еще большую убедительность. Применение Вайном в 60-х годах палеомагнитных исследований к породам дна океана послужило наиболее веским доводом, склонившим мнение научной общественности в пользу гипотезы дрейфа материков (гл. 7).

Факт дрейфа материков имеет не просто чисто академический интерес: у него появилась и экономическая сторона, а именно перспектива использования минерального сырья. Обнаружение ценных месторождений на одном материке может привести к предположению, что, возможно, они встречаются также и на другом материке за несколько тысяч километров. В качестве примера можно привести существование месторождений алмазов как в Западной Африке, так и в северо-восточной части Южной Америки. Это касается и нефтяников, ищущих геологические структуры, содержащие нефть. Экономически выгодные месторождения нефти и газа могут быть обнаружены лишь в структурах, некогда находившихся в тех широтах, где было возможно образование нефти в достаточно больших количествах. Залежи нефти и природного газа в Европе и Северной Африке существуют лишь потому, что эта часть земного шара когда-то лежала гораздо ближе к экватору.

Возможно, еще более важно то, что гипотеза дрейфа материков помогает понимать процесс развития дна океанов. Поскольку запасы минерального сырья на материках быстро уменьшаются (по оценке на сегодняшний день, имеющиеся во всем мире запасы меди будут исчерпаны в течение ближайших 20 лет), становится все более необходимым использовать минеральные ресурсы океанического дна. Сделать это экономически выгодным можно, лишь зная его геологическую историю. Нынешний век техники требует полного и цельного представления о всех минеральных ресурсах нашей планеты; в то же время две трети поверхности земного шара скрыты под водой. Поэтому только тогда мы правильно оценим наши ресурсы, когда будем знать историю развития всей поверхности Земли*.

В более далеком будущем правильное представление о движении материков и развитии дна океанов приведет к пониманию механизмов горообразования, вулканизма и землетрясений. Такие знания необходимы, чтобы человек был в состоянии предсказывать природные катастрофы и разрабатывать возможные методы управления такими огромными силами. Быть может, в гипотезе дрейфа материков наиболее важно то, что формируется совершенно новый научный взгляд на эволюцию поверхности нашей планеты, а это ведет к лучшему пониманию происхождения Земли.

* Авторы сильно преувеличивают убедительность доводов в пользу того варианта гипотезы дрейфа материков, который они излагают в этой книге. (Сторонники этого варианта называют его «новой глобальной тектоникой», или «тектоникой плит».) В действительности это одна из возможных гипотез, которая должна рассматриваться наряду с другими гипотезами. Предлагать на ее основе дорогостоящие практические мероприятия было бы неосмотрительно. — *Прим. ред.*

ГЛАВА 2

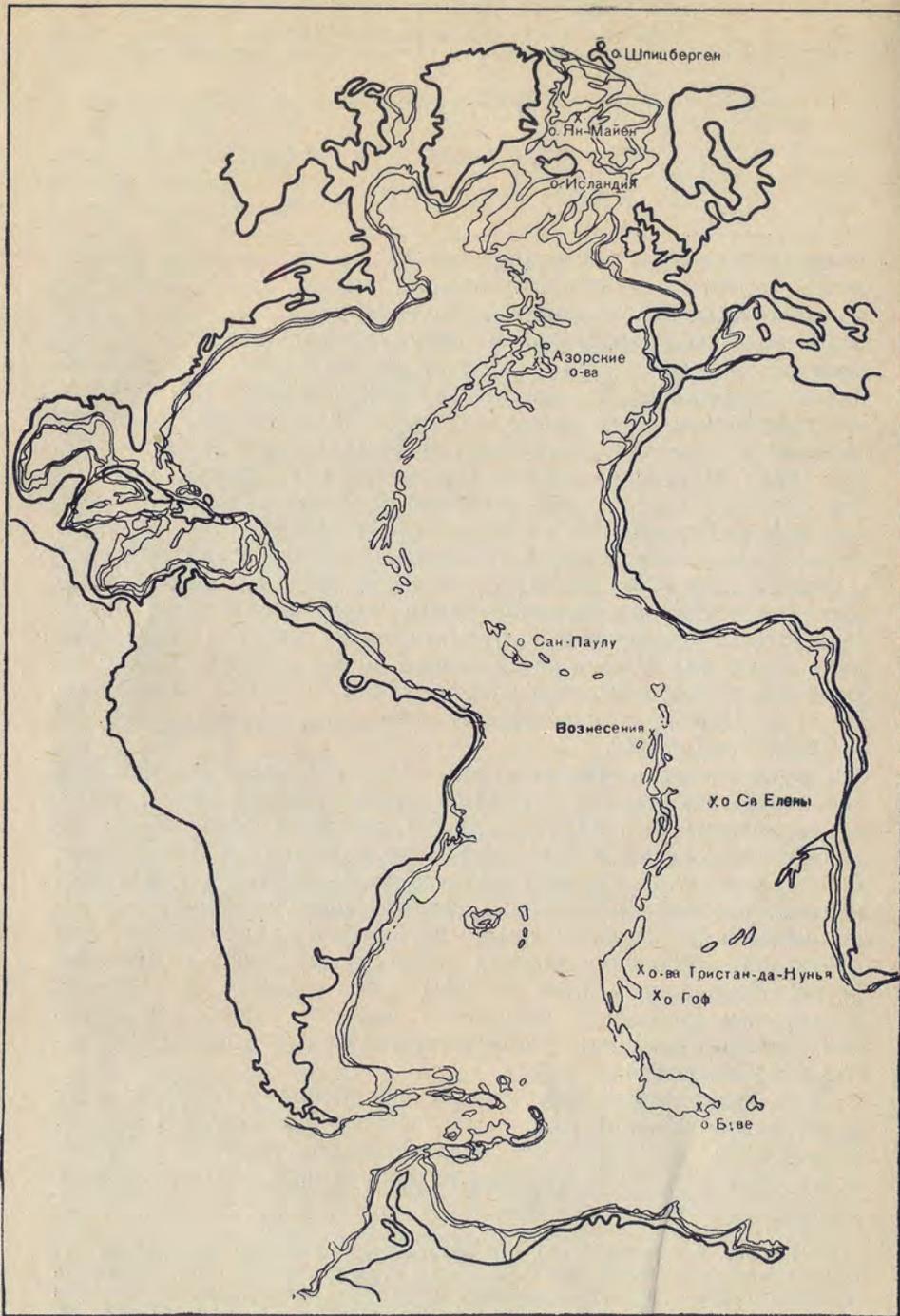
КАРТА МИРА — РАЗРЕЗНАЯ
КАРТИНКА-ЗАГАДКА

Если все материки представляли когда-то часть единого огромного массива суши или двух сверхматериков, то мы наверняка должны были бы подметить, как складываются они в одно целое подобно разрезанной на части цветной картинке в детской головоломке. К сожалению, в нашем случае кусочки совпадают неидеально. В одних местах слишком много прямолинейных границ, кое-какие малые части исчезли, а кое-где добавились лишние. Кроме того, мы должны помнить, что действительные края материков нередко лежат ниже уровня моря и что речные наносы могли заметно изменить очертания краев материков. Однако взгляд на карту Атлантики (рис. 5) показывает, что «нос» Южной Америки приблизительно подходит к очертаниям западноафриканского побережья и что береговые линии обоих материков почти параллельны друг другу. Можно себе представить, что Патагония — хвост Южной Америки — как бы закругляется вокруг мыса Доброй Надежды. В то же время некоторые ученые, глядя на такую карту, приходят к выводу о несоответствии материков друг другу по крайней мере на 20°.

Трудность заключается в том, что исследовать соответствие таких больших частей трехмерного тела — Земли — на плоской карте невозможно. Карта в любой проекции обязательно содержит искажения или формы, или площади. К сожалению, большинство глобусов до недавнего времени также не удовлетворяли требованиям подобных исследований, поскольку они изготовлялись в основном путем натяжения на картонный шар достаточно больших плоских треугольных секций обычных карт*. Хотя современные глобусы часто сделаны из пластика и матрицы тщательно вычерчены, все же нужно соблюдать большую осторожность, чтобы быть уверенным в отсутствии каких-либо искажений.

Как будет видно, эту техническую проблему подгонки друг к другу изображений отдельных участков суши можно решить различными способами. Но сначала следует ответить на основной вопрос: что такое границы материков, или, иными словами,

* На рис. 8 хорошо видно, что при самом тщательном совмещении материков неточность совпадения их краев гораздо больше, чем неточность обычного глобуса. Поэтому требование какой-то исключительной точности исходного материала, предъявляемое авторами, лишено смысла. — *Прим. ред.*



где края тех кусочков, соединением которых мы занимаемся? Что такое материк?

Условно краем материка считается береговая линия на уровне моря, однако такая граница совершенно не годится для наших целей, поскольку она просто отмечает уровень поверхности воды в Мировом океане в данное время. В течение последнего миллиона лет истории Земли количество воды, накопленное в виде льда в Арктике и Антарктике, убывало и прибывало, изменяя количество воды в океанах и тем самым сдвигая положение береговых линий на несколько сотен километров, существенно меняя их очертания. Видимо, для того чтобы обнаружить истинную форму материков Земли, мы должны заглянуть глубже под воду.

Рельеф океанического дна первыми начали исследовать моряки, спускавшие со своих кораблей лоты на лот-линях; по длине вытравленного линя судили о глубине. Это была чрезвычайно медленная операция, особенно на больших глубинах. Тем не менее к концу прошлого века именно этим способом были выяснены основные черты океанического дна. Было обнаружено, что морское дно по мере удаления от суши понижается сначала очень медленно, образуя материковый склон; затем этот склон опускается более круто до типичных океанских глубин в 5—6 км (рис. 5 и 6). Современные методы исследования прояснили многие детали ранних наблюдений (некоторые из них будут обсуждаться в гл. 7), но общей картины они по существу не изменили.

Очевидно, что материковый склон является очень важной особенностью поверхности Земли. Геофизические приборы и методы, первоначально разработанные для поисков месторождений минералов или подводных лодок в открытом море, выявили, что породы материкового склона аналогичны породам, слагающим материки, но резко отличаются от пород дна глубоководной части океанов (рис. 6). Один из этих методов — гравиметрическая съемка — показывает, что континентальные породы гораздо легче пород океанического дна и что граница между этими двумя типами пород проходит по материковому склону. Говоря упрощенно, в гравиметрах (рис. 7) непрерывно взвешивается грузик, масса которого постоянна; вариации его веса являются следствием изменения силы притяжения Земли, а

Рис. 5. Батиметрия дна Атлантического океана. Тесное расположение изобат 1000, 2000 и 3000 м иллюстрирует крутизну материковых склонов. Особенно поражает параллелизм материковых склонов на обеих сторонах Центральной и Южной Атлантики; их форма повторяется также срединно-океаническим хребтом, отмеченным изобатой 3000 м.

следовательно, плотности пород, над которыми проводятся измерения. Конструкции морских и наземных гравиметров различны, хотя принцип измерений одинаков. Морские гравиметры устанавливают на специальные гироплатформы для уменьшения влияния движений корабля. Самые первые гравиметрические наблюдения в открытом море были сделаны Венинг-Мейнесом в 1920 г., проводившим наблюдения с маятниковым прибором.

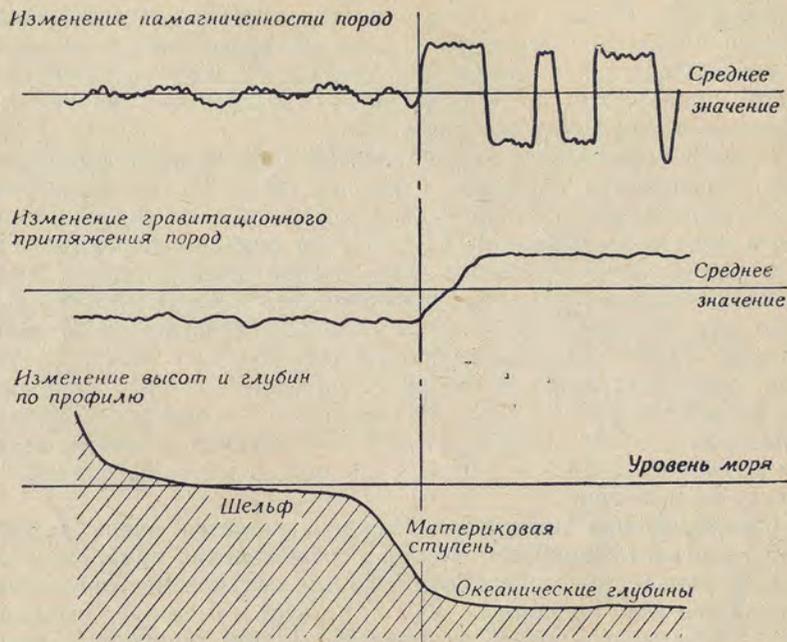


Рис. 6. Изменение глубины дна и физических свойств океанических пород по мере продвижения от материка к океану. Магнитные и гравитационные измерения показывают, что океанические породы имеют большую плотность и сильнее намагничены, чем континентальные породы.

Прибор был установлен на подводной лодке, которая на время наблюдений погружалась, чтобы таким образом избежать качки. Другой прибор, используемый при морской съемке, — это магнитометр, который может непрерывно измерять намагниченность пород дна. Результаты магнитной съемки также показывают, что по мере того, как исследовательское судно, удаляясь от берега, проходит материковый склон, наблюдаются заметные изменения магнитного поля от слабого к более сильному в районе глубоководного океанического дна (рис. 6). Совершенно

очевидно, что именно этот склон отмечает границу между материками и истинными океанами.

К сожалению, геофизические наблюдения все еще очень малочисленны, и пока что не представляется возможным детально вычертить края материков так, чтобы они действительно соответствовали задаче подгонки материков друг другу. Однако можно определить местоположения склона материка с помощью батиметрических карт и проследить, насколько хорошо

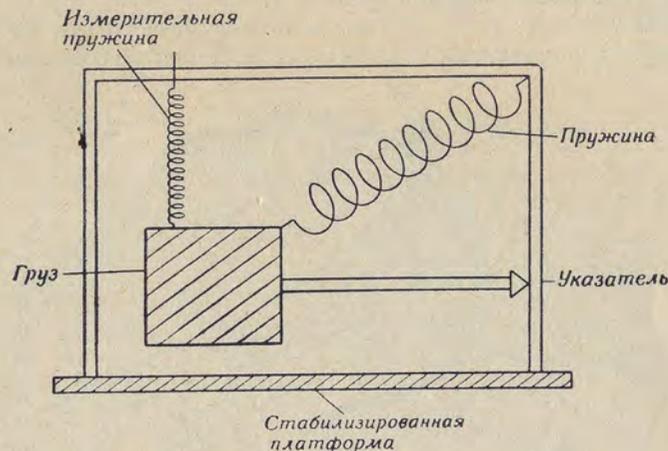


Рис. 7. Гравиметр — прибор, измеряющий гравитационное притяжение расположенных под ним пород, что дает возможность определить их плотность. Масса груза остается постоянной, так что вариации его веса отмечают вариации в силе притяжения. При измерениях на море гравиметр устанавливается на гироплатформе, ускорения от качки корабля регистрируются акселерометрами, по отсчетам которых вычисляются поправки к показаниям гравиметра.

совпадут границы кусочков при этом выборе линий разреза. Это, конечно, лишь компромиссное решение вопроса, связанное к тому же с некоторыми неточностями. Так, например, дельта Нигера образовалась настолько быстро, что форма материкового склона оказалась искаженной, и поэтому батиметрия не отражает истинного положения края материка. Однако подобных районов мало. Кстати, наличие столь небольшого числа областей, которые должны быть исключены при составлении нашей картинка-загадки, — один из самых удивительных моментов во всей нашей проблеме.

Как мы видели в предыдущей главе, многие исследователи иллюстрировали свои соображения о соответствии очертаний материков друг другу очень грубо и схематично. Лишь в 1958 г.

австралийский геолог Кэри попытался определить соответствие континентов, ограничивающих Атлантику, более аккуратно. Он вычертил материки на большом глобусе диаметром 76 см и затем перенес их очертания на плотно облегающую глобус прозрачную пленку. Поскольку пленка могла скользить по глобусу, можно было искать наилучшее совпадение очертаний материков, перемещая их изображения по глобусу. Таким путем он очень изящно продемонстрировал почти полное соответствие Африки и Южной Америки (рис. 8, а).

Предложенная Кэри схема реконструкции была расценена многими исследователями как слишком субъективная, и они

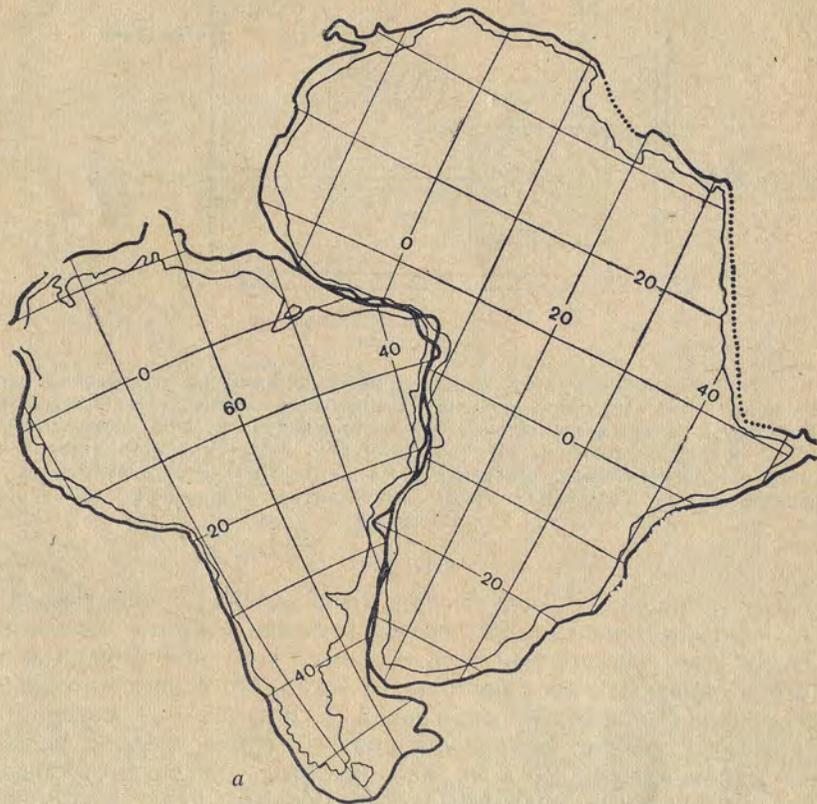


Рис. 8. Сравнение схем соответствия материков, ограничивающих Атлантику, полученных графически и с помощью электронной вычислительной машины. а — в реконструкции Кэри были использованы вычерченные на сферической основе контуры материков, которые можно было передвигать по поверхности глобуса, добиваясь наилучшего соответствия их друг другу. Это соответствие определялось «на глаз», а затем проверялось графически.

потребовали более объективного математического доказательства. В 1965 г. английский геофизик Буллард вместе со своими коллегами выполнил на вычислительной машине расчет наилучшего совпадения очертаний материков, разделенных



б — в реконструкции Булларда использованы расчеты, выполненные на ЭВМ. Вычисление положения материков проводилось при условии, чтобы перекрытия или расхождения были минимальными.

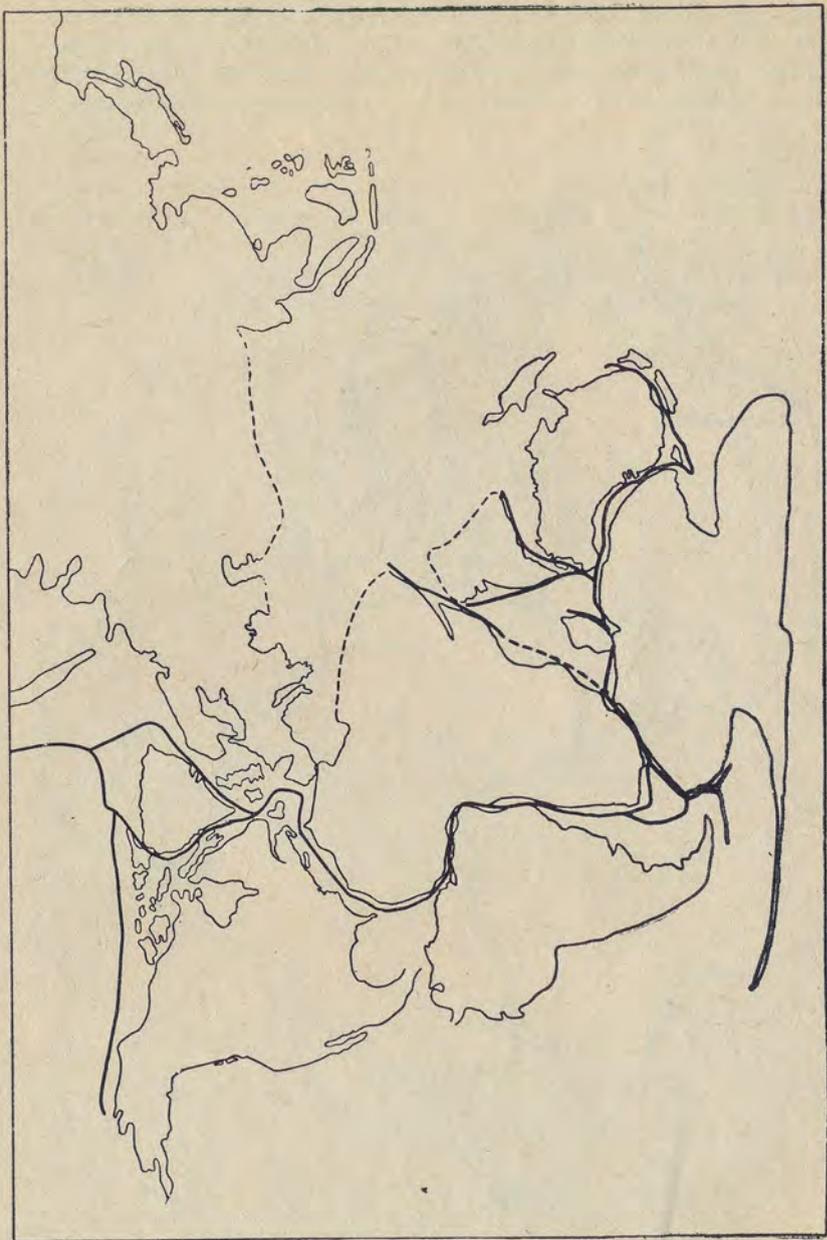


Рис. 9. Соответствие материков друг другу на основании сходства береговых очертаний (геометрическое соответствие). Взаимное расположение материков рассчитано на ЭВМ. Однако это не единственно возможное расположение Индии, Австралии и Антарктиды относительно Африки; более точное расположение этих материков должно быть найдено путем перебора разных вариантов.

Атлантикой. Ответ, полученный при машинном счете (рис. 8, б), находился в полном соответствии с данными Кэри. Попутно было установлено, что наилучшее совпадение очертаний происходит в том случае, если принять за границу материка изобату 2000 м, которая проходит примерно посередине материкового склона.

С тех пор многие исследователи использовали вычислительные машины для изучения взаимного соответствия других материков. Эти задачи оказались гораздо сложнее, поскольку материковые склоны других материков изучены хуже, особенно вокруг Антарктики. Кроме того, корреляция между геофизическими свойствами пород на противоположных склонах была изучена лишь в некоторых местах. Тем не менее к 1969 г. было найдено, что Антарктида, Австралия и Индия удивительно хорошо соответствуют друг другу*, причем соответствие Австралии и Антарктиды оказалось даже лучшим, чем материков, разделенных Атлантическим океаном. Однако полного соответствия этих трех материков и Южной и Восточной Африки пока не удалось обнаружить, поскольку в данный момент точно не выделен край материка на востоке Африки. Возможно, он лежит дальше 2000-метровой изобаты, поскольку осадки, отложенные на суше, прослеживаются ниже этой глубины. Если поместить Антарктиду против Южной Африки, а Индию — против Сомали, то получится довольно правдоподобная картина (рис. 9). При этом промежутки, остающиеся между материками, могут быть частично чисто океаническими или «континентальными», но находящимися сейчас на океанической глубине. Картина соответствия материков друг другу была улучшена после того, как было сделано допущение о возможных движениях внутри самих материков, таких, как закрытие Бискайского залива, поворот Пагагонии вокруг Южной Африки, перемещение западной Антарктиды относительно восточной Антарктиды и т. д.

Несмотря на то что отсутствие знаний о местоположении континентального края Восточной Африки мешает нам закончить сложение нашей картинка-головоломки, очевидно, что отдельные фрагменты этой картинка удивительно хорошо совпадают друг с другом. Это соответствие выражено настолько четко, что объяснить его вряд ли возможно иначе, чем приняв, что когда-то они образовывали один огромный материк, впоследствии разделившийся на отдельные материка. А теперь посмотрим, как получившаяся картина помогает нам проследить географию нашей планеты в прошлом.

* На рис. 9 видно, что это вовсе не так, особенно для Индии. — Прим. ред.

ГЛАВА 3

РИСУНОК НА КАРТИНКЕ-ГОЛОВОЛОМКЕ

Восстанавливая рисунок на нашей картинке-головоломке для различных геологических периодов, мы должны совмещать отдельные материки на основе сходства их геологического развития или на основе одновременности происходивших на них явлений. Таких доказательств, конечно, мало, поскольку мы не можем «счистить» более молодые слои пород, чтобы обнаружить полную картину того или иного времени. Поэтому мы должны полагаться на отдельные фрагменты, сохранившиеся в древних породах, по каким-либо причинам не прикрытых более молодыми наслоениями. Конечно, мы должны быть уверены, что эти фрагменты относятся к одному и тому же возрасту. Такая возрастная корреляция может быть доказана двумя способами: либо палеонтологическим методом (по ископаемым остаткам растений и животных), либо методом радиоактивного датирования.

Определение возраста пород по ископаемым остаткам началось с 1811 г., когда английский геолог Уильям Смит нашел, что каждый слой породы содержит единственный в своем роде набор органических ископаемых. Хотя одинаковые ископаемые могут быть найдены повсюду в пределах слоя, идентичные им группы остатков не встречаются в более молодых верхних слоях или более древних слоях, лежащих ниже. Это значит, что если будет установлена последовательность накопления остатков во времени, то по этой шкале можно датировать породы, содержащие идентичный набор ископаемых. Мы знаем теперь, что это явление связано с эволюцией видов, теория которой была разработана Чарльзом Дарвином. Поскольку у животных и растений постоянно происходят генетические изменения и возникают новые виды, понятно, что каждый период времени должен характеризоваться специфичным набором видов. Этот метод часто называют относительным датированием, поскольку он дает возможность лишь определить, какие породы более молодые, какие более старые, но не позволяет измерить их фактический возраст в млн. лет (рис. 10). Практически невозможно, да и не нужно при определении возраста пород изучать детально все ископаемые остатки. Обычно бывает достаточно найти некоторые виды растений или животных, которые развивались в данное время особенно интенсивно. Обнаружение хотя бы одного из таких «руководящих ископаемых» может оказаться достаточным для установления возраста содержащей его породы со сравнительно высокой точностью. Этот метод дает отличные результаты, однако лишь в пределах отдельного



Рис. 10. Стратиграфическая колонка. Геологи сумели установить хронологическую последовательность для пород за последние 570 млн. лет на основе содержащихся в них ископаемых остатков. С помощью радиоактивного метода был установлен возраст (в млн. лет) различных стратиграфических подразделений и хронологическая шкала была продолжена и для более ранних периодов существования Земли (4500 млн. лет).

материка. Число руководящих ископаемых, получивших достаточно широкое географическое распространение и используемых для установления временной корреляции между материками, весьма невелико.

Другая проблема, возникающая при применении описанного метода, связана с тем, что он может быть использован лишь для последних 570 млн. лет из 4500 млн. лет существования Земли. Хотя первые следы жизни можно обнаружить в эпоху 3000 млн. лет назад, от этих организмов не осталось заметных остатков, поскольку их тела еще не включали какой-либо твердой основы. Лишь 570 млн. лет назад внезапно возникли формы, обладающие раковинами и скелетами (рис. 10); причина такого внезапного появления новых форм не ясна. Следовательно, мы должны использовать радиоактивные методы при определении возраста пород, относящихся к тем периодам, при которых еще отсутствуют различные формы жизни, а также при поиске временной корреляции и для установления абсолютной шкалы времени в миллионах лет, с которой можно было бы сравнить результаты, полученные при использовании палеонтологического метода.

Большинство пород содержит ничтожные количества радиоактивных элементов, таких, как уран, калий или рубидий, которые постепенно распадаются и превращаются в другие элементы. Если мы знаем скорость распада, то можем подсчитать возраст этих пород, измеряя количества радиоактивного элемента и его конечного продукта распада, присутствующие в настоящее время. Схема распада радиоактивного калия показана на рис. 11. Поскольку количества радиоактивных элементов очень малы, для их определения была разработана специальная аппаратура. Сейчас основная трудность заключается в том, чтобы получить образцы пород, которые бы сохранили исходные элементы и их продукты распада без посторонних примесей в виде газов и жидкостей, возможно проходивших через породы позже времени их кристаллизации. Сейчас мы располагаем чрезвычайно мощной методикой для определения возраста. Тем не менее при сравнении очень древних пород мы должны соблюдать большую осторожность, поскольку ошибка измерений около 3%. Таким образом, в предельном случае возраст 2000 млн. лет может быть ошибочным на целых 120 млн. лет.

Если принять во внимание все указанные трудности в установлении точной временной корреляции между породами на различных материках, то не покажется удивительным, что интерпретация геологических данных с точки зрения движения материков вызвала многочисленные споры. Однако в последнее время наблюдался заметный прогресс в этой области, связанный с применением как обычных геологических методов, так и с

совершенствованием метода радиоактивного определения возрастов, что увеличило количество примеров геологического соответствия. Из них мы рассмотрим один случай детального соответствия материков на основе возрастов, определенных по радиоактивности, и два примера совпадения геологических событий, общих для материков, находящихся в настоящее время

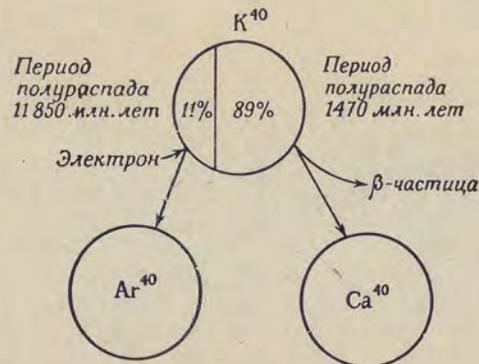


Рис. 11. Схема распада калия (K^{40}). В заново формируемых породах небольшая часть (0,0119%) общего количества калия — это радиоактивный изотоп. Радиоактивный калий распадается, превращаясь в кальций или аргон. Образующийся при этом кальций аналогичен обычному кальцию, но аргон отличается от обычного аргона. Таким образом, можно измерить количество аргона, возникшее с момента формирования породы. За время 11 850 млн. лет половина радиоактивного калия превратится в аргон, за следующие 11 850 млн. лет половина оставшегося калия претерпит такое же изменение и т. д. Поэтому при определении скорости распада используется так называемый период полураспада, т. е. время, за которое распадается половина исходного количества элемента. Поскольку мы можем подсчитать первоначальное количество радиоактивного калия и знаем скорость его распада, измерение количества радиоактивного аргона позволит нам определить возраст образования данной породы.

на противоположных сторонах Атлантического океана. Удивительная идентичность геологической истории Южной Африки и Бразилии послужит нам примером общего сходства всех южных материков.

Первый пример основывается на применении радиоактивных методов датирования к некоторым областям Южной Америки и Африки. Область пород возраста 2000 млн. лет западной возвышенной части Африки, называемой Сахарским щитом, имеет волокнистую структуру, похожую на срез дерева, но только в гигантском масштабе. Эта структура простирается в направлении север — юг, но в конце концов поворачивает на запад, в Атлантический океан (это особенно хорошо видно на фотографиях, снятых со спутников, пролетавших над Сахарой).

Непосредственно к востоку от этих древних пород находится другая группа пород с возрастом всего лишь 550 млн. лет. Различия между этими двумя типами пород выражены чрезвычайно резко. Границу между ними можно провести по направлению к океану в районе Аккры, Гана (рис. 12). Экспедиция,

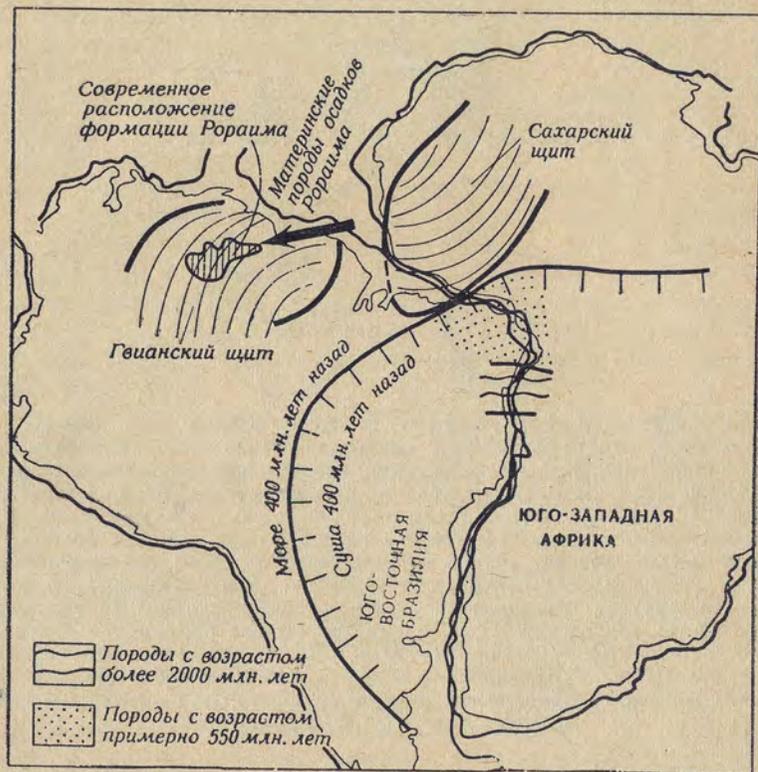


Рис. 12. Геологическое соответствие материков, разделенных Южной Атлантикой. При «воссоединении» материков отчетливо совпадают границы между породами различных возрастов так же, как и другие геологические признаки, например береговая линия Силурийского моря возраста 400 млн. лет и формации Рораима. Породы юго-восточной части Бразилии и Юго-западной Африки имеют удивительно сходную историю в течение последних 500 млн. лет (см. текст и рис. 14).

организованная Массачусетским технологическим институтом, отправилась в Бразилию с тем, чтобы найти там аналогичную границу, и действительно нашла ее вблизи Сан-Луиса — точно в том месте, где и ожидали на основе соответствия очертания материков. Детальные исследования более древних пород пока-

зали, что волокнистые структуры южноамериканских и африканских пород, по-видимому, хорошо соответствуют друг другу. Датирование с помощью радиоактивного метода, которое про-

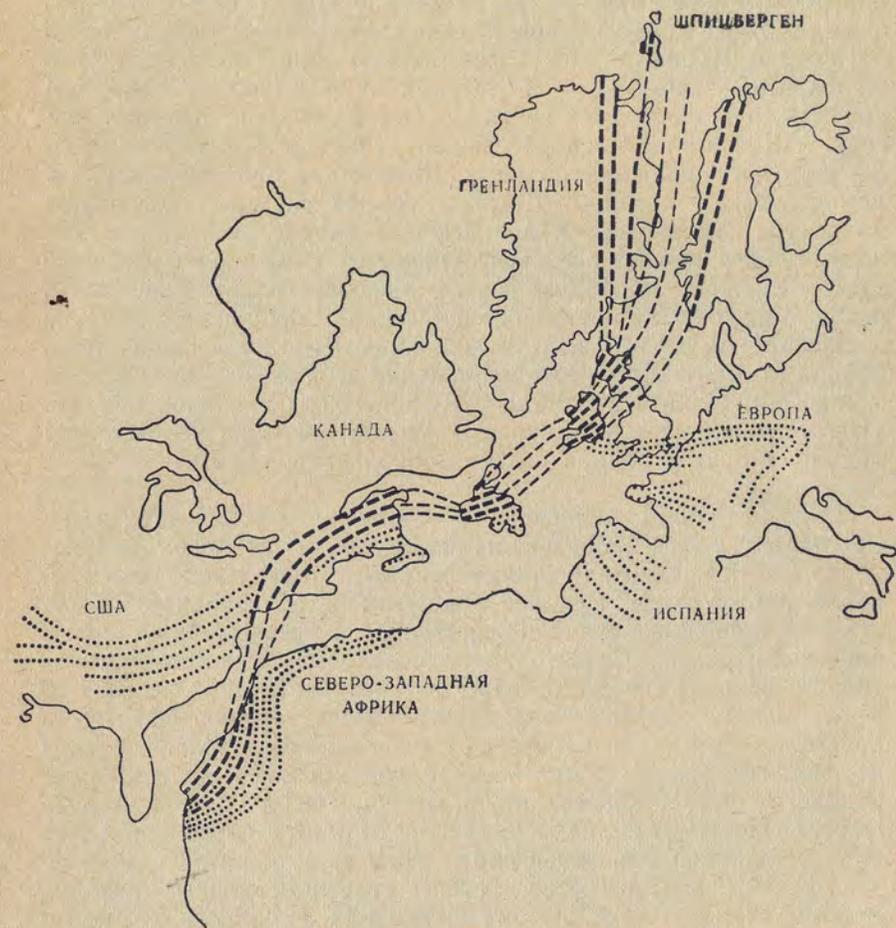


Рис. 13. Геологическое соответствие материков, разделенных Северной Атлантикой. Если материки совместить друг с другом, то Аппалач-Каледонские горы образуют непрерывную систему, хотя основная фаза горообразования в разных местах происходила в несколько разное время. Пока еще не ясно, насколько хорошо горообразование в Северной Африке соответствует американскому концу этой цепи.

должается и в настоящее время, выявило ряд других областей идентичного возраста, разделенных Южной Атлантикой.

Колоссальная древняя горная система простирается через материки северной части Атлантики (рис. 13). Это Каледонская

горная система, проходящая через Скандинавию, Шотландию и северную Ирландию. Поскольку эта горная система имеет возраст свыше 400 млн. лет, большая часть гор, когда-то столь же высоких как Гималаи, разрушилась. При этом обнажились очень плотные породы — современный фундамент Шотландского нагорья. В Норвегии можно обнаружить лишь восточный край Каледонской системы, а в Гренландии — только ее западный край. В других областях ситуация более сложная. Каледонские горы в Шотландии бесспорно являются продолжением гор Скандинавии и Гренландии, но после Шотландии они теряются под Атлантическим океаном. Древняя горная система, идентичная во многих отношениях Каледонской в Европе, выходит из Атлантического океана на Ньюфаундленде. В Северной Америке также имеются подобные горы — древние Аппалачские горы, которые идут вдоль восточного побережья Соединенных Штатов и теряются в южных штатах под более молодыми осадочными породами. Возможно, что продолжение этой же горной системы можно обнаружить в Западной Африке, хотя в данной области (и в меньшей мере в Америке и Англии) картина усложняется наличием другой горной системы, образовавшейся на 100 млн. лет позднее.

Горные цепи, подобные современным Альпам, Гималаям и Скалистым горам, образованы породами осадочного происхождения. Эти осадки наносились реками и откладывались в прогибах земной коры. Позднее в результате интенсивного нагревания и давления осадки превратились в чрезвычайно твердые плотные породы. (Что это за колоссальные процессы, превратившие осадки в породы, нам, по сути дела, не известно, но в гл. 10 мы обсудим современные представления об этих и других геологических процессах.) Разрушенные эрозией породы переносятся реками и потоками с возвышенных мест в более низкие. Попутно обломки пород все больше и больше измельчаются. Поэтому по мере удаления от места первоначального образования осадки, вынесенные реками, становятся все мельче. Изучая размер и состав частиц в старых осадочных породах, можно установить, откуда они произошли. Например, в Англии осадки пород, слагающих Каледонские горы, вероятно, принесены с очень обширного массива суши, который располагался северо-западнее этих гор, там, где в настоящее время находится глубокий Атлантический океан. В Северной Америке многие породы Аппалачей принесены с юга и востока. Для объяснения происхождения этих осадков геологи до гипотезы дрейфа материков предполагали, что на месте современной Атлантики должен был существовать континент «Атлантида», который позднее погрузился под воды Атлантического океана. Как мы видели в предыдущей главе и увидим в гл. 7, вопрос о су-

ществовании погруженного материка в Атлантике теперь всерьез никем не ставится. Восстанавливая картинку-загадку по очертаниям материков, мы не только соединяем между собой соответствующие фрагменты Каледонской горной цепи, но и объясняем происхождение сформировавшихся ее осадков.

Еще более удивительным примером является африканское происхождение осадков южноамериканской формации Рораима. В Гвиане и вокруг нее (рис. 12) эта формация, более половины которой подверглось разрушению около 1000 млн. лет назад, в настоящее время покрывает свыше миллиона квадратных километров и содержит по крайней мере миллион кубических километров осадков, принесенных в Южную Америку с северо-востока. При совмещенном положении контуров Африки и Южной Америки можно найти вероятное место происхождения этих осадков. Интересно отметить, что алмазов, обнаруженных у основания формации, становится больше по направлению к Атлантике, в то время как в Западной Африке аналогичная картина отмечается по направлению к возможному источнику их образования в Судане.

Можно найти и много других примеров геологического соответствия между материками, разделенными Атлантическим и Индийским океанами. Фактически геологическое развитие всех южных материков в течение последних 1000 млн. лет удивительно сходно. Проиллюстрировать это можно, рассмотрев коротко историю последних 550 млн. лет на основе состава пород юго-восточной Бразилии и Юго-западной Африки (рис. 12 и 14).

В течение примерно 150 млн. лет (от 550 до 450 млн. лет назад) обе области подвергались сильной эрозии. Затем они были покрыты песками и глинами, нанесенными ветрами и реками с соседних участков суши. Вскоре после этого обе области пережили оледенение (см. гл. 5), за которым последовал период развития лесов. Из этих лесов образовались отложения каменного угля, разрабатываемые сейчас в обоих рассматриваемых областях. Вслед за этим опять последовала эпоха эрозии, продолжавшаяся 20 млн. лет, а затем, примерно 210 млн. лет назад, обе области были покрыты обширными слоями песка, принесенного ветрами из более северных мест. Затем и ту, и другую области покрыли мелкие моря. Эти моря оставили морские отложения, которые в свою очередь были покрыты лавами. В Бразилии лавы заняли более 750 тыс. кв. км, а в Южной Африке — даже еще большую площадь. Примерно через 100 млн. лет после этого излияния лавы были покрыты морем: действительно, в обеих областях сейчас находят морские осадки одного и того же возраста. Это был, по-видимому, последний эпизод, общий для обеих областей. Предполагают, что данные мелкие моря предшествовали образованию Атлантического океана,

который углублялся по мере разделения материков (гл. 8). Впоследствии южноамериканскую часть покрыли тропические

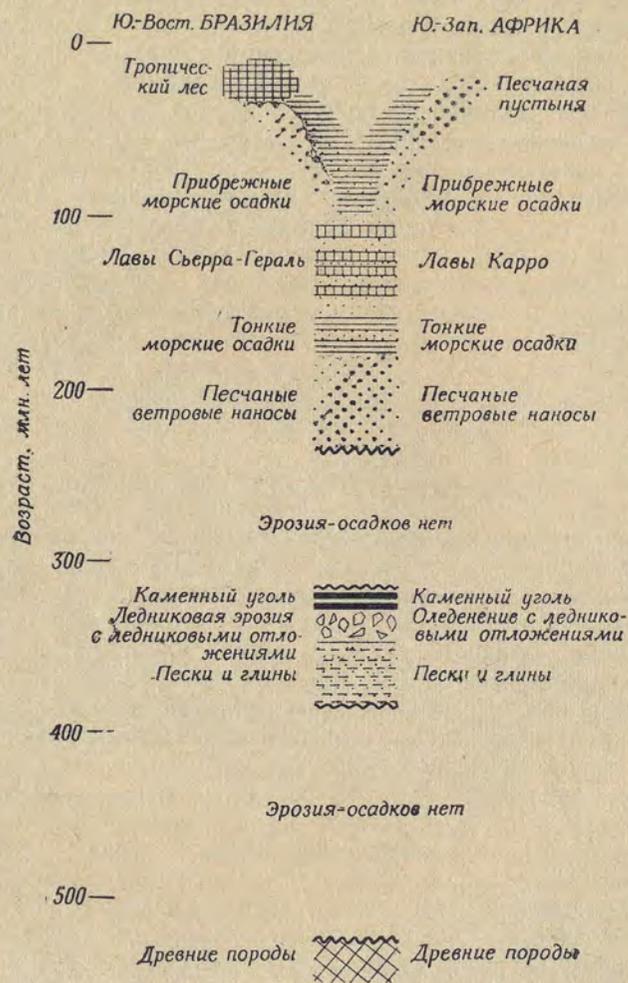


Рис. 14. Геологическая колонка пород юго-восточной Бразилии и Юго-западной Африки. Последовательность осадков и лав на обеих сторонах Атлантики почти одинакова и явно указывает на общность истории их развития, хотя сейчас эти области разделены более чем 5000 км глубокого океана.

леса, а Юго-западная Африка стала жаркой и засушливой местностью, что и отметило первые стадии их независимого существования.

Это, конечно, лишь упрощение очень сложной истории, даже мельчайшие события которой происходили одновременно. Ясно, что для отдельных независимых областей одинаковая последовательность событий в течение столь длительного периода была бы маловероятна.

ГЛАВА 4

ДРЕВНЯЯ ЖИЗНЬ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

Ископаемые остатки древних растений и животных могут многое рассказать нам о природных условиях, существовавших в прошлом. Все организмы приспосабливаются к окружающим их условиям жизни. Условия могут быть разными на соседних участках незначительной площади, не говоря уж о различии условий на суше и в океане. Следовательно, отмечая на карте распределение различных организмов в прошлом, мы можем установить места и условия их обитания. Интерпретировать условия жизни в прошлом на основании древних флоры и фауны нужно очень осторожно, поскольку их распределение обусловлено взаимодействием целого ряда факторов, о которых мы знаем очень немного. Печальным подтверждением последнего может служить изменение природы человеком, нередко приводящее к катастрофическим результатам (подобным описанным в книге Рэчел Карсон «Безмолвная весна» или возникновению североамериканской зоны пыльных бурь).

Из окружающих условий прошлого легче всего выявить условия жизни на суше и в море. По типу осадков и формам жизни, сохранившимся в породах в настоящее время, можно восстановить более мелкие подробности, например составить карту различной глубины воды, покрывавшей Англию 450 млн. лет назад (рис. 15). Некоторые виды ископаемых остатков, например коралловые рифы, могут быть использованы для еще более точного определения условий окружающей среды в прошлом.

Современные рифовые кораллы развиваются только в водах чистых, мелких морей при температуре 25—30° С. Поэтому их распределение отражает существование этой узкой области температур в мелких морях. Находя старые коралловые рифы, мы можем проследить местоположение подобных условий в прошлом. Поскольку коралловые рифы имеют возраст свыше 100 млн. лет, мы не можем быть полностью уверенными в точном значении температуры древнего мелкого моря, ибо с тех пор виды, без сомнений, претерпели некоторые изменения. Все же можно быть уверенным, что мы отмечаем одинаковые условия в прошлом, которые должны быть очень сходны с условиями, существующими на коралловых рифах сегодня. Изучение древних коралловых

рифов показывает, что 350 млн. лет назад в восточной части Северной Америки и в Западной Европе существовали совершенно одинаковые условия. Границы этих специфических условий среды соответствуют друг другу при реконструкции нашей картинки-головоломки (ср. рис. 16 и 18). Еще более удивительно, что на обоих континентах рифы содержат идентичные виды кораллов и других прибрежных и речных организмов. Это явно указывает, что данные две мелководные области должны были



Рис. 15. Распределение пород и живых организмов в Англии 450 млн. лет назад. Взаимосвязь между типом ископаемых остатков организмов и глубиной моря в этот период проявляется очень четко. В связи с последними исследованиями океанического дна мы знаем, что, исследуя пески и глины и определяя, на каком расстоянии от берега они отлагались, необходимо соблюдать большую осторожность и принимать во внимание *все* доступные наблюдения факторы, как, например, виды растений и животных, сохраненные в осадках, тип осадков.

иметь непосредственную связь, которой не мешал ни океан, ни какие-либо другие барьеры.

К концу XIX в. ученые накопили достаточное количество примеров, чтобы утверждать, что между Южной Америкой, Африкой, Индией, Австралией и Антарктидой в течение длительного периода должна была существовать сухопутная связь. Этот «объединенный» земной массив они назвали Гондваной (рис. 16) по Индийскому княжеству, где впервые были детально описаны ископаемые остатки растений возрастом в 300 млн. лет, характерные для всех этих континентов. Эти растения (*Glossopteris*) были довольно низкорослыми, и число их видов было невелико. Все это указывает на то, что росли они в холодном климате (см. следующую главу).

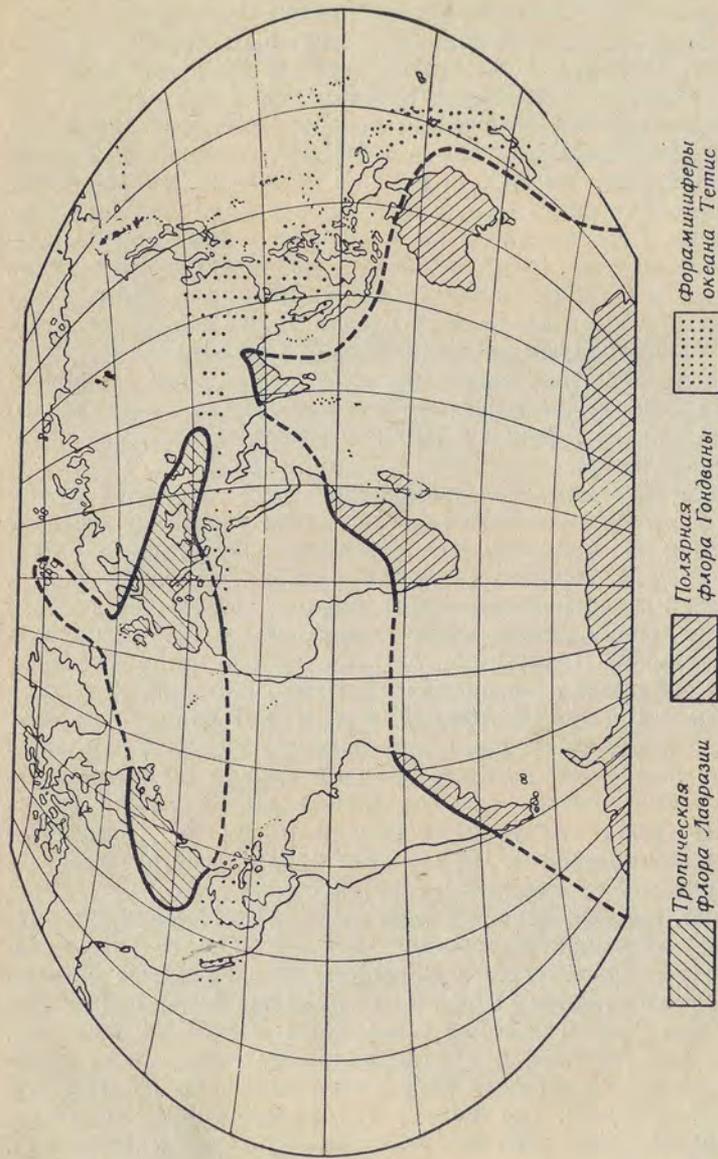


Рис. 16. Природные условия 300 млн. лет назад. Тропическая северная и полярная южная флора показаны на карте современного расположения материков. При реконструкции материков, как на рис. 18, границы будут явно соответствовать друг другу. Эти два типа растительности были разделены океаном Тетис, в котором накапливались остатки морских организмов. Этот океан, возможно, спорадически в течение последних 300 млн. лет соединялся через Средиземное море с морями Центральной Америки.

Аналогично этому считали, что Северная Америка и Европа были связаны и образовывали второй земной массив, названный Лавразией (объединяющий Лабрадор в Северной Америке с Азией через Европу). В то время, когда в Гондване развивалась лишь скудная растительность, Лавразию покрывали густые тропические папоротниковые леса, которые впоследствии образовали залежи каменного угля в Северной Америке и Европе (рис. 16). Натуралисты XIX в. и даже некоторые современные биологи объясняли связь между материками наличием широких «мостов» суши, которые затем исчезли под волнами океана. Однако геофизикам уже более чем столетие очевидно, что такие огромные мосты суши не могли бесследно исчезнуть. До сих пор не обнаружено даже мельчайших следов таких соединительных участков*. Поэтому следует сделать вывод, что такие широкие мосты суши никогда не существовали. В то же время совершенно ясно, что сухопутные животные могли без всякого труда добраться, скажем, из Африки в Южную Америку, если эти материки соприкасались.

При таком исследовании необходимо рассматривать целые популяции растений и животных, поскольку всегда существует маловероятная возможность, что несколько «переселенцев» благодаря какой-то случайности смогли перебраться через океан.

Фактически геологическая стратиграфия дает нам много примеров почти полной идентичности всей фауны и флоры на различных материках. Например, остатки целого ряда больших сухопутных рептилий с возрастом примерно 200 млн. лет были найдены как в Восточной Африке, так и в Южной Америке. Имеется еще много примеров обнаружения на различных материках таких животных, которые вряд ли смогли бы преодолеть даже небольшие пространства соленой воды. В то же время пресноводные рыбы, лягушки, черепахи и многие другие, по-видимому, вплоть до эпохи 100 млн. лет назад легко путешествовали между Южной Америкой и Африкой.

Возможно, наилучшим примером из животного мира, говорящим в пользу движения материков, является удивительная история сумчатых и плацентарных млекопитающих. Первые остатки сумчатых млекопитающих могут быть найдены в Европе, Северной Америке и Азии в породах с возрастом около 100 млн. лет. Эти предки современных сумчатых животных, несколько напоминающие опоссума, быстро распространились по всему миру примерно 70—80 млн. лет назад, что иллюстрирует большую свободу передвижения этих животных между всеми материками.

* Такое категорическое утверждение авторов не соответствует действительности. На дне океанов есть гряды, которые можно считать остатками опустившихся «мостов». Нет надобности, чтобы мосты были «широкие». — *Прим. ред.*

Несколько позже, видимо вследствие разделения материков, эта свобода была утрачена и на каждом материке стали развиваться свои обособленные виды. Примерно в это же время в Европе и Азии развились плацентарные млекопитающие. Они быстро распространились в Северную Америку, что указывает на все еще существовавшую между этими областями связь. Новые плацентарные млекопитающие были в основном хищниками, в то время как большинство сумчатых были травоядными. Плацентарные животные вытеснили или, просто говоря, съели большинство сумчатых в северном полушарии*. Сохранились лишь те виды, которые приспособились к окружающим условиям, неблагоприятным для плацентарных животных. В Южной Америке сумчатые жили совершенно спокойно в изоляции до 30—40 млн. лет назад, когда вследствие движения материков образовалось соединительное звено с Северной Америкой (Центральная Америка), что позволило плацентарным млекопитающим проникнуть с севера и уничтожить большинство сумчатых животных Южной Америки. Австралия, однако, оставалась изолированной вплоть до приезда европейцев, привезших с собой животных северного полушария. Это нарушило жизнь местных сумчатых, и вот сегодня мы имеем лишь горсточку видов из австралийской фауны, процветавшей 200 лет назад.

Многие морские животные, особенно панцирные рыбы, могли успешно существовать лишь в мелких морях, близко у побережья. Таким образом, по встречаемости ископаемых остатков этих животных мы можем установить расположение прибрежных мелководий в геологическом прошлом. Например, виды ископаемых кораллов на противоположных сторонах Центральной Америки (Багамские о-ва, Калифорнийский залив) имеют и сходство, и различие в разные периоды за последние 50 млн. лет, что указывает на периодическое появление и исчезновение непосредственной связи через море между Атлантическим и Тихим океанами во время формирования центральноамериканского перешейка. Много подобных доказательств было получено при изучении пород, слагающих нынешние Альпы и Гималаи. Согласно имеющимся данным, эта область, покрытая водой в течение большей части последних 600 млн. лет, простиралась от Средиземного моря, через юг Азии, через север Индии и проходила где-то в Тихом океане (рис. 16). Этот древний океан, отмеченный как осадками, так и морскими организмами, сохранившимся в них, уже давно был обнаружен геологами. Он был назван океаном Тетис (по имени Матери Океанов, жены греческого бога Океана). В последующих главах мы увидим, как этот

* Такое наивное изложение истории животного мира вряд ли соответствует действительности. — *Прим. ред.*

океан, когда-то обширный и глубокий, превратился при столкновении южных и северных материков в современные горы.

Таким образом, ископаемые остатки указывают на совершенно четкое единство южных материков — Южной Америки, Африки, Индии, Австралии и Антарктиды, с одной стороны, и северных материков — Северной Америки, Европы и Азии, — с другой. Эти два сверхматерика были разделены океаном Тетис, однако, судя по типу ископаемых остатков, они часто приходили в близкий контакт друг с другом (рис. 18). Это имело место, в частности, между северной частью Южной Америки, Северо-западной Африкой, Юго-западной Европой и юго-восточной частью Северной Америки в течение очень длительных периодов, например между 400 и 250 млн. лет назад, когда вся суша представляла собой единый подковообразный земной массив.

В гл. 8 мы увидим, как по некоторым остаткам морских организмов (аммонитам) удастся с высокой точностью установить время окончательного разделения Африки и Южной Америки. Но прежде чем обсуждать это определение возраста дрейфа материков, давайте рассмотрим свидетельства изменения климата на сверхматериках, запечатленные в породах.

ГЛАВА 5

ДРЕВНИЕ КЛИМАТЫ

Летопись климатических условий на земном шаре прослеживается в породах так же ясно, как и отпечатки древних форм жизни. Мы можем провести границы расположения существовавших когда-то жарких пустынь и ледниковых шапок, причем признаки пустынь обнаруживаются в современных полярных областях, а следы ледников — в современных экваториальных лесах. Более того, следы противоположного климата имеют одинаковый возраст. Следовательно, в те времена климатические зоны на материках располагались диаметрально противоположно современным.

Этим фактам можно дать два объяснения. Если мы примем, что материки не двигались, то, значит, должны были измениться факторы, определяющие расположение климатических поясов. Если же мы допускаем дрейф материков, то климатические условия в прошлом следует считать подобными сегодняшним, но расположение материков на земном шаре иным. Современные климатические зоны на Земле (рис. 17) определяются многими факторами: распределением суши и моря, наличием или отсутствием гор и т. д., но прежде всего — наклоном оси вращения Земли по отношению к плоскости эклиптики. Это значит, что

мы можем ожидать изменения климатических условий в геологическом прошлом по мере образования и разрушения гор, наступления и отступления морей и т. п. Но все эти изменения будут незначительны по сравнению с теми, которые вызываются переменной местоположения по широте. Последнее может иметь место только в случае движения материков или значительного изменения наклона оси вращения Земли. Однако изменение наклона оси вращения могло бы произойти только под действием

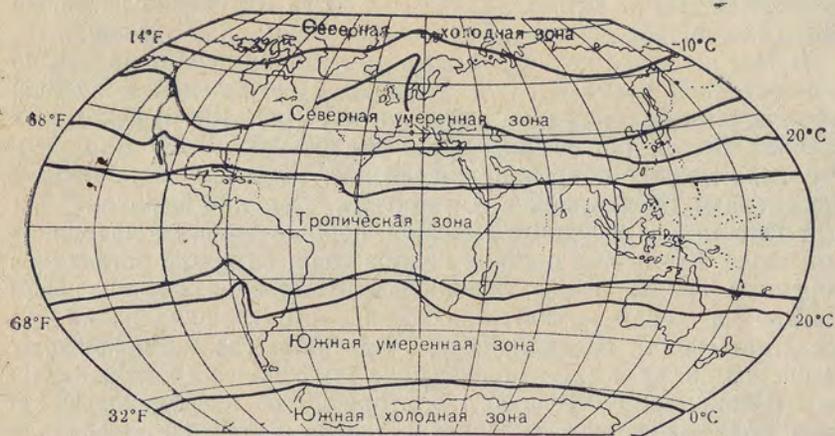


Рис. 17. Современные климатические зоны земного шара. Эти зоны явно связаны с широтой, потому что они определяются углом наклона солнечных лучей к поверхности Земли. Конечно, имеются небольшие вариации, вызванные распределением суши и моря (например, заметное влияние Гольфстрима на климат Западной Европы), но эти вариации незначительны по сравнению с общей зависимостью от широты.

чрезвычайно мощных сил, близких к разрушительным для Земли в целом. Так что геологическая летопись непременно сохранила бы следы деятельности таких сил. Тем не менее какие-либо признаки подобного события отсутствуют. Впрочем, не исключена возможность, что внешняя оболочка Земли могла сместиться как единое целое по отношению к внутренней части планеты. Но это предположение требует, по-видимому, еще более сложного объяснения, чем дрейф материков; в гл. 10 мы вернемся к этому вопросу.

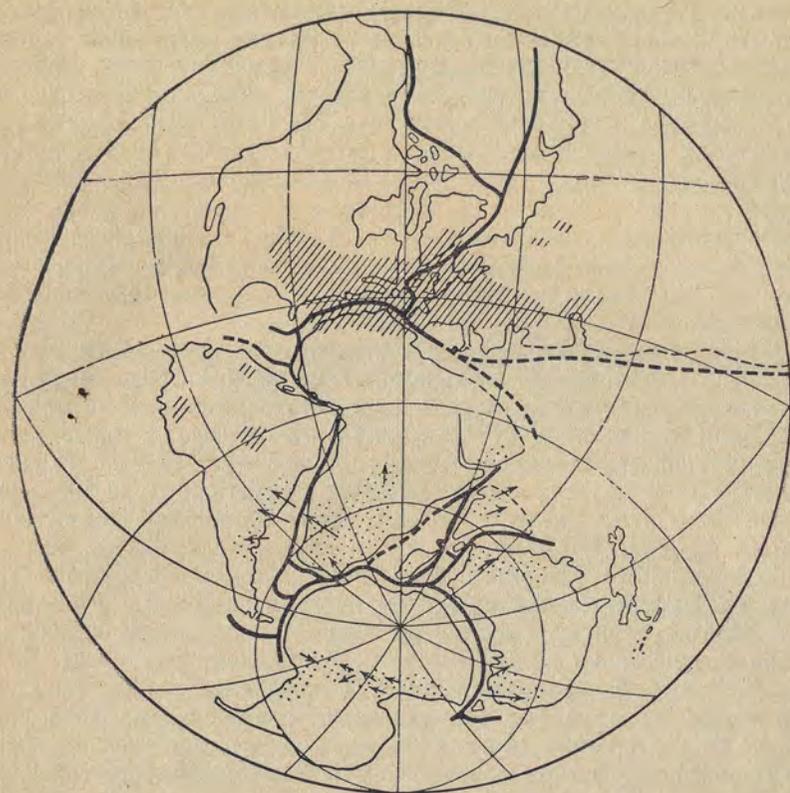
В период между 100 и 200 млн. лет назад на Земле существовал более ровный и в основном более теплый климат. Такая ситуация почти наверняка была связана с отсутствием гор на большей части Земли и очень широким распространением мелких морей на большинстве материков (рис. 33). Поэтому при изучении каждой отдельной области мы должны тщательно раз-

граничивать перемены климата, вызванные геологическими событиями, и основные изменения, которые можно объяснить лишь движением материков.

Имеются несомненные доказательства того, что в период от 250 до 350 млн. лет назад в современных полярных областях были жаркие пустыни, а в нынешних экваториальных районах — ледники. Это особенно важно, поскольку контраст между обеими областями как тогда, так и сейчас очень велик. Объяснить названные факты на основе гипотезы дрейфа материков легко, но найти какое-либо другое объяснение чрезвычайно трудно.

В течение этого периода огромные ледники перемещались по юго-восточной части Южной Америки, Центральной и Южной Африке, Индии, Австралии и Антарктиде (рис. 18). В некоторых районах Земли оледенение продолжалось около 50 млн. лет. Это было мощное покровное оледенение, сходное с современным оледенением Гренландии и Антарктиды. Ледники выпаживали и перемещали разрушенные морозом породы со всех материков Гондваны. Когда лед в конце концов таял, на земле оставались моренные гряды. Такие ледниковые отложения можно найти сегодня на любом из материков Гондваны; толщина их иногда достигает 1000 м, как, например, в Бразилии, где они покрывают свыше 4 млн. кв. км. Это оледенение было более продолжительным и покрывало большую территорию, чем в ледниковый период плейстоценового оледенения, когда в течение последних 2 млн. лет северные полярные льды достигали по временам широт Лондона, Нью-Йорка и Сан-Луиса, оставив после себя лишь примерно 100 м ледниковых отложений на большей части Северной Европы и Северной Америки. Мощность оледенения Гондваны доказывает, что это было скорее всего полярное покровное оледенение, в частности еще и потому, что в основном эта территория была низменностью. Горные ледники, подобные тем, что имеются сегодня в Альпах и Скалистых горах, никак не могли принести такие большие количества ледниковых отложений, хотя в это время в северной части Нового Южного Уэльса, в Австралии, наблюдалось небольшое горное оледенение.

Оледенение южных материков происходило в следующем порядке: сначала Южная Америка и Африка, затем Мадагаскар и Индия, а еще позднее — Антарктида и Австралия. Тем не менее на основании современного распределения материков, на которых имеются свидетельства существования этих древних ледников, представляется, что это было почти сплошное оледенение, покрывавшее практически одновременно территорию от современного Южного полюса до экватора. Иными словами, получается, что весь земной шар в это время должен был бы быть покрыт льдом. (Как мы увидим, это на самом деле не имело места.) Но если мы «воссоединим» южные материки в Гондвану



-  Пышные тропические леса, образовавшие залежи каменного угля возрастом в 300 млн. лет, в последующие 50 млн. лет превратившиеся в жаркие пустыни
-  Области оледенения в период между 250-300 млн. лет. Стрелками показаны известные направления движения льда

Рис. 18. Полярные льды и жаркие пустыни 250—300 млн. лет назад. Пустыни, показанные на рисунке, оставили в Лавразии большие площади, покрытые дюнами и отложениями солей, в то время как в Гондване было полярное оледенение. Ледниковые отложения и направления движения льда, показанные на схеме, относятся к разным временам. В Бразилии они имеют возраст около 300 млн. лет, в Австралии и Антарктиде — примерно 250 млн. лет. В течение этого 50-миллионного периода Лавразия двигалась в пределах экваториальной зоны, так что пояс пустынь постепенно менял положение. На схеме расположение материков и пустынь показано примерно для 250 млн. лет назад.

(см. рис. 18) и позволим этому сверхматерику медленно пересекать южную полярную зону Земли, то южная ледниковая шапка будет соответственно перемещаться по материку. Такая интерпретация не только объясняет различный возраст оледенения, но и приводит в согласие климатические условия с положением ледниковой шапки в разные периоды той эпохи. Так, последние стадии оледенения Австралии приурочены к появлению жарких пустынь на востоке Южной Америки и в северной Африке, которые находились тогда на широте 20°. На основании же современного положения этих материков следовало бы, конечно, ожидать, что они имели климатические условия, сходные с условиями в Австралии.

Имеются и другие данные в пользу обоснованности реконструкции Гондваны по отложениям и другим сохранившимся признакам оледенения. Можно проследить направление движения древних ледников по царапинам на скалах, которые оставили валуны, двигавшиеся вместе со льдом (рис. 18). Более того, изучение породы этих валунов может указать, откуда их перенес ледник, что служит дополнительной проверкой правильности определения направления перемещения ледника.

Все ледники в Бразилии в ту эпоху двигались с востока, отсюда, где теперь находится Атлантический океан. В Юго-западной Африке можно проследить целый ряд следов движения ледника, несколько рядов морен, пересекающих местность, бывшую когда-то более возвышенной, и направленных на запад, к Атлантике. Бразильские ледники несли отложения из материковой области, причем сюда входили породы, встречающиеся в Юго-западной Африке, но неизвестные в соседних областях Южной Америки. Подобные свидетельства происхождения ледниковых отложений в местах, где ныне существуют лишь океаны, находят по всей Гондване. На крайнем юге Африки материковые породы пришли с юга: в Юго-западной Африке, близ Дурбана, несколько сотен метров ледниковых отложений были принесены из района, находящегося сейчас всего лишь в нескольких километрах от глубокого Индийского океана; в Австралии же, вблизи Аделаиды, ледники перенесли большое количество материковых пород по направлению от современного Австралийского залива. Лишь при реконструкции этих континентов в единый материк — Гондвану — мы можем найти источник этих гигантских ледниковых отложений.

В то время на современных материках северного полушария роскошные тропические леса, упомянутые в предыдущей главе, уступали место обширным жарким песчаным пустыням. Существовавшие там мелкие моря быстро испарялись, образуя мощные отложения солей, которые можно найти сейчас на большей части Северной Америки и Европы (рис. 18), вплоть до Канад-

ского архипелага и северной Гренландии. Эти залежи являются сейчас ценным источником соли и поташа, а в геологических структурах, связанных с ними, часто находят месторождения нефти и природного газа, как, например, в Техасе или Северном море.

Такие противоположные данные относительно северных и южных материков показывают, что 200—300 млн. лет назад они должны были находиться по отношению друг к другу в существенно различных положениях относительно современного. Но так как климатические пояса очень широки и зависят от местного распределения суши и моря, нельзя определить точное положение материков на основании одних лишь климатических данных. Изучая намагниченность пород, мы подкрепим гипотезу движения материков более точными аргументами.

ГЛАВА 6

НАМАГНИЧЕННОСТЬ ДРЕВНИХ ПОРОД

До сих пор мы рассматривали перемещения материков в общем, без особой детализации по месту и во времени, хотя в некоторых случаях была возможна и другая интерпретация. В результате последних исследований были разработаны методы, с помощью которых можно действительно измерять положение материков в прошлом. Именно благодаря этим методам данные, полученные при изучении намагниченности материковых пород (обсуждаемые здесь) и океанических пород (рассматриваемые в следующей главе), послужили основной причиной принятия гипотезы дрейфа материков в научных кругах.

Породы, в состав которых входят железосодержащие минералы, намагничиваются одним из двух путей. Вулканические породы, такие, как граниты и лавы, образуются из расплавленных пород; лавы извергаются из вулканов при температуре свыше 1000°С. Эти очень горячие породы не намагничены, поскольку этому препятствует их высокая температура, но после затвердевания и дальнейшего охлаждения ниже 600°С железосодержащие частицы в породе намагничиваются в направлении преобладающего магнитного поля Земли (рис. 19). Намагничивание при высокой температуре очень устойчиво и сохраняется неизменным внутри лавы, несмотря на последующие изменения магнитного поля Земли. Это явление впервые было обнаружено в лавах Этны в середине XIX в. В дальнейшем многочисленные исследования пород с хорошо известным временем извержения и лабораторные эксперименты подтвердили тот факт, что вулка-

нические породы «помнят» направление на геомагнитный полюс во время их излияния.

Случай осадочных пород, таких, как песчаники и сланцы, более сложен (рис. 19). Эти породы содержат в основном частицы, вымытые потоками воды из уже сформировавшихся пород. Вымытый материал уносится и постепенно откладывается вдоль берегов рек, в озерах и, в конечном счете, на дне морей. Его

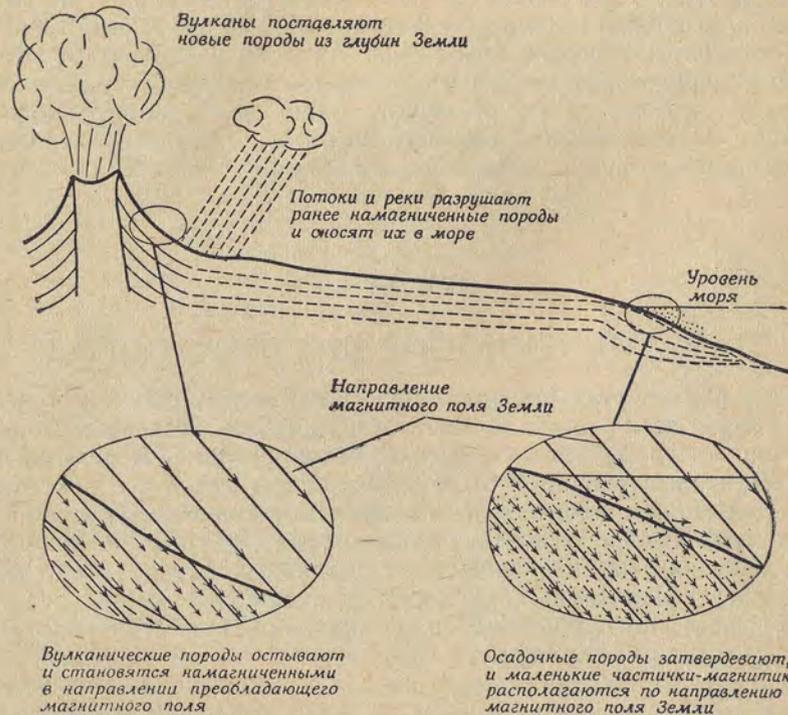


Рис. 19. Схема процесса намагничивания изверженных и осадочных пород.

железосодержащие частицы уже намагничены, поскольку они были вымыты из пород, приобретших намагниченность прежде. Пока частицы переносятся течением вод, никакой общей ориентировки у них нет. Потом частички осаждаются и, выпадая в осадочную массу, ориентируются вдоль существующего направления магнитного поля Земли. По мере того как сверху откладываются новые слои, осадки уплотняются, цементируются и становятся песчаниками или сланцами. Этот сложный процесс превращения мокрых осадков в компактные породы (диагенез) буквально закрепляет магнитные частицы параллельно магнит-

ному полю, и все железосодержащие минералы внутри этого «цемента» также становятся ориентированными по магнитному полю.

Иными словами, оба типа пород — как вулканические, так и осадочные — могут иметь намагниченность, которая указывает направление на геомагнитный полюс в момент формирования

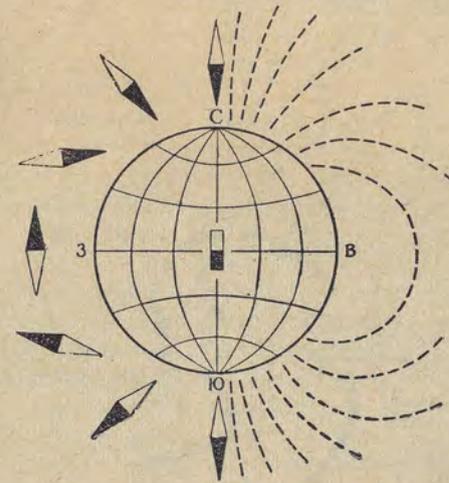


Рис. 20. Связь магнитного наклона с широтой. Очень грубо можно считать, что магнитное поле Земли обусловлено простым дипольным магнитом, расположенным в центре Земли и ориентированным вдоль ее оси вращения. В этом случае подвешенная магнитная стрелка займет вертикальное положение над полюсом и горизонтальное у экватора. Поэтому результаты измерений магнитного наклона, зафиксированного в породах, могут быть использованы для определения широты, на которой породы приобрели намагниченность.

породы. К сожалению, не все породы способны сохранять в течение геологического времени первоначальное направление намагниченности. В некоторых породах она разрушается и теряется, но, к счастью, ряд пород, особенно темноволновые вулканические породы и красные песчаники, сохраняют намагниченность, достаточную для того, чтобы ее можно было обнаружить различными лабораторными методами. Именно на основе детального исследования намагниченности древних пород и была воссоздана история изменений направления и напряженности магнитного поля Земли.

В настоящее время северный магнитный полюс находится на севере Канады, довольно далеко от географического полюса (определяемого положением оси вращения Земли). Одним из первых результатов палеомагнитных исследований было обнаружение того факта, что в течение последних нескольких тысяч

лет положение магнитного полюса меняется и что его среднее положение совпадает со средним положением географического полюса. По всей видимости, это имело место и в более раннее время, так как древние широты, определяемые по палеоклима-

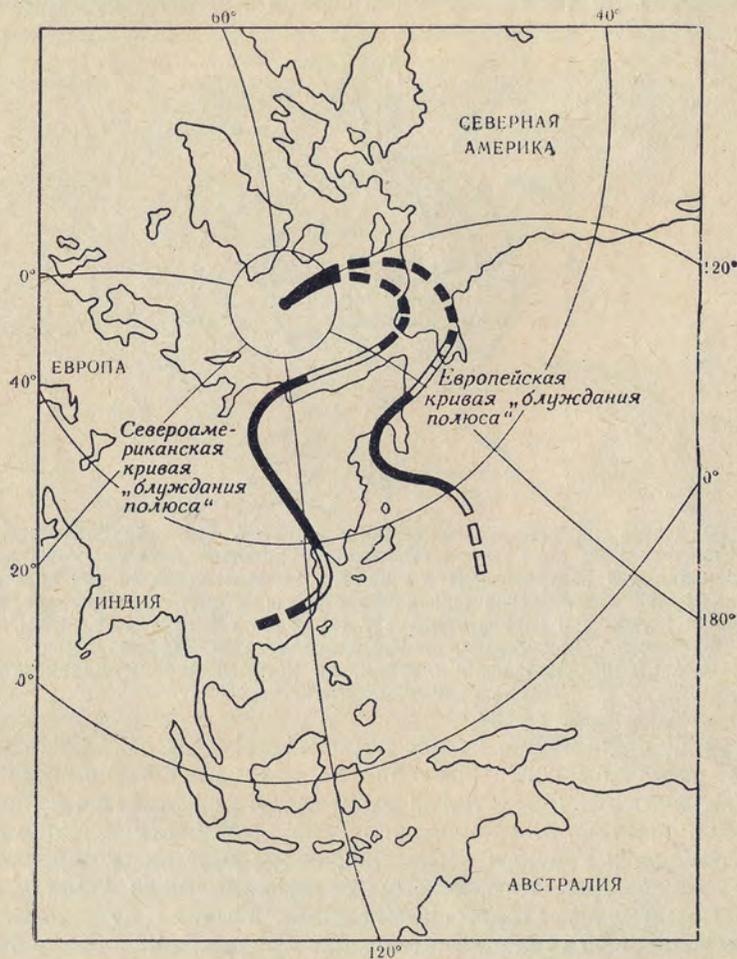


Рис. 21. Кривые «блуждания полюса» для Европы и Северной Америки. Измерения положения полюса по образцам пород каждого материка позволяют построить кривые, например для Европы и Северной Америки (сплошные линии; ориентировочные положения отмечены пунктиром) для значительного промежутка времени, достигающего 400 млн. лет. Эти кривые нельзя считать окончательными, но ясно видно, что до периода 100 млн. лет назад они раздвинуты на расстояние, равное ширине Атлантики. Если Северную Америку соединить с Европой, кривые совпадут.

тическим данным, согласуются с широтами, определенными по палеомагнетизму. Широту, на которой произошло намагничивание породы (рис. 20), можно легко подсчитать по измеренному в образце породы магнитному наклонению. Изучение все более и более старых пород любого материка показывает, что средний магнитный полюс, а следовательно, и географический полюс меняли свое положение на поверхности Земли. Объединяя эти вычисленные положения полюса для последовательных возрастов, мы получаем кривую «блуждания полюса» для материка, с которого были взяты образцы пород.

Впервые эти кривые были изучены для Северной Америки и Европы (рис. 21), в результате чего выяснились некоторые любопытные факты. Обе кривые имеют сходную форму, но до периода 70—100 млн. лет назад кривая Северной Америки лежала к западу от европейской кривой. Мы стоим, таким образом, перед ситуацией, когда мы должны либо признать существование двух отдельных магнитных полюсов (а значит, и двух географических полюсов), либо подбирать положения и ориентировку различных материков так, чтобы магнитные частицы в породах одинакового возраста указывали на один и тот же полюс. Последующие исследования подтвердили эту картину и показали, что для периода длительностью по крайней мере 200 млн. лет (между 300 и 100 млн. лет назад) положение обеих кривых различается как раз на ширину современного Атлантического океана. Поэтому единственный способ согласовать положения полюсов — это сдвинуть континенты вместе так, чтобы в этот период от Северной Атлантики не осталось и следа.

Следовательно, мы можем изменить положения материков таким образом, чтобы их кривые «блуждания полюсов» для исследуемого геологического периода совпали (рис. 22, а и б). Достоверные данные на этот счет для разных материков все еще очень малочисленны, но даже из предварительной обработки видно, что от периода 600 млн. лет назад до периода 200—100 млн. лет назад все южные материки имеют в общем сходные кривые «блуждания»*.

Такое размещение материков по палеомагнитным характеристикам полностью объясняет также их климаты в прошлом.

* Внимательное сопоставление обеих частей рис. 22 свидетельствует, что авторы проявляют необъективность и «причесывают» данные, чтобы получить идеальное совпадение там, где на самом деле оно лишь очень приблизительное. На рис. 22, а на кривой для Африки отметка 400 млн. лет расположена на севере Испании, а на рис. 22, б она попала уже на материк Африки. На кривой для Южной Америки на рис. 22, а отметка 350 млн. лет лежит на широте угла Южной Америки или чуть севернее, а на рис. 22, б она намного южнее. Масштаб рис. 22, б примерно в два раза больше, чем рис. 22, а, а расстояние кривой от берега Южной Америки на обоих рисунках почти одинаково. — Прим. ред.

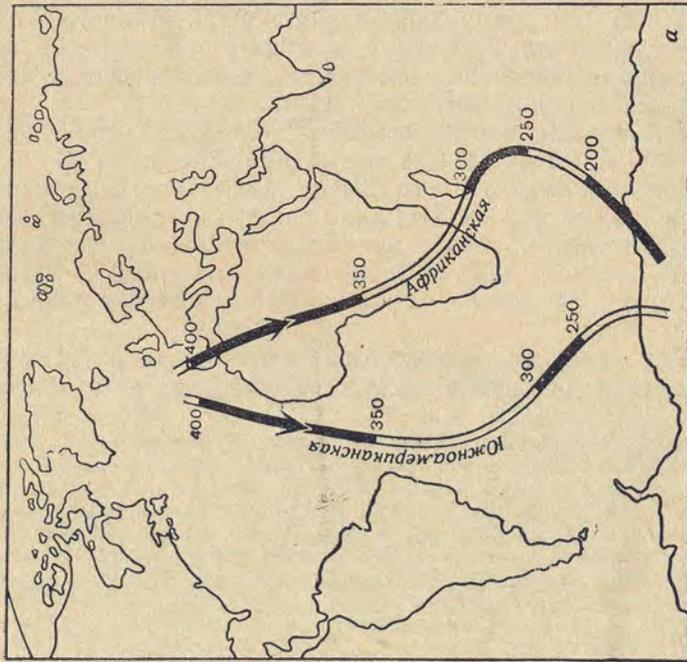
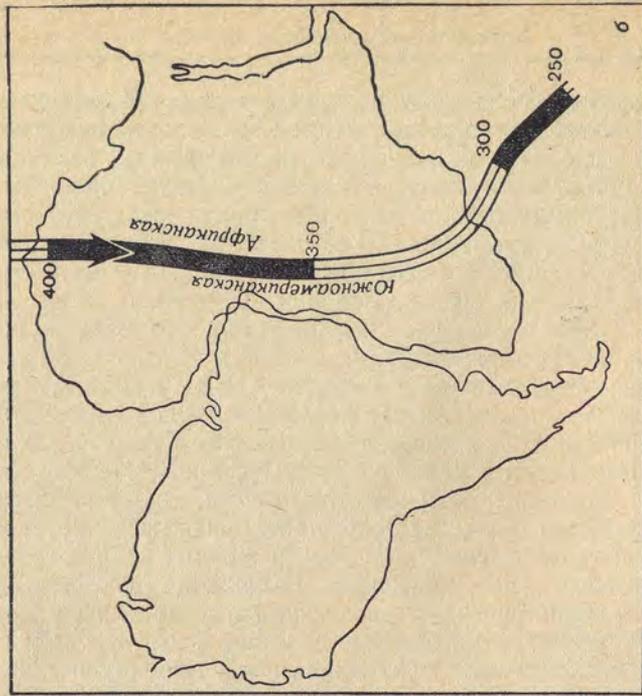


Рис. 22. Соответствие Африки и Южной Америки по кривым «блуждания полюсов». *а* — кривые «блуждания полюсов» для каждого материка при их современном положении (время в млн. лет). *б* — перемеща материка до совпадения кривых «блуждания полюсов», получаем соответствие материков, идентичное тому, которое получается при совмещении по береговым очертаниям для периода по крайней мере в 150 млн. лет.



Например, данные по Африке указывают, что 500 млн. лет назад магнитный полюс был расположен в Сахаре. Палеоклиматические данные, полученные при добыче нефти и газа в южном Алжире, подтверждают, что эта область была в тот период покрыта льдом. 200 млн. лет спустя полярная ледовая шапка, как мы видели в предыдущей главе, переместилась на юг Африки; магнитный полюс в это время находился в том же районе*. В противоположность этому северные материки 300 млн. лет назад были довольно далеко от полюсов, что полностью соответствует нашим выводам на основании возраста песчаников и солевых отложений жарких пустынь. Таким образом, палеоклиматические и палеомагнитные доказательства хорошо согласуются между собой; к тому же для объяснения тех и других результатов наблюдений требуются аналогичные движения материков. Положение же материков по палеомагнитным данным, например 100 млн. лет назад (рис. 23), находится в явном соответствии с картиной эволюции расположения материков, обсуждаемой в гл. 8.

Однако изучение намагниченности пород имеет и другой аспект, важность которого поняли лишь недавно. В конце XIX в. было обнаружено, что некоторые породы намагничены в направлении, противоположном ожидаемому: направление магнитных стрелок в этих породах таково, что северный конец стрелки указывает южный магнитный полюс. Открытие таких «обратномагнитных» пород в различных частях земного шара привело в начале XX в. к предположению, что магнитное поле Земли меняет полярность, т. е. северный магнитный полюс может становиться южным и наоборот. Это предположение было подтверждено дальнейшими исследованиями в 50-х гг., показавшими, что все породы одного и того же возраста имеют одинаковую полярность. Было установлено, что эти изменения полярности — «переполюсовки» — происходят на протяжении всей истории Земли, но в течение последних 70 млн. лет, по-видимому, более часто, чем раньше — по крайней мере один-два раза за каждый миллион лет.

Поскольку магнитное поле Земли индуцируется электрическими токами, текущими глубоко в недрах Земли, переполюсовки изучались более детально для лучшего понимания внутреннего строения Земли, а также с надеждой найти точную корреляцию их с геологическим временем. Такие исследования показали, что переполюсовка происходит в течение нескольких тысяч лет, а затем «нормальная» или «обратная» полярность сохраняется на время от 100 000 лет до 50 млн. лет. Несколько последних изменений полярности было исследовано наиболее

* Эти данные противоречат рис. 22. — Прим. ред.

подробно, поскольку в этом случае легче всего провести палеомагнитные наблюдения и есть возможность точно датировать

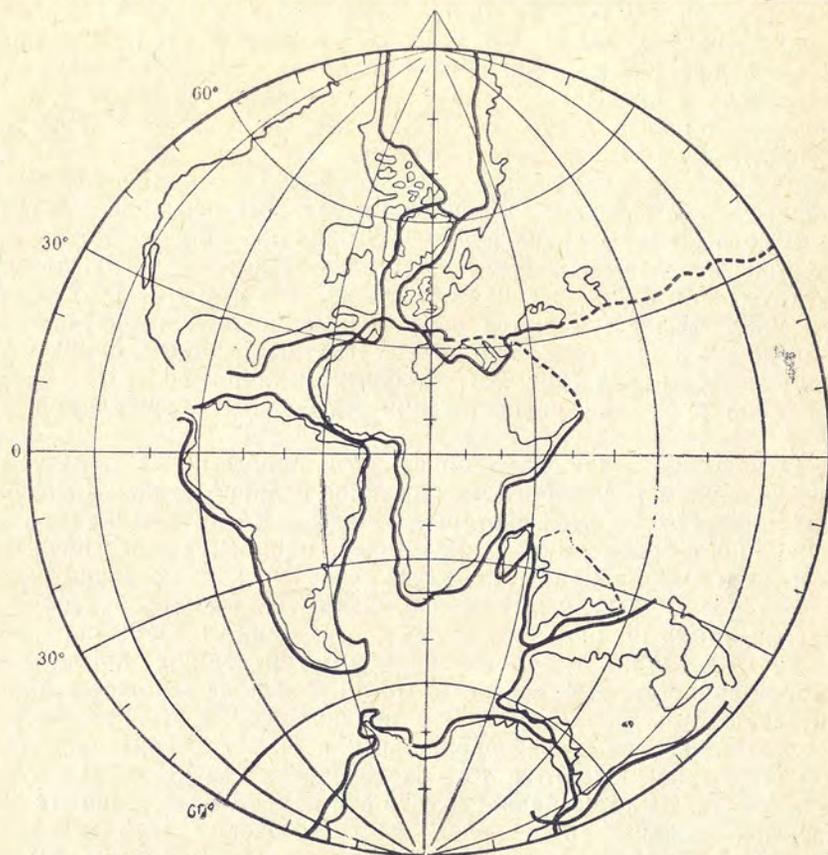


Рис. 23. Расположение материков 60—100 млн. лет назад (на основании одних палеомагнитных данных). Мы не располагаем еще достаточными данными для реконструкции расположения материков в каждый интересующий нас отрезок времени; поэтому не исключено, что в период от 60 млн. до 100 млн. лет назад могли происходить небольшие перемещения материков. Однако имеющиеся наблюдения показывают, что Индия, Австралия и Антарктида все еще составляли единый массив, отошедший от Африки, в то время как Южная Америка поворачивалась, удаляясь от Африки. На севере уже образовалось Лабрадорское море, но Северная Атлантика, между Гренландией и Норвегией, еще не начала открываться.

молодые вулканические породы с помощью радиоактивных методов. Таким путем для последних 4 млн. лет была построена шкала изменений полярности магнитного поля Земли (рис. 24). В настоящее время правильность шкалы подтверждена по океа-

ническим осадкам, обработанным палеонтологическим методом. Колонки океанических осадков (описанные в следующей главе) имеют обычно длину 10—15 м и дают непрерывную запись

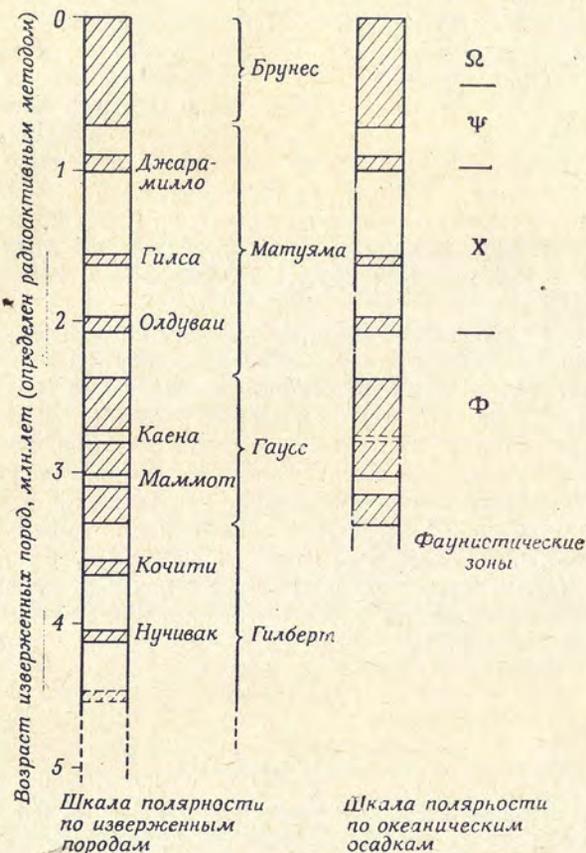


Рис. 24. Периодичность изменений полярности магнитного поля Земли в течение последних 4 млн. лет. Один и тот же знак магнитного поля Земли может быть установлен по вулканическим породам, возраст которых определен радиоактивными методами, и по осадочным породам, датированным по ископаемым остаткам. Поскольку методы определения намагниченности и определения возраста независимы друг от друга, следует признать, что наблюдаемая обратная полярность в разных породах одного возраста действительно имела место, т. е. магнитное поле Земли действительно меняет полярность. Периоды разной намагниченности, установленные по осадочным породам, датированным по фораминиферам, отмечены греческими буквами. Периоды, когда магнитное поле Земли имело ту же полярность, что и сегодня, заштрихованы, а различные изменения полярности классифицированы по эпохам (Брунес и т. д.), внутри которых отмечены и более короткие события (Джарамилло и т. д.).

магнитных изменений за последние 3 млн. лет (рис. 24), запечатленную в осадках.

Изучение осадочных колонок привело к обнаружению некоторых удивительных фактов. Так, было найдено, что во время перемены полярности многие ископаемые виды исчезали, а вскоре после этого появлялись новые. Полагают, что такое значительное ускорение эволюции связано с увеличением количества солнечной радиации высокой энергии, достигающей поверхности Земли при ослаблении поля и его экранирующих свойств. Современное магнитное поле Земли ослабевает в течение по крайней мере последних 150 лет и при существующей скорости уменьшения должно обратиться в нуль примерно через 2000 лет. Возможно, мы живем в начале переполюсовки магнитного поля Земли, после которой поле будет противоположным современному.

Изменения полярности в более раннее время изучены не так хорошо. Мы знаем, что переполюсовки в период от 5 млн. до 100 млн. лет назад были достаточно часты, но определить продолжительность каждой не можем из-за неточности радиоактивного метода определения возраста пород этих эпох. Таким образом, современные методы исследования не позволяют установить точное время древних переполюсовок. Тем не менее в настоящее время создается менее подробная шкала и для древних изменений полярности. В следующей главе мы увидим, как такая шкала изменений магнитного поля Земли дает ключ к пониманию истории развития всех океанических бассейнов нашей Земли.

ГЛАВА 7

ДНО ОКЕАНА

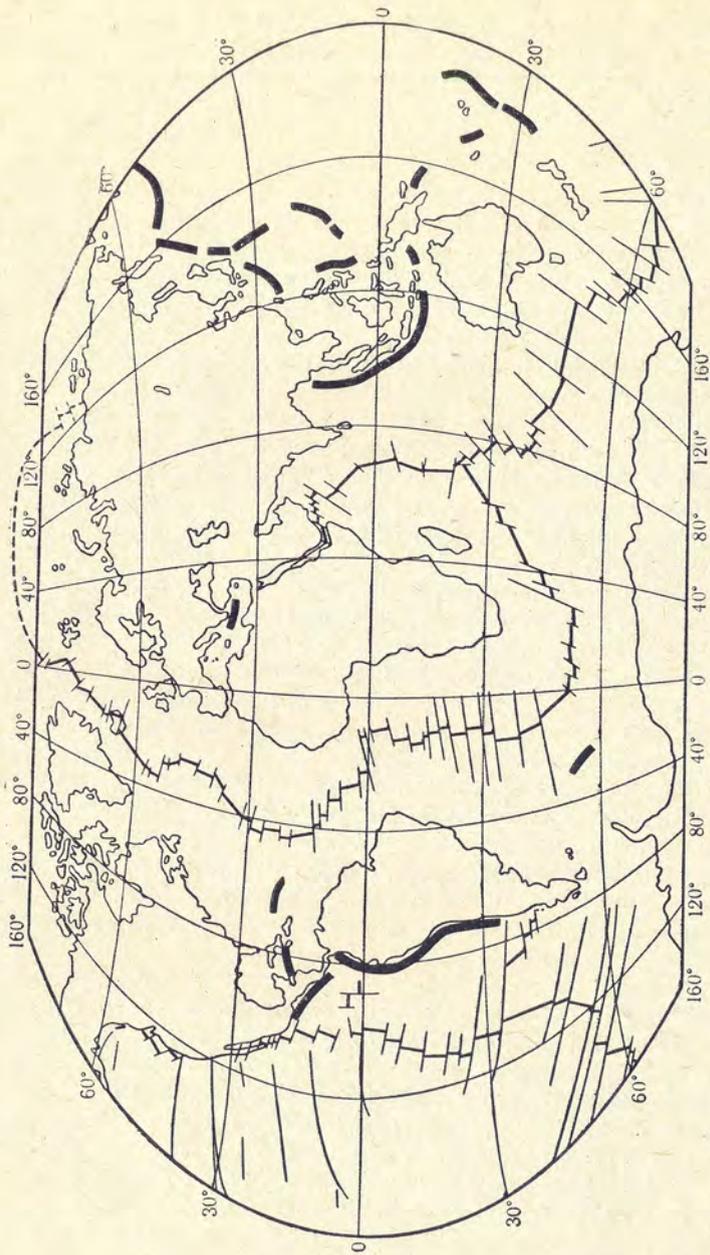
Океаны покрывают две трети земной поверхности, и эта поверхность должна была быть деформирована материками, перемещавшимися к своему современному положению. Следовательно, мы можем найти следы этого движения в 4—5-километровой толще пород океанического дна.

Вплоть до второй половины 50-х гг. одна из важных структур земной поверхности — горный хребет высотой 3 км и шириной в сотни километров — оставалась неизвестна, будучи скрытой под водами океанов. К тому времени было уже известно, что Центральная Атлантика мельче, чем другие области океана, но мысль, что линия срединно-океанических островов от Исландии до Тристан-да-Кунья (рис. 5) — это лишь небольшая часть горной системы протяженностью 80 000 км, никому не приходила в голову. В Атлантике центральная часть этого хребта отмечена

рифтовой долиной глубиной примерно 2000 м и шириной около 50 км, вдоль которой расположено большинство эпицентров землетрясений Атлантического бассейна. К 1953 г. были сконструированы сейсмографы для определения повторяемости и местоположения землетрясений, позволившие установить область, где происходят океанические землетрясения. Эта область прослеживается от центральной рифтовой долины в Атлантике, вокруг всей Африки, через центральную часть Индийского океана и, наконец, в Аденском заливе. Положение очагов этих землетрясений ясно показывает, что центральная рифтовая долина и, следовательно, сам хребет образуют непрерывную систему, идущую через оба океана.

Между 1956 и 1960 гг. американские и английские океанографические экспедиции, используя эхолоты, выделили эту систему хребтов (рис. 25) не только точно посередине Атлантического и Индийского океанов, но почти посередине между Австралией и Антарктидой и связали ее с хребтом, простирающимся в северном направлении через западную часть Тихого океана. Оказалось, что центральная часть хребта не всегда отмечена рифтовой долиной и что отдельные участки хребтов смещены относительно друг друга на десятки, а иногда и сотни километров вдоль огромных разломов земной поверхности (рис. 25). Такие зоны разломов могут быть прослежены на значительных расстояниях, иногда больше тысячи километров. Эпицентры многих океанических землетрясений приурочены к таким разломам, пересекающим ось хребта. Обсуждение этих и других особенностей глобальной системы хребтов приведено в гл. 9. Открытия, сделанные к 1960 г., очень важны как аргументы в пользу гипотезы дрейфа материков, поскольку зоны разломов указывают совершенно определенно, что крупномасштабные перемещения участков земной поверхности действительно имели место, а параллельность срединно-океанического хребта очертаниям материковых склонов в Индийском и Атлантическом океанах дала этому дополнительное подтверждение.

Образцы пород, взятые при драгировании хребта, показали, что его скалистые склоны (рис. 26) образованы изверженными породами, как и следовало ожидать в соответствии с вулканической природой срединно-океанических островов. Фотографии дна океана подтверждают, что центральная часть хребта в основном сформирована лавами, причем примерно на 100 км в каждую сторону от центральной части осадки либо отсутствуют вообще, либо имеются в небольшом количестве; дальше от середины вулканические породы постепенно исчезают под осадками. Мощность осадков увеличивается, образуя слой (обычно толщиной около 1 км), покрывающий изверженные породы дна вплоть до границы океанических бассейнов, т. е. материкового склона.



Р и с. 25. Расположение океанических хребтов, пересекающих их зон разломов и глубоководных желобов. Срединно-океаническая линия — это ось хребта; ее непрерывность нарушается большим числом зон разломов (тонкие линии). Глубоководные желоба (подробнее рассматриваемые в гл. 9 и 10), большинство которых обрамляет Тихий океан, показаны жирными линиями.



Р и с. 26. Рельеф срединно-океанического хребта (поперечное сечение). На схеме показано, как по мере удаления от середины хребта слой осадков постепенно покрывает вулканические породы.

осадки (см. ниже). Наши знания о природе и распределении этих древних осадков были радикально улучшены в течение нескольких последних лет благодаря использованию сейсмопрофилографа. Этот прибор основан на том же принципе, что и эхолот, определяющий расстояние до дна моря под кораблем путем регистрации времени прихода отраженного от дна звука. Сейсмопрофилограф использует более мощный источник звука низкой частоты, так что импульс звуковой волны проникает в осадки и отражается обратно различными слоями. Эхограммы (рис. 27), полученные таким образом, могут дать непрерывный разрез на слоения осадков, залегающих на дне. В нескольких районах океанов, особенно Атлантического и Тихого, можно проследить очень отчетливые отражения на площади свыше нескольких тысяч квадратных километров. Один из таких отражающих слоев, названный горизонтом А, соответствует, по-видимому, изменению характера осадконакопления: ровный нижний горизонт перекрывается беспорядочными отложениями. Однако роль таких слоев было трудно оценить до тех пор, пока не был известен их возраст.

Подробное изучение многочисленных эхограмм обнаружило, что на очень небольшом числе участков нижний слой осадков выходит на поверхность океанического дна либо в результате молодых разломов в подстилающих изверженных породах (рис. 27), либо из-за исключительно сильной подводной эрозии, которая удалила более молодые осадки. В этих областях был проведен очень тщательный отбор образцов для определения



Рис. 27. Схематическая обобщенная эхограмма, иллюстрирующая толщину и слоистость осадков, покрывающих вулканические породы дна океана. Отраженная от разных слоев осадков звуковая волна дает определенную картину на записи эхолота. Запись производится непрерывно во время движения корабля. Осадки покрывают почти полностью вулканические породы, за исключением пика около оси хребта и отдельных вулканов, выступающих сквозь них. Верхние слои осадков почти всегда представлены отложениями последних нескольких тысяч лет; примерно в шести местах на поверхность выходят более старые осадки, как на показанном справа краю обрыва, откуда с помощью геологической трубки можно получить образцы. На шкале справа — глубина в секундах (с); 1 с соответствует ~700 м толщи воды или 930 м осадков.

возраста. Сделать это было чрезвычайно трудно, поскольку требовалось опустить геологическую трубку с дрейфующего корабля сквозь 5-километровую толщу воды с меняющимися течениями и попасть при этом на небольшой участок крутого склона, где обнажены древние осадки. Тем не менее в конце концов были получены образцы, которые показали, что одна из отражающих поверхностей, горизонт А, сложена известняками, возраст которых примерно 70 млн. лет, а другой горизонт, В, лежащий близко к подошве осадочного комплекса, имеет возраст 120 млн. лет. Полностью значение существования этих и других отражающих слоев стало очевидным тогда, когда выяснилось, что находят их только очень далеко от хребтов и площадь каждого горизонта уменьшается с увеличением возраста (рис. 28). Такое датирование показало, что возраст наиболее древних

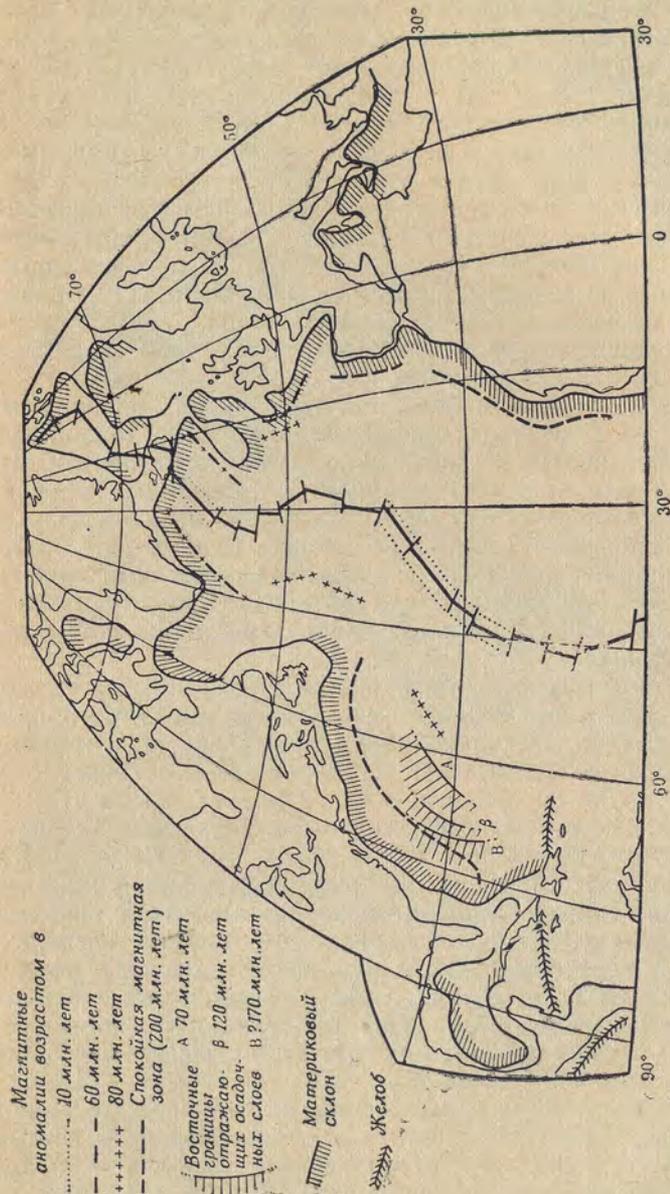


Рис. 28. Некоторые свидетельства молодого возраста Северо-Атлантического бассейна. Возраст древних осадков, покрывающих океаническое дно, всегда увеличивается по направлению от центра к периферии океана. Это установлено по отражающим слоям осадков и подтверждено пробками, взятыми с помощью бурения по профилям, пересекающим весь океан. Аналогичное увеличение возраста установлено и по намагниченности вулканических пород, лежащих под осадками (см. далее в этой главе).

осадков увеличивается с расстоянием от хребта, но в то же время самые старые из них очень молоды по сравнению с породами материков, иногда имеющими возраст свыше 3000 млн. лет.

Подобное возрастное распределение было окончательно доказано в течение 1968—1970 гг., когда при совместном участии четырех американских океанографических учреждений (Объединенного океанографического центра по глубинному отбору проб при Вудсхоллском институте и университетов Калифорнии, Колумбии и Майами) были пробурены скважины вдоль профиля, пересекающего Атлантический и Тихий океаны. Этот проект включал бурение непосредственно через осадки и отбор образцов донных осадков, возраст которых, как было установлено, уменьшается по направлению к середине океана.

Отбор образцов изверженных пород, залегающих под слоем осадков, труден или даже невозможен, за исключением участков на самом гребне хребта, и большинство образцов, полученных в этих районах в ходе драгирования, не может быть точно датировано радиоактивными методами, поскольку этот поверхностный материал уже подвергся химическим реакциям с морской водой. Однако возраст образцов с гребня хребта, подвергшихся коррозии в слабой степени, обычно меньше 10 млн. лет. Совершенно неожиданной оказалась сильная намагниченность изверженных пород, которая позволила датировать их не только в тех местах, где они обнажены на гребне хребта, но и по всем океаническим бассейнам.

В течение многих лет по материалам аэромагнитных съемок составлялись карты аномалий напряженности магнитного поля Земли для океанов. Величина таких аномалий над океанами гораздо больше, что указывает на большую намагниченность океанических пород по сравнению с континентальными (гл. 2). Не было известно, почему аномалии столь интенсивны. Однако сам по себе обнаруженный в 1959 г. факт, что с осью хребта, независимо от того, отмечена она рифтовой долиной или нет, всегда связана особенно сильная магнитная аномалия, оказался очень плодотворным. Отсюда следовало, что там, где несколько долин (как в некоторых местах Индийского океана), можно распознать центральную долину, а там, где долин не существует (например, в восточной части Тихого океана), можно все же определить смещения участков хребта вдоль зон разломов по смещениям центральной аномалии.

В то время когда была обнаружена эта взаимосвязь, Скриппсовским океанографическим институтом были проведены детальные магнитные съемки дна Тихого океана. Было найдено, что магнитные аномалии не беспорядочны, а образуют простые узоры в виде длинных узких полос, причем магнитное поле попеременно то намного выше, то намного ниже среднего значе-

ния. Эти полосы (рис. 29) различаются по ширине, достигая 30 км, и простираются на сотни километров между зонами разломов; они располагаются симметрично по обе стороны зоны разлома. Такая «полосчатая» магнитная структура была приписана полосчатому распределению изверженных пород дна, намагниченность которых знакопеременна, что явно имело связь

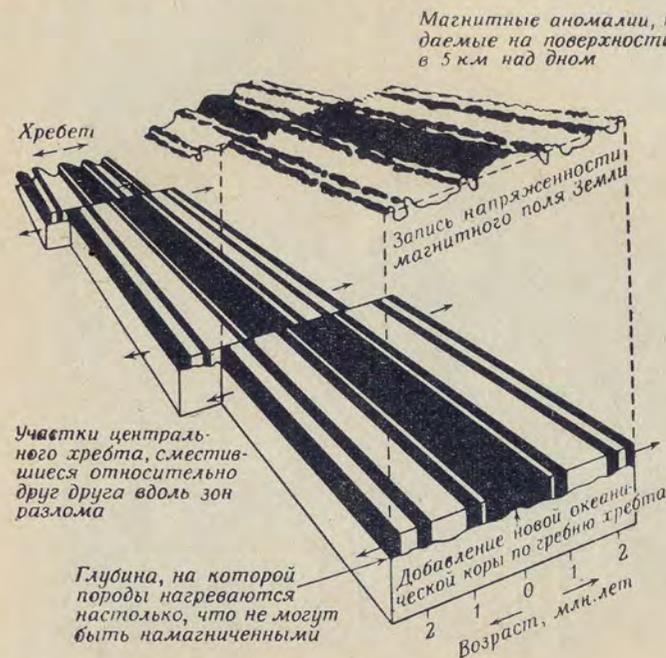


Рис. 29. Магнитные полосовые аномалии на дне океана и их вид при регистрации на поверхности океана. Сильное поле, наблюдаемое на поверхности океана, соответствует намагниченности пород в направлении современного поля (показано черным), слабое — обратной намагниченности (выделено белым). Зоны разломов смещают намагниченные полосы, но на удалении от разлома соответствие полос может быть установлено.

с изменениями полярности магнитного поля Земли. Однако, почему это должно было привести к возникновению такого последовательно линейного узора, оставалось непонятным.

В 1963 г. английские океанографы Вайн и Мэтьюз высказали предположение о происхождении такого «зебroidного» узора (рис. 30). Они предположили, что изверженные породы постоянно внедрялись вдоль оси хребта, где охлаждались и приобретали намагниченность в направлении преобладающего магнитного поля. Затем они постепенно отодвигались в стороны, по мере того как новые порции расплавленных пород вторгались вдоль

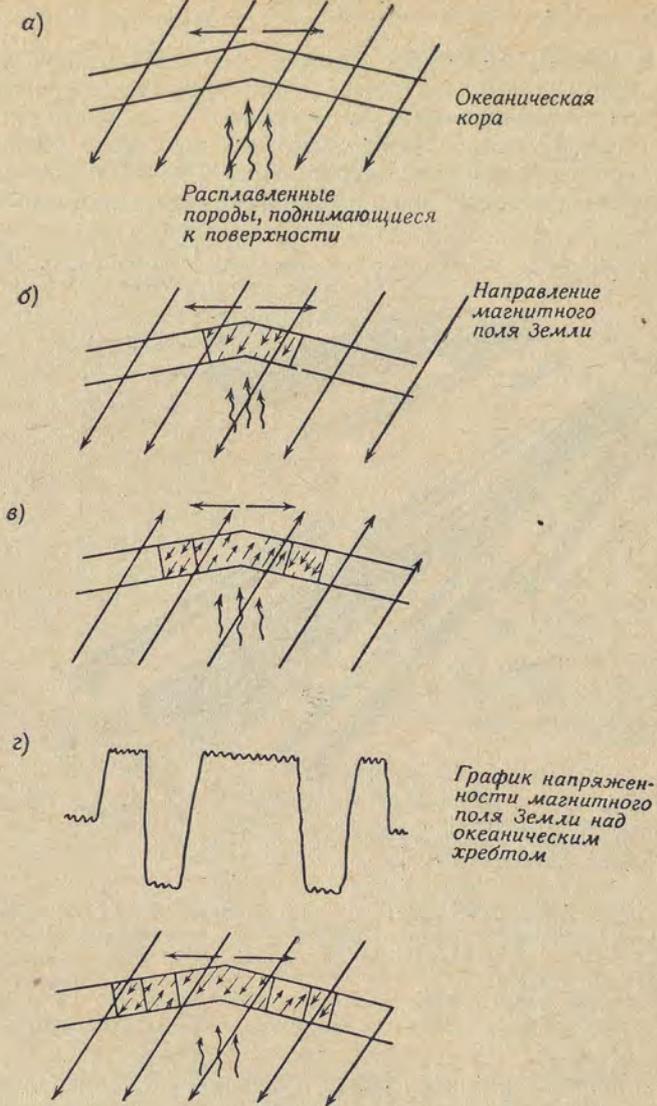


Рис. 30. Происхождение полосовых магнитных аномалий океанического дна. *а* — горячие породы из недр поднимаются к поверхности в центральных областях хребта. *б* — по мере охлаждения породы намагничиваются в направлении преобладающего магнитного поля Земли. *в* — снизу поступают новые расплавленные породы, в то время как ранее поступившие породы смещаются в обе стороны от центра хребта. Новые породы охлаждаются и намагничиваются в направлении поля Земли, которое в это время имеет противоположную полярность. *г* — добавляются следующие породы, которые в свою очередь намагничиваются. Смещившиеся породы сохраняют приобретенную намагниченность; поэтому на корабле, проходящем над этим районом, будет регистрироваться чередование противоположных полярностей.

оси хребта. Эти новые породы в свою очередь намагничивались и таким образом изменения полярности поля Земли фиксировались в породах по обе стороны от центра хребта.



Рис. 31. Рифтовая долина в Исландии. Исландия — одна из немногих областей на земном шаре, где долину срединно-океанического хребта можно увидеть на суше. Эта фотография показывает рифт Тингвеллир-Грабен в юго-западной части острова, где две стороны дна Атлантического океана разделяются по мере отдаления друг от друга Европы и Северной Америки. В процессе такого разделения расплавленные породы из внутренних областей Земли могут достигать поверхности и формировать новое океаническое дно (см. рис. 30).

Подтверждение этого предположения было получено при детальной магнитной съемке расположенного немного южнее Исландии хребта Рейкьянес, являющегося частью Срединно-Атлантического хребта (рис. 31). Эта съемка была начата в 1963 г. по инициативе американского ученого Хесса, пионера многих океанографических исследований, а обработка материалов была завершена в 1967 г. Было установлено, что последовательность

изменений полярности совершенно одинакова на каждой стороне хребта и соответствует диаграмме изменений направления магнитного поля Земли, составленной в 1964 г. (рис. 24).

Это открытие заставило проанализировать все выполненные ранее магнитные наблюдения. В течение 1968 и 1969 гг. было



Рис. 32. Скорость расширения океанического дна, определенная по ширине полос магнитных аномалий. Когда корабль удаляется от центра хребта, он пересекает зоны одинаковой полярности на разных расстояниях в различных океанах. Поскольку возраст последних 15 переполусовок известен (см. рис. 24), можно вычислить скорость, с которой каждая сторона хребта движется от центра. Таким образом, скорость расширения дна в два раза больше скорости перемещения каждой стороны хребта.

установлено, что на всех хребтах (за исключением хребта у берегов Юго-восточной Африки) встречается абсолютно один и тот же узор * чередующихся направлений намагниченности, но в некоторых областях, таких, как Тихий океан, узор шире, чем в других. Поскольку известны точные даты нескольких последних изменений полярности, мы можем подсчитать скорость, с которой расширяется дно океанов.

* Авторы опять преувеличивают. Узор часто похож, но не абсолютно и не везде. — Прим. ред.

Северная Атлантика расширяется на 1 см в год в каждую сторону, в то время как для восточной части Тихого океана эта скорость составляет 5 см в год (рис. 32). К сожалению, мы не знаем точного возраста предыдущих изменений полярности поля Земли (гл. 6). Но мы можем подобрать похожую последовательность изменений полярности в различных частях всех океанов

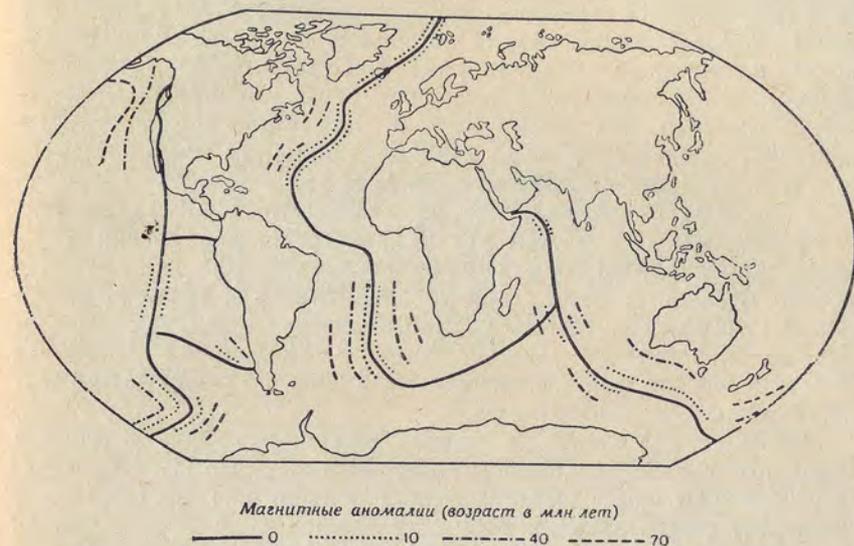


Рис. 33. Магнитные аномалии в океане. Эта карта показывает некоторые из магнитных аномалий, местоположение которых было установлено к 1969 г. Изучение этих аномалий, а также аномалий, открытых позднее в других частях океана, продолжается. Однако общая картина уже установлена, и ее изменения в будущем, вероятнее всего, коснутся лишь деталей (аномалии в Северной Атлантике показаны несколько более детально на рис. 29).

так, что если мы используем скорости разрастания, вычисленные по известной шкале изменения полярности, то потом сможем установить возраст и этих ранее неизвестных полосчатых аномалий (рис. 33). В общем, возраст этих более древних магнитных аномалий меньше 80 млн. лет. В Атлантическом (рис. 28) и Индийском океанах эти аномалии наблюдаются очень близко к материковым склонам. Такое определение возраста, по всей видимости, верно, поскольку оно соответствует возрасту осадков и согласуется с данными, рассмотренными в следующей главе. Оно согласуется и со всеми остальными нашими обоснованиями хронологии последних стадий дрейфа материков.

ГЛАВА 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ДРЕЙФА

Определение времени движения материков требует намного более точных данных, чем простая демонстрация того факта, что подобное движение действительно имело место. Поэтому наша информация ограничивается в основном областями, о геологии которых наши знания наиболее полны, — главным образом материками, граничащими с Северной Атлантикой, и другими областями, где были проведены подробные исследования. Конечно, эта информация в настоящее время немногочисленна, поскольку раньше уделялось слишком мало внимания поиску подтверждений общей идеи дрейфа.

В тех частях океана, где узор магнитных аномалий расшифрован, мы уже можем установить время разделения материков, происходившего в течение последних 100 млн. лет. Но во всех остальных местах для установления как времени первоначального разлома самого крупного массива суши, так и последующих скоростей раздвижения блоков, мы должны полагаться на геологические и палеомагнитные данные, полученные при изучении континентальных пород.

300 млн. лет назад, в конце каменноугольного и начале пермского геологических периодов, возвышенные участки суши всего земного шара были сгруппированы в два места смыкающихся суперматерика разных размеров (рис. 34, а), причем материки в том виде, как мы их знаем теперь, были уже различными их частями. Такое расположение, с очень небольшими изменениями, сохранялось последующие 150 млн. лет; поэтому удобно считать 300 млн. лет назад началом истории разделения материков, имея в виду, что это всего лишь $1/15$ часть продолжительности существования Земли.

Гондвана, включающая Южную Америку, Африку, Индию, Австралию и Антарктиду, располагалась так, что ее южная часть была покрыта полярной ледяной шапкой, в то время как северные области находились в тропических широтах. Северная Америка, Европа и Азия составляли Лавразию, пересекавшуюся в то время экватором.

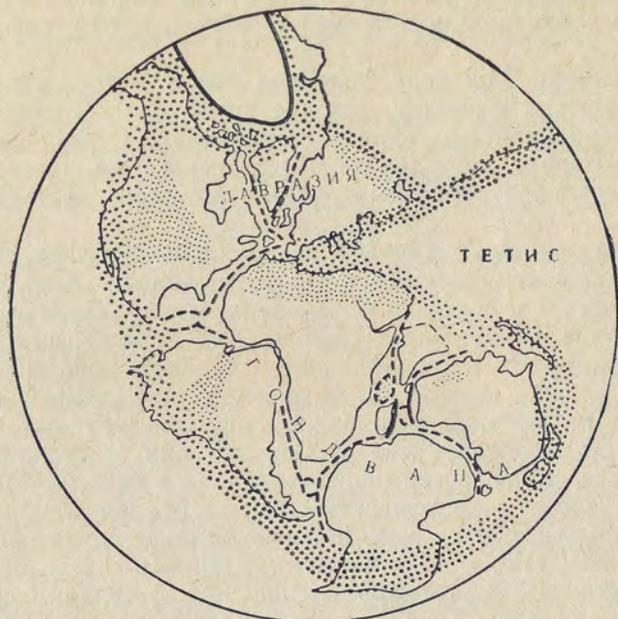
Вокруг этого огромного массива суши располагались длинные прогибы, в которых накапливались осадки и обломки материковых пород. Эти прогибы в дальнейшем превратились в современные альпийско-гималайский и тихоокеанский горные пояса, но в то время и в течение большей части их последующей истории они были местами наибольшей геологической активности; это видно по многочисленности вулканов, располагавшихся в основном со стороны океана (география этих прогибов

была удивительно сходна с современным распределением глубоководных океанических желобов, обсуждаемых в следующей главе).

Лавразию и Гондвану разделял океан Тетис. Он сужался по направлению к западу, так что эти суперматерики соединялись: Северо-западная Африка примыкала к Северной Америке и Южной Европе, хотя довольно часто места соединения покрывали мелкие моря, мешая миграции сухопутных растений и животных.

Большая часть Гондваны в то время была сушей, представлявшей собой огромную чашеобразную область. Она разрушалась ветрами и реками, которые переносили обломки пород в более низкие центральные районы или вообще выносили их прочь с материка в окружающие его прогибы. Мелкие моря, принадлежавшие южной части океана Тетис, покрывали некоторые части Северной Африки, Индии и Северо-восточной Австралии, но в последующие 50 млн. лет они отступили так же, как и мелкие моря, которые существовали в бассейне Амазонки. Многие разломы уже существовали, что предопределяло последующее формирование как Южной Атлантики, так и Индийского океана. Имеются, в частности, данные о том, что в этот период вблизи Мадагаскара и Западной Австралии существовал Протоиндийский океан — небольшое, окруженное сушей море, подобное современному Средиземному морю. Западная часть Австралии в течение предыдущих 100 млн. или даже 200 млн. лет представляла собой активно опускающуюся область, но по мере опускания она заполнялась осадками, нанесенными с Австралийского материка, и только редко погружалась настолько глубоко, что ее покрывали морские воды. Сходная ситуация существовала и вдоль окраины Восточной Африки, где в оседающем прогибе накопилось 7—8 км осадков, снесенных с суши. Мы не имеем доказательств, что этот прогиб лежал ниже уровня моря, за исключением очень короткого периода около 250 млн. лет назад, когда моря простирались от западного побережья Индии до Мадагаскара. (Площадь между Мадагаскаром и Африкой в настоящее время представляет собой глубокий океан, но дно ее, по-видимому, — это тот же самый прогиб, содержащий главным образом осадки, принесенные с суши. Поэтому кажется вероятным, что уже 300 млн. лет назад Мадагаскар был отделен от Африки.)

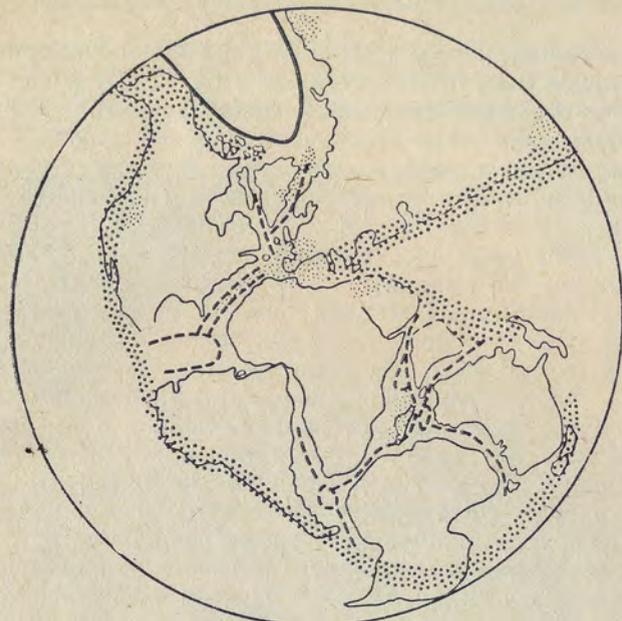
В течение последующих 150 млн. лет (рис. 34, б) Гондвана изменилась очень мало, если не считать того, что она постепенно смещалась в северном направлении. Это перемещение, по-видимому, сопровождалось общим улучшением климата на нашей планете, которое продолжалось до тех пор, пока северные материки не начали окружать северные полярные области около



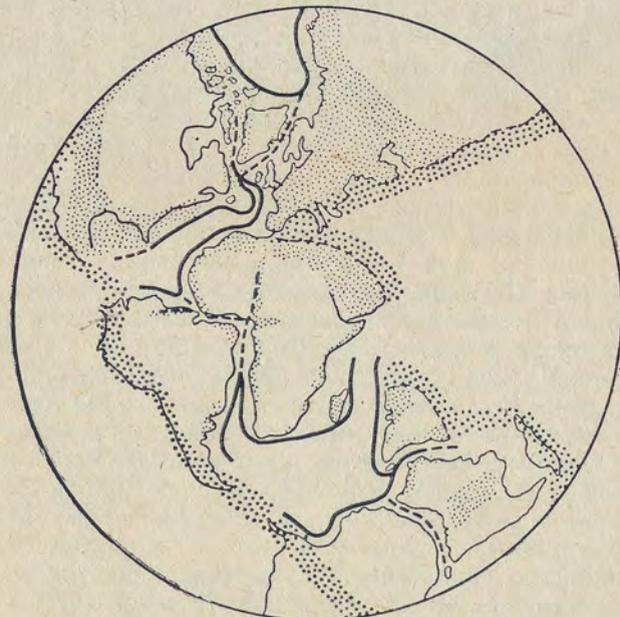
 Впадины, окаймляющие материки, в которых накапливались большие толщи осадков. В конце концов из них сформировались наши современные горы

 Мелкие моря на материках

а) 300 млн лет назад



б) 200 млн лет назад



в) 100 млн лет назад

Рис. 34. Расположение материков на земном шаре: 300 млн. лет (а), 200 млн. лет (б) и 100 млн. лет назад (в). На трех схемах сделана попытка проиллюстрировать взаимное расположение материков в разное время. Указания на присутствие или отсутствие мелких морей отражают лишь общую картину в каждый данный период времени. Широты и долготы не указаны (проекция стереографическая, с центром в Африке), поскольку наши сведения об их точном положении в настоящее время не достаточно достоверны. Тем не менее можно отметить, что Гондвана в основном двигалась от полярных областей к экваториальным (ср. с рис. 18), а Лавразия постепенно дрейфовала к северу. Жирными линиями отмечено положение уже раскрывшихся разломов, которые затем образовали Индийский и Атлантический океаны. Разломы, которые уже возникли, но еще не раскрылись, показаны пунктирными линиями. Небольшие перемещения внутри материков, такие, как поворот Патагонии вокруг Африки или перемещения Западной Антарктиды относительно Восточной, на схемах не отображены.

3 млн. лет назад. (Связь между ледниковым периодом и дрейфом материков мы будем обсуждать в гл. 10.) К концу данного периода эта огромная чаша постепенно превратилась в ряд отдельных бассейнов, хотя в основном картина эрозии и осадконакопления осталась неизменной.

Внезапно в этой картине произошли сильнейшие нарушения — примерно в одно и то же время огромные потоки базальтовой лавы разлились по всем южным материкам, покрывая многие тысячи квадратных километров. Размеры этих потоков указывают, что Гондвана должна была буквально плавать на подушке из расплавленных пород, которые излились, когда уже существовавшие трещины медленно раскрылись и, соединяясь одна с другой, образовали разлом, разделивший Гондвану на современные материки. Излияния лавы произошли около 160 млн. лет назад в Австралии (долериты Тасмании), Индии (траппы Раджмахал), Среднем Востоке (траппы Йемена), Антарктиде (Феррарские долериты) и Южной Африке (траппы Карру). Единственным гондванским материком, избежавшим последствий этого первого взрыва вулканической активности, оказалась Южная Америка, где потоки излившейся лавы (Сьерра-Гераль) не появлялись еще в течение 40 млн. лет; их появление совпало с новыми извержениями в Южной Африке.

Излияние лавы способствовало тому, что территории, лежащие вблизи разломов, погружались, образуя бассейны, где собиралась и испарялась вода, оставляя пласты соли, которые можно найти и теперь у границ большинства южных материков. По мере того как эти области погружались еще ниже, узкие полосы морской воды распространялись от океана Тетис вдоль краев материков, образуя морские бассейны, ставшие впоследствии современными лужоками океанами.

Можно проследить, как эти напоминавшие современное Красное море (рис. 35) или Калифорнийский залив узкие мелкие моря примерно 150 млн. лет назад распространялись к югу, между Индией и Сомали, и соединялись с морями, уже существующими около Мадагаскара. Спустя еще около 10 млн. лет подобные моря распространились вдоль восточного побережья Индии, отделив Австралию, которая в это время была почти полностью покрыта большими мелководными пресными озерами. По-видимому, наступление таких краевых морей в южном направлении замедлялось, поскольку их следы вдоль Мозамбикского пролива и ниже, у восточного побережья Южной Африки, удается обнаружить не ранее чем через 60 млн. лет. К сожалению, большинство свидетельств существования этих морей находится в настоящее время под водой. Для того чтобы проследить их эволюцию, мы можем полагаться только на отдельные участки морских отложений, оставшиеся на краях материков,

где сейчас суша. Таким образом, нельзя сказать совершенно точно, когда эти моря достигли мыса Доброй Надежды. Еще сложнее обстоит дело, когда речь идет о разделении Австралии и



Рис. 35. Северная часть Красного моря и Синайский п-ов (снимок со спутника). Красное море образовалось в течение последних 5 млн. лет, когда Аравийский п-ов отделился от Африканского материка и между ними образовалась новая океаническая кора. Подобным путем отделился от основного Американского массива суши и Калифорнийский п-ов, когда новая океаническая кора начала формироваться в Калифорнийском заливе. Эти области находятся в самых ранних стадиях образования океана (рис. 49) и сходны с Северной Атлантикой 150 млн. лет назад. Видимо, образование таких рифтов связано с размещением многих ценных руд, поэтому знание эволюции океана может иметь большое практическое значение.

Антарктиды, поскольку почти все доказательства скрыты морем или льдом. Тем не менее излияния базальтов указывают на то, что некоторое растрескивание земной коры должно было возникнуть около 160 млн. лет назад, однако почти весь процесс

разделения, согласно океанографическим данным (гл. 7), происходил в течение последних 60 млн. лет, т. е. в то же время, когда один крупный разлом превращался в Индийский океан. К этому вопросу мы еще вернемся ниже.

Вдоль восточного побережья Южной Америки и на противоположной ей стороне Африки имеется гораздо больше свидетельств пути, которым краевые моря продвигались вдоль современного побережья. Этому вопросу посвящено подробное исследование английского стратиграфа Реймента. Моря достигли Юго-западной Африки 120 млн. лет назад, Конго — около 10 млн. лет спустя и Нигерии — 105 млн. лет назад. Такое продвижение сопровождалось серией наступлений и отступлений, причем с каждым наступлением моря продвигались все дальше на север, до тех пор пока вода не заполнила почти все пространство между Африкой и Южной Америкой, что произошло около 100 млн. лет назад (рис. 34, в). В это время моря заполняли разлом, который прорезал массив Африки от Нигерии до Алжира и почти соединялся со Средиземным морем. Однако вместо того, чтобы идти дальше вдоль этого разлома, следующее наступление увело моря на запад, связав их с краевыми морями, которые медленно продвигались к востоку между Африканским массивом и северной Бразилией. Таким образом, 92 млн. лет назад краевые моря слились, окончательно отделив Африку от Южной Америки.

Последующая история Индийского океана и Южной Атлантики раскрывается при изучении палеомагнетизма пород дна и пород на материках. Хотя зарождение Индийского океана произошло около 160 млн. лет назад, а Южной Атлантики — около 120 млн. лет назад, существенного расширения их площади вплоть до момента около 100 млн. лет назад не последовало. В период между 100 млн. и 80 млн. лет назад Южная Америка повернулась относительно Африки прежде, чем начала перемещаться на запад к своему нынешнему местоположению. В то же время Индия отошла от Африки и двинулась на север, пока наконец не столкнулась с Азией. Австралия и Антарктида, по-видимому, отошли от Африки и перемещались вместе в течение 20—30 млн. лет. В последующие 50—60 млн. лет они окончательно разделились и заняли современные положения. Африка в это время незначительно повернулась и переместилась на север, где пришла в соприкосновение с Европой.

В начале этого периода продолжительностью 300 млн. лет Лавразия лежала в общем ниже, чем Гондвана, за исключением Аппалач-Каледонских гор, Урала и гор Восточной Сибири, которые были достаточно высоки и лишь постепенно разрушались в течение последующих 50 млн. лет. Большая часть Северной Америки была покрыта морем, сходным с нынешним Гудзоно-

вым заливом, которое в следующие 150 млн. лет медленно отступало к югу и западу. Европа к западу от Урала в течение большей части последующих 200 млн. лет также была покрыта мелкими и несколько меняющимися время от времени свое положение морями, распространяющимися на север от продолжавшего существовать океана Тетис. На Дальнем Востоке прогибы, заполненные морскими осадками, занимали большую часть Северо-восточной Азии; некоторые из них отделяли в начале этого периода Китай от основного массива Лавразии. Хотя большая часть Азии оставалась сушей на протяжении всей последующей истории, прогибы над некоторыми областями Китая и Западной Сибири разрослись в мелкие моря.

Первая мощная геологическая активность, помимо активности вдоль краевых прогибов, имела место в Сибири 200 млн. лет назад, когда потоки базальта толщиной до 2,5 км распространились по площади свыше 500 000 кв. км. (Эти извержения почти наверняка связаны с некоторыми главными движениями материков — возможно, смыканием Китая и основного азиатского массива. Однако доказательства, которыми мы располагаем относительно этих мест и большей части Дальнего Востока, слишком малочисленны, чтобы в данный момент правильно восстановить прошлое.)

Основная система разломов, которым предстояло слиться и раскрыться, чтобы образовать Северную Атлантику, уже существовала 300 млн. лет назад; в течение предыдущих 50 млн. лет именно она определила месторасположение богатых металлодержущих руд, главным образом серебра и цинка, которые в настоящее время имеются на Ньюфаундленде и Британских островах. Однако далее на юге разделение только началось; хотя в начале этого периода северные материи были связаны с Гондваной, Северная Америка отделилась от Африки немного больше 200 млн. лет назад. Этот разрыв, образовавший прото-Центральную Атлантику, повлек за собой извержение лавы как в Северной Америке, так и в Марокко, хотя и не в таком масштабе, как огромные извержения в Сибири или на южных материках. Такое движение оставило Европу все еще связанной с Северной Америкой, но привело к образованию мелкого моря шириной 300—400 км, в котором накопился слой осадков толщиной 3—4 км. Этот слой можно обнаружить вдоль восточного края атлантического материкового склона Северной Америки. Первоначальное перемещение, по-видимому, не было особенно значительным или быстрым и прекратилось, возможно, раньше начала следующей фазы движения, которая имела место около 120 млн. лет назад. С этого времени Атлантика расширяется примерно до $\frac{1}{4}$ ее нынешней ширины и смыкается с Лабрадорским морем, которое образовывалось на юге между Гренландией

и Канадой. 70—80 млн. лет назад этот этап развития сменился современным, более быстрым этапом роста Атлантики между Европой и Гренландией, по-видимому, в результате извержения базальтовых потоков в обеих областях. Рост Лабрадорского моря в это время прекратился.

Таким образом мы сталкиваемся с довольно сложной картиной происхождения современных океанов, в которой, однако, имеются некоторые общие черты. В частности, большинство разломов существовало задолго до того, как они раздвинулись настолько, что стало возможным извержение лавы; в последующий за этим период (между 150 млн. и 100 млн. лет назад) скорость разделения была, в общем, незначительна. Отсюда следует, что около $\frac{2}{3}$ дна океанов Земли сформировалось в течение последних 80 млн. лет.

Гораздо труднее выявить общие черты в развитии прогибов, окаймляющих материки. Большинство из них имеет долгую неспокойную историю. Неоднократно различные области подвергались сжатию и интрузии изверженных пород. Геологическая активность особенно сильно проявлялась в начале последних 300 млн. лет и сохранялась в течение большей части последующей истории. За последние 20 млн. лет все эти прогибы подверглись сходным воздействиям. Наиболее интенсивную деформацию они претерпели в последние 10 млн. лет, когда большинство из них превратилось в горы, с которыми мы встречаемся сегодня. Легко объяснить основное нарушение прогибов океана Тетис как результат сжатия, возникшего между движущимися на север южными материками (Африкой и Индией) и медленно движущимися северными материками (Европой и Азией). Большую часть сжатия тихоокеанских прогибов, происходившую в течение последних 70—120 млн. лет, можно непосредственно связать с движением материков. Однако не ясно, почему прогибы претерпели наиболее интенсивные сжатия и взбросы лишь в сравнительно недавнее время. Возможно, в течение последних 10 млн. лет произошли изменения в силах, вызывающих дрейф материков (дальнейшее обсуждение см. в гл. 10).

Таким образом, мы имеем для большей части последних 300 млн. лет вполне приемлемую картину общей эволюции дрейфующих материков*. При исследовании более ранних периодов мы должны полагаться на палеомагнитные и геологические аргументы. К сожалению, в настоящее время имеется очень мало палеомагнитных данных, касающихся более древних пород материков. К тому же эти древние породы трудно датировать точно, главным образом потому, что ископаемые остатки организмов

* У разных исследователей эта картина получается весьма различной. — *Прим. ред.*

можно использовать с этой целью лишь для последних 570 млн. лет (гл. 3).

Мы располагаем некоторыми предположениями о движении материков 400—450 млн. лет назад. В Шотландии и северном Ньюфаундленде можно найти идентичные ископаемые остатки мелководных морей возрастом около 500 млн. лет. Эти ископаемые остатки совершенно четко отличаются от ископаемых других мелких морей того же возраста, которые находят в Англии и южном Ньюфаундленде. В то же время доказательств существования какого-либо барьера на суше между этими северными и южными областями нет. Английский геолог Деви предположил, что эти остатки принадлежат организмам, населявшим древний океан у его противоположных берегов. Материки, ограничивавшие этот океан, дрейфовали по направлению друг к другу около 450 млн. лет назад. Они сжали океанические осадки в Аппалач-Каледонскую горную систему и примерно на 50 км надвинулись один на другой, принеся с собой остатки организмов, вымерших еще будучи разделенными тысячами километров.

Весьма вероятно, что мы рассматриваем лишь последнюю фазу движения материковых масс Земли и что существовало много иных, предшествующих картин взаимного расположения суши и океана. Поэтому следует рассмотреть природу сил, которые постоянно изменяют лик Земли

ГЛАВА 9

ПРИЧИНЫ ДРЕЙФА

Силы, вызывающие такие огромные перемещения земной поверхности, должны быть сосредоточены в недрах Земли. Никакая внешняя сила не может вызвать на вращающейся и движущейся по орбите планете постоянные перемещения, направленные в противоположные стороны. До недавнего времени большинство исследователей сомневались в существовании таких сил, однако наши современные знания о внутреннем строении Земли допускают наличие подобных сил. Поскольку на основе данных, полученных при исследовании дна океанов, следует признать справедливость теории материкового дрейфа, мы можем теперь рассмотреть, каким образом действуют эти силы.

Наши представления о внутреннем строении Земли основываются главным образом на исследовании звуковых волн. Когда происходят достаточно сильные землетрясения или атомные взрывы, сильные звуковые (сейсмические) волны, распространяющиеся от места возмущения, могут быть зарегистрированы после того, как они пройдут через недра Земли, что дает нам

картину их строения, подобную рентгеновскому снимку. Имеются два типа таких сейсмических волн — поверхностные и объемные; их скорость и интенсивность зависят от физического состояния и химического состава пород, через которые они проходят.

Поверхностные волны, распространяющиеся более медленно, чем объемные, называются так потому, что их гребни всегда движутся по поверхности Земли. В то же время поверхностные волны дают нам подробную информацию о внутреннем строении Земли, так как глубина их проникновения зависит от длины волны. Исследуя поверхностные волны с малой длиной, мы получаем представление о физических свойствах близкой к поверхности части Земли; изучение более длинных волн дает нам усредненные характеристики для больших глубин и т. д. Таким путем мы можем создать достаточно подробную модель строения Земли.

Далее, существуют два типа объемных волн, которые распространяются внутри Земли по всем направлениям. Более быстрые волны *P* могут проходить как сквозь твердые тела, так и жидкости; более медленные волны *S* могут распространяться только в твердых телах. На основе измерений различных характеристик объемных волн и времени их «прибытия» на сейсмические станции в начале XX в. была разработана предварительная картина внутреннего строения Земли. В последнее время в результате исследований с помощью приборов и методов, используемых для наблюдений за испытаниями ядерного оружия, а также с привлечением новых методов изучения поверхностных волн эта картина была несколько изменена в деталях, весьма существенных для понимания дрейфа материков.

Земля (рис. 36) содержит ядро радиусом 3490 км, что несколько больше половины радиуса Земли (6371 км*). *S*-волны не проходят через внешнюю часть ядра, что указывает на его жидкое состояние (имеется в виду жидкость в физическом смысле, т. е. без «жесткости», иными словами, без сопротивления сдвигу). Но поскольку вещество ядра находится при высокой температуре и под колоссальным давлением — более чем в миллион раз выше атмосферного, — его поведение отлично от поведения жидкости на поверхности Земли. Внутри жидкого внешнего ядра имеется небольшое очень плотное твердое внутреннее ядро.

Ядро окружено твердой мантией, состоящей из вещества, сходного с наиболее плотными породами, находимыми на поверхности Земли. Мантия — наибольшая по объему и массе часть Земли. Первоначально предполагали, что плотность пород

* В оригинале было приведено явно ошибочное значение радиуса Земли (6415 км). — Прим. ред.

мантии постепенно увеличивается по мере роста давления с глубиной. В настоящее время стало известно, что это увеличение плотности с глубиной происходит не плавно, а в виде отдельных скачков. Каждый из этих «разрывов» плотности отмечает глубину, на которой вес вышележащих пород заставляет атомы в кристаллической структуре специфического минерала перестраиваться в более компактную структуру.

Изучать в лаборатории указанные изменения плотности нелегко, поскольку трудно воспроизвести высокие давления и температуры, существующие внутри мантии. Пока мы можем имитировать физические условия, существующие на глубине около



Рис. 36. Схема внутреннего строения Земли по сейсмическим данным.

150 км (хотя можно создать на малые доли секунды — например, при ударе пули в мишень — давления, более высокие, чем в центре Земли). На основе работ по физике высоких давлений австралийский геохимик Рингвуд смог предсказать глубины фазовых переходов для минералов, образующих большую часть мантии. Например, оливин (железо-магниевый силикат), основной компонент пород мантии, будет переходить из нормальной поверхностной структуры в более плотную гранатовую на глубине 300 км; затем на глубине 400 км он перейдет в более плотную шпинелевую, которая на глубине примерно 800 км превратится в еще более компактную структуру.

Земная мантия покрыта корой (рис. 37) с переменной толщиной и составом. На материках кора обычно имеет толщину около 20 км, несколько толще кора под старыми разрушенными горами и много толще (до 40 км) под современными горными цепями. Как мы видели, состав пород, образующих кору материков,

различен. Близко к поверхности средняя плотность $2,67 \text{ г/см}^3$, ближе к подошве коры плотность увеличивается до $2,7 \text{ г/см}^3$ *. Граница между континентальными породами и плотными ($3,3 \text{ г/см}^3$) породами верхней мантии выражена очень резко и называется разрывом Мохоровичича по имени югославского геофизика, открывшего ее в 1909 г. при изучении сейсмических записей землетрясения в Хорватии (Югославия).

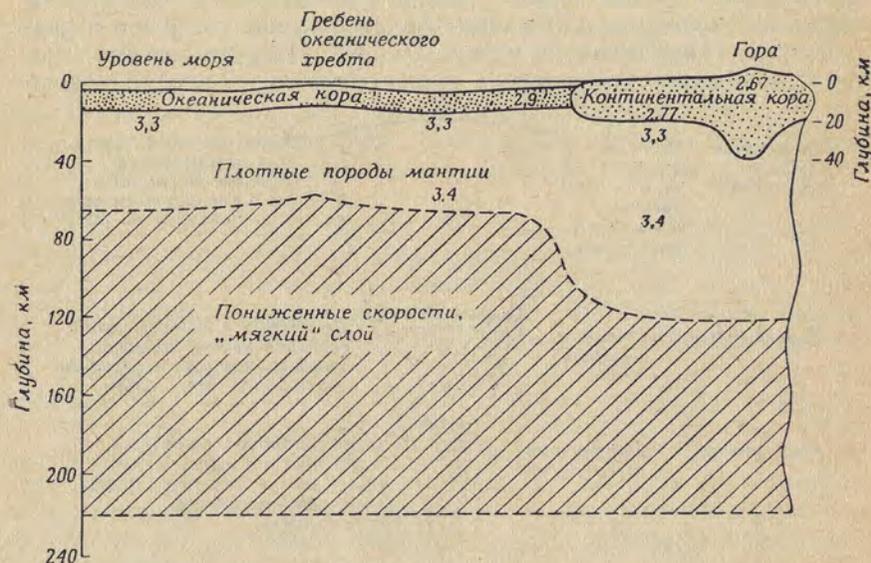


Рис. 37. Кора и верхняя мантия.

Разрыв Мохоровичича может быть также прослежен под океаническими бассейнами, где породы мантии с плотностью $3,3 \text{ г/см}^3$ резко контрастируют с породами океанической коры, имеющими плотность $2,9 \text{ г/см}^3$. Океаническая кора имеет равномерную толщину около 8 км и образована тремя различными слоями. Верхний слой сложен осадками, которые мы рассматривали в гл. 7. Они покрывают слой изверженных пород, верхняя полукилометровая часть которого содержит «магнитную информацию», используемую при определении возраста океанического дна. Основная часть океанической коры толщиной 4—5 км сформирована более плотными изверженными породами.

Таким образом, между океанической и материковой корой имеются четкие различия; некоторые из них мы использовали

* Обычная толщина материковой коры 30—45 км, под горами до 70 км; плотность у подошвы коры около 2,9. — Прим. ред.

в гл. 2 при определении границ материка. Одно из этих различий заключается в том, что материковая кора утолщается в тех местах, где суша выше, а толщина океанической коры под горными хребтами, возвышающимися над обычным дном океана на 4 км, остается почти постоянной. Сначала думали, что эта особенность свидетельствует о присутствии больших количеств вещества мантии под горными хребтами, чем под остальным ложем океанических бассейнов, однако исследования, проведенные

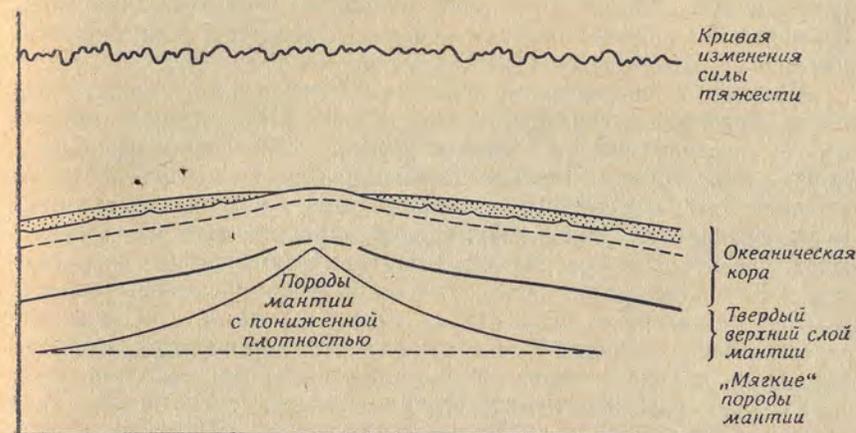


Рис. 38. Поперечный разрез срединно-океанического хребта. Ровное в общем гравитационное поле над хребтом показывает, что превышение хребта над окружающим дном океана скомпенсировано породами с более низкой плотностью внутри мантии. Присутствие этих пород было впоследствии обнаружено при сейсмических наблюдениях.

при помощи гравиметров (гл. 2), показали, что это не так; общая масса пород под океаническими хребтами такая же, что и под остальным дном океана. Это значит, что породы мантии под хребтами должны иметь более низкую плотность и поэтому занимать больший объем. Такая интерпретация гравиметрических наблюдений подтвердилась впоследствии и сейсмическими исследованиями вдоль профилей, пересекающих горный хребет. В настоящее время по материалам обоих этих геофизических методов построены схемы уменьшения мощности менее плотного материала мантии по направлению от оси хребта к периферии (рис. 38).

Еще в 1926 г. американский сейсмолог Гутенберг предполагал наличие крупномасштабных уменьшений плотности вещества внутри мантии. Это предположение получило подтверждение только в последнее десятилетие в работах по исследованию объемных волн, возникающих при атомных испытаниях, и по

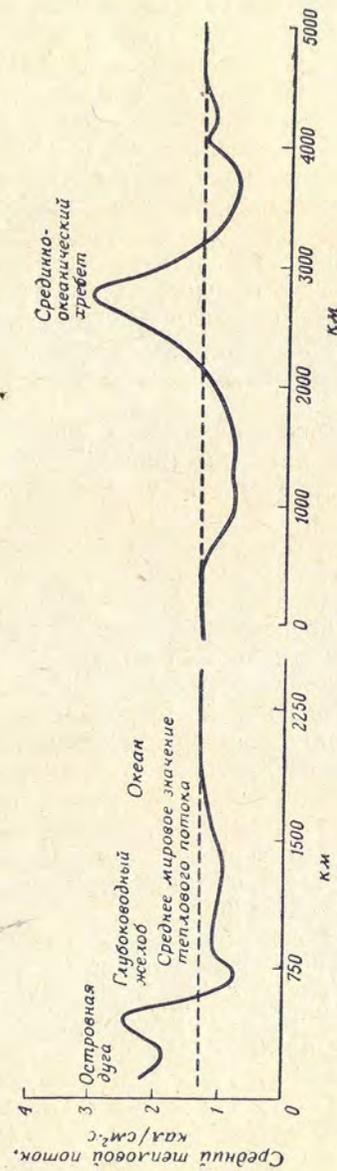
исследованиям поверхностных волн от землетрясений. При изучении волн от атомных взрывов место и время возникновения сейсмического возмущения известны, чего не бывает при изучении волн от землетрясений. Тем не менее именно при исследовании землетрясений в Чили в 1960 г. и на Аляске в 1964 г. внутри мантии был обнаружен слой пониженной плотности*. Этот «мягкий» слой (рис. 35) лежит в верхней части мантии, начиная от 60 км под океанами и 120 км под континентами, и достигает глубины 200—250 км. Этот слой, очевидно, играет важную роль, и работы по подробному изучению его свойств и расположения активно продолжаются в настоящее время.

Причина существования такого «мягкого» слоя низкой плотности кажется очевидной, поскольку на этой глубине породы почти расплавлены, а следовательно, менее плотны. Земля внутри явно горячее, чем на поверхности, о чем свидетельствуют температуры, измеренные в стволах шахт, буровых скважинах и вулканических лавах. Измерения, проведенные на территориях, где отсутствуют активные тектонические процессы, например в южноафриканских золотых копях и европейских угольных шахтах, показывают возрастание температуры на 17°C на каждый километр глубины**, и этот градиент, вероятно, сохраняется вплоть до «мягкого» слоя, где породы мантии нагреваются почти до температуры плавления. Однако дальше с глубиной такой градиент температуры не может сохраняться, поскольку в этом случае породы мантии были бы полностью расплавлены, чего не подтверждают сейсмические наблюдения.

Хотя количество тепла, выделяющегося из недр Земли, определялось на суше уже в течение многих десятилетий, измерения, позволяющие охарактеризовать Землю в целом, начались лишь после 1954 г., когда Буллард разработал прибор для измерения величины теплового потока, проходящего через донные океанические осадки. Этот прибор подобен обычной геологической трубке, используемой для взятия проб глубинных океанических осадков (гл. 7), но несколько модифицирован для измерения температуры толщи осадков на различных уровнях. Вскоре было обнаружено, что величины теплового потока из мантии, измеренные в океанических районах, имеют региональные вариации: высокие значения потока наблюдаются близ океанических горных хребтов, а низкие — около глубоких океанических впадин (рис. 39).

* Пониженная плотность этого слоя не доказана; установлено лишь уменьшение скорости сейсмических волн, проходящих через этот слой. — Прим. ред.

** Следует указать, что в разных местах этот вертикальный градиент температуры весьма различен. — Прим. ред.



Р и с. 39. Тепловой поток над океаническими хребтами и желобами. На графиках приведено среднее значение теплового потока; отдельные наблюдения над центральными районами хребта дают очень большой разброс показаний, причем некоторые значения в 10—20 раз выше среднего мирового значения. Над большей же частью океанического дна тепловой поток равен.

Аналогичные горизонтальные неоднородности плотности мантии были недавно обнаружены при гравиметрической обработке наблюдений орбит спутников. Полученные результаты однозначно интерпретируются как региональные вариации плотности внутри мантии. Поскольку внутри мантии существуют вариации как плотности, так и температуры, то можно с большей вероятностью предположить, что здесь имеет место циркуляция вещества. Горячий, менее плотный материал поднимается к поверхности, растекается вширь, охлаждается и, став более плотным, погружается обратно в глубину. Такая циркуляция будет перемещать верхний твердый покров мантии и кору Земли (т. е. породы, лежащие на «мягком» слое) от горячих (поднимающихся) областей к более холодным (погружающимся) областям, образуя таким образом систему конвективных потоков, сходных с теми, существование которых было предположено в 1928 г. Холмсом.

Твердое состояние мантии, доказанное сейсмическими данными, как будто противоречит существованию конвективных потоков. Однако, когда мы рассматриваем поведение твердых тел под действием нагрузки, мы обнаруживаем, что они на самом деле обладают пластичностью (текучестью). Например, лед — безусловно твердое вещество, и все же ледники не только скользят вниз, но действительно текут; аналогично под действием длительного давления течет каменная соль, и даже гранит течет, если на него постоянно, в течение тысячелетий, действуют силы. Сейсмические волны, проходящие сквозь Землю в течение минут (около 20 мин от землетрясения до противоположной точки на поверхности Земли), не дают нам никаких сведений о пластических свойствах пород мантии, которые не оказывают на сейсмические волны никакого влияния за время их прохождения и проявляются лишь под действием сил, действующих миллионы лет. Способность по крайней мере некоторых пород мантии течь под постоянно действующим давлением можно видеть на многих примерах из области геологии.

В течение нескольких последних тысяч лет огромная ледяная шапка, некогда покрывавшая Скандинавию, растаяла. Пока существовало оледенение, нижележащая кора находилась под постоянным давлением веса льда. После исчезновения льда вся Скандинавия начала подниматься, и ей нужно подняться еще метров на 100, чтобы достигнуть прежней высоты в центре Швеции. Такое движение коры показывает, что материал мантии должен быть способен оттекать в то время, когда кора нагружена, и затем притекать обратно, когда нагрузка удаляется. Имеется много других примеров изостатических движений. Так, местность вокруг Солт-Лейк-Сити поднялась, когда озеро Бонневилль, бывшее когда-то огромным, испарилось, оставив после

себя гораздо меньшее Большое Соленое озеро. В большем масштабе это явление выражено вдоль западного края Австралии, где в течение по крайней мере 400 млн. лет происходит погружение коры. Одновременно это понижение заполняется осадками, толщина которых достигает в настоящее время 7—8 км. В противоположность этому Колорадское плато на западе США поднялось в течение последних нескольких миллионов лет на 2 км; следовательно, породы мантии заполняли снизу этот объем с такой же скоростью, как и происходил подъем. Даже человек вызвал некоторое перетекание материала мантии: например, вода, поднятая плотиной Боулдер-Дам, достаточно тяжела для того, чтобы слегка вдавить в мантию земную кору. Вполне реальны наблюдения за колебаниями коры континентальных шельфов под влиянием океанических приливов.

Таким образом, если породы мантии способны течь, под влиянием различий температуры и плотности возникнет движение. Согласно последним расчетам, поток вещества от горячих областей к холодным может возникнуть при очень небольшой разнице температур. Следовательно, можно считать решенным вопрос о существовании конвективных потоков в верхней мантии*. Последние сведения о дне океанов показывают, что эти потоки выносят горячий мантийный материал наверх, в центры океанических горных хребтов, а затем растекаются в противоположных от оси хребта направлениях. Поступление нового материала коры логически требует либо расширения Земли в целом, либо сжатия поверхности в складки, либо погружения поверхностного материала в глубь Земли.

Гипотеза расширения Земли имеет длинную и интересную историю, однако последние наблюдения показали, что какое-либо расширение вряд ли вероятно или настолько незначительно, что оно не является существенным в течение по крайней мере последних 1000 млн. лет. Это было подтверждено путем подсчета числа дней в году и в месяце в течение геологического прошлого. Такие данные можно получить для последних 400 млн. лет, изучая ростовые кольца на девонских кораллах. Эти кораллы имеют дневные ростовые кольца, аналогичные годовым кольцам деревьев; кроме того, у кораллов дневные ростовые кольца накладываются на месячные и годовые ростовые узлы. Подсчет этих колец показывает, что в те времена в году было 400 суток; это значит, что Земля вращалась быстрее, но недостаточно быстро, как это требовалось бы для Земли, намного меньшей по

* Существование тепловой конвекции в Земле весьма сомнительно. Она возможна лишь в однородном веществе. Если содержание более тяжелых минералов в мантии немного возрастает с глубиной, то конвекция исключается. Есть и другие веские доводы против гипотезы конвекции в земной мантии. — *Прим. ред.*

размерам, чем современная. Определенная по кораллам скорость вращения фактически соответствует той величине, которую можно рассчитать по современной скорости с учетом приливного торможения. Кроме того, можно оценить изменения радиуса Земли в прошлом по палеомагнитным наблюдениям. Но и они не отмечают каких-либо существенных изменений в течение последних 400 млн. лет.

Единственное свидетельство сжатия поверхности Земли в складки — это ее горные пояса. Они ясно свидетельствуют о том, что породы были сжаты. Для установления общей величины сжатия предпринималось много попыток восстановить первоначальные размеры слоев, ныне смятых в складки. Значения получались чрезвычайно разнообразные, поскольку многие черты рельефа горных поясов появляются в результате постепенного наклона крупных складок пород, которые в свою очередь искривляются и текут под действием силы тяжести (это пластическое течение подобно течениям внутри мантии). Тем не менее для большинства горных систем, например для Альп или Аппалачей, величина сжатия определена в 200—250 км. Согласно этой оценке получается, что суммарное сжатие всех наших современных гор не составляет и малой доли того количества материала, которое добавилось к коре из верхней мантии в океанических областях за последние 25 млн. лет.

Как мы видели, возраст современной океанической коры меньше 200 млн. лет; поэтому предшествующая ей океаническая кора, занимавшая две трети земной поверхности, видимо, была увлечена вглубь нисходящими конвективными течениями. Согласно последним данным, такое «поглощение» происходит и в настоящее время в районах глубоководных желобов. Эти желоба (рис. 25) — наиболее углубленные участки земной поверхности, обычно около 8—10 км глубиной (самая большая глубина — 11 км, зарегистрирована в Марианском желобе в западной части Тихого океана). Безусловно, желоба имеют большое геологическое значение, поскольку в этих районах расположены активные вулканы и эпицентры сильных землетрясений. Обращенная к материку сторона желоба обычно отмечена дугой островов вулканического происхождения (рис. 42); кроме того, здесь расположены эпицентры почти всех глубоководных землетрясений. Как желоба, так и островные дуги имеют много характерных особенностей, в частности значительные гравитационные и магнитные аномалии. Однако обобщить более подробные особенности чрезвычайно трудно. Желоба обычно имеют V-образное сечение, но некоторые из них заполнены осадками. Хотя ширина желобов измеряется лишь десятками километров, в длину они простираются на сотни километров и различаются по форме от прямолинейных (Кермадек и Тонга) до

угловатых (Соломоновы о-ва) и от плавных кривых (Алеутские и Марианские о-ва) до замысловатых дуг (море Банда, о. Целебес). В некоторых районах их формы, видимо, отражают форму материка, с которым они граничат.

Ключ к пониманию геологического значения желобов лежит в подробном изучении положения очагов землетрясений (рис. 40).



Рис. 40. Связь землетрясений с глубоководными желобами. Океаническая кора вместе с частью мантии, лежащей выше астеносферы, погружается внутрь мантии. Это погружение сопровождается интенсивными землетрясениями, вулканической активностью в районе желобов и примыкающих к ним островных дуг.

Непосредственно под желобами очаги занимают область от поверхности и примерно до глубины 80 км; на больших глубинах они располагаются соответственно ближе к материкам. В областях, где были проведены достаточно подробные исследования, было обнаружено, что очаги этих более глубоких землетрясений располагаются в пределах узкой полосы около 15—20 км толщиной. Эта полоса спускается вниз от желоба под углом примерно 45°, хотя на больших глубинах имеет тенденцию становиться более крутой. Таким образом, расположение очагов указывает путь, по которому движутся океаническая кора и

породы верхней мантии по мере их погружения внутрь Земли*. Когда эти породы начинают погружаться вглубь, из-за возникающих напряжений происходит растрескивание, что мы наблюдаем на поверхности как неглубокое землетрясение. На больших

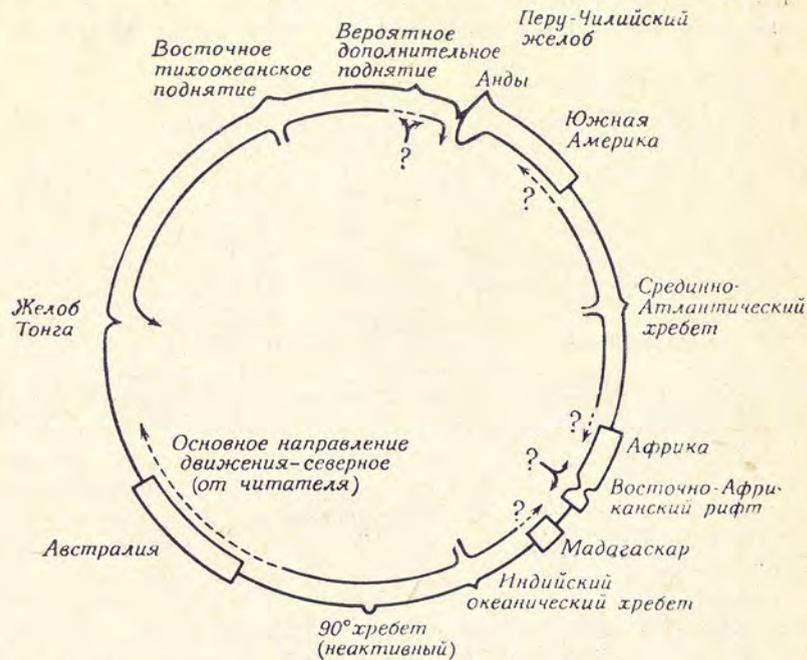


Рис. 41. Схематический разрез земного шара по 20° южной широты. Связь океанических хребтов и желобов с восходящими и нисходящими конвективными потоками хорошо установлена. Тем не менее имеется много нерешенных проблем их взаимодействия с материками и друг с другом (отмечены вопросительными знаками и пунктирными линиями). Одна из основных нерешенных проблем — глубина распространения конвективных потоков внутри Земли.

глубинах природа землетрясений иная, и они, возможно, возникают из-за физических и химических изменений в породах, оказавшихся в области больших давлений и температур. Возможно, в частности, что породы коры превращаются в более плотные породы мантии и погружаются, содействуя таким образом нисходящей конвекции. Ниже 700 км эти породы коры, должно быть, поглощаются породами мантии, поскольку ниже этой глубины землетрясения обычно не обнаруживают. (Самое глубокое

* Предположение о заталкивании в мантию до глубины 700 км твердого слоя толщиной около 50 км очень слабо аргументировано и вряд ли соответствует действительности. Это самое слабое место гипотезы «тектоники плит». — Прим. ред.

известное землетрясение было отмечено в 1924 г. под Целебесом на глубине 720 км.)

Когда материал коры погружается в мантию, он имеет более низкую плотность по сравнению с породами мантии, что соответствует наличию аномалий силы тяжести над этими областями. По мере погружения материал нагревается, теряет воду и летучие вещества, которые в виде смеси газов с расплавленной породой извергаются наружу, образуя эруптивные вулканы, такие, как, например, вулканы тихоокеанского пояса.

Многие глубоководные желоба требуют дальнейшего детального изучения, однако имеется, по-видимому, достаточно данных в пользу того, что более старые части коры Тихого океана «перевариваются» со скоростью примерно 12 см в год в Японском желобе и с еще большей скоростью в Алеутском желобе*. Очевидно, что и остальные желоба мира также способны «переваривать» материал, так что добавление вновь сформированной коры к земной поверхности не увеличивает ее площади.

Основная проблема, стоящая перед нами в данный момент, — установление протяженности этих конвективных потоков. Хотя они поднимаются у океанических хребтов и погружаются у желобов (рис. 41), а их верхняя поверхность совпадает с кровлей «мягкого» слоя, не ясно, циркулируют ли эти потоки только в верхних 750 км мантии или они охватывают всю ее толщу. С физической точки зрения трудно представить циркуляцию ниже «мягкого» слоя, где минералы должны изменять свою структуру при переходе через разрывы плотности. С другой стороны, имеются как физические, так и химические указания на то, что эти течения действительно охватывают всю мантию. Однако это важно лишь для более детальных исследований дрейфа материков. Мы же сейчас на основании гипотезы дрейфа и конвективных течений получили новый взгляд в понимании прошлой истории Земли, характера ее современной поверхности и ее будущей эволюции.

ГЛАВА 10

ЗНАЧЕНИЕ ГИПОТЕЗЫ ДРЕЙФА МАТЕРИКОВ

Изучение дрейфа материков и раздвижения дна океанов — это не просто интересное занятие, лишенное каких-либо практических целей. Это важное исследование, позволяющее лучше понять природу землетрясений и вулканов, а также закономерности в распределении источников минерального сырья.

* Судя по расположению магнитных аномалий, кора должна двигаться от Алеутского желоба наружу в сторону Тихого океана, так что она никак не может там погружаться и «перевариваться». — Прим. ред.

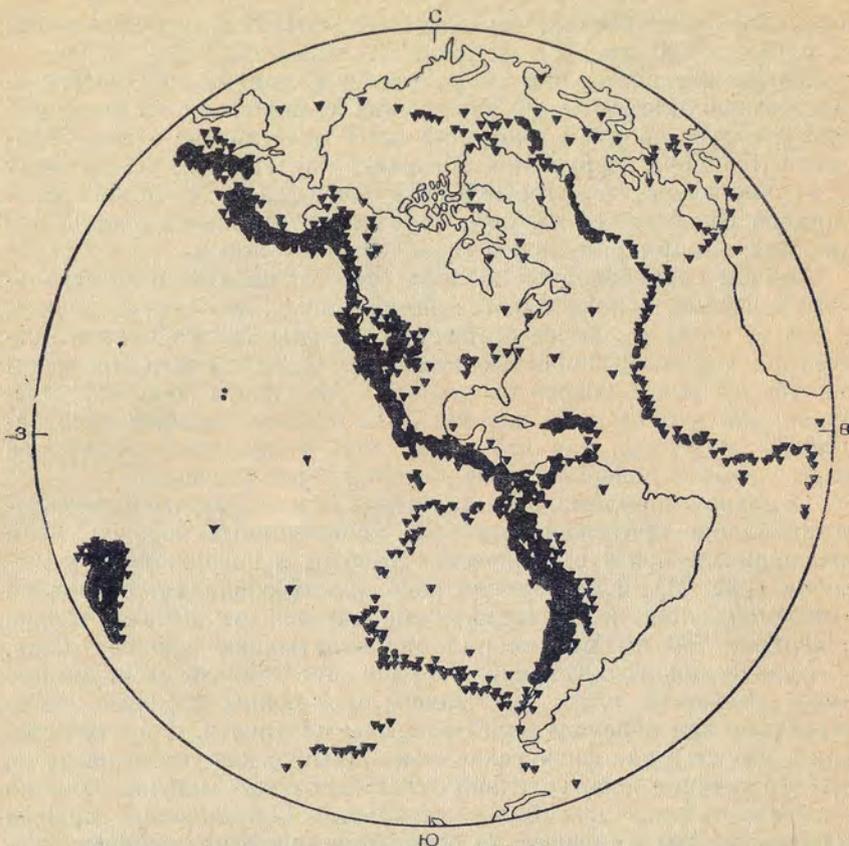


Рис. 42. Распределение землетрясений по земному шару. Большинство землетрясений, происходивших между январем 1965 и декабрем 1967 гг. Эти

Мы только что видели, что большинство землетрясений приурочивается к местам расположения нисходящих конвективных потоков, а восходящие потоки, поставляющие материал для новой коры, вызывают серию мелких землетрясений в центральных долинах океанических хребтов. Таким образом, карта распределения эпицентров землетрясений всего земного шара (рис. 42, а и б) представляет в значительной мере карту расположения конвективных потоков. На этой карте эпицентры землетрясений очерчивают совершенно новые контуры громадных плит около 80—100 км толщиной, которые перемещаются индивидуально по «мягким» слоям мантии (рис. 43). Поскольку каждая такая плита движется с постоянной скоростью в определенном направлении, ее внутренние области геологически малоак-



трясений приурочено к узким зонам. На обеих картах нанесены эпицентры зоны четко оконтуривают плиты земной коры, показанные на рис. 43.

тивны. Почти все землетрясения и вулканы концентрируются вдоль краев, где плиты или пласты вступают во взаимодействие. Гипотеза дрейфа материков создала новое направление исследований поверхности современной Земли, называемое сейчас «тектоникой плит».

То, что мы знаем сейчас о происхождении землетрясений, делает возможным локализовывать и предсказывать их силу, а в конечном счете и контролировать их. Например, в Калифорнии, которая все более и более заселяется, землетрясения происходят вдоль ряда трещин в земной коре, принадлежащих к системе разломов Сан-Андреас (рис. 44). В 1906 г. перемещения по этой системе разломов разрушили большую часть Сан-Франциско; подобное землетрясение в этой области теперь было бы еще

большим бедствием, несмотря на принятые предосторожности в инженерном деле и технике строительства. (Эти меры спасли бы много тысяч жизней в Марокко, когда в 1960 г. был разрушен город Агадир, но не сможет спасти жизнь людей в Калифорнии, если здесь произойдет землетрясение такой же силы, как то, которое в 1811—1812 гг. опустошило территорию свыше 12 000 кв. км вокруг Нью-Мадрида, шт. Миссури.)

На тектонической карте плит (рис. 43) можно видеть, что разрыв Сан-Андреас лежит на границе между плитами Тихого

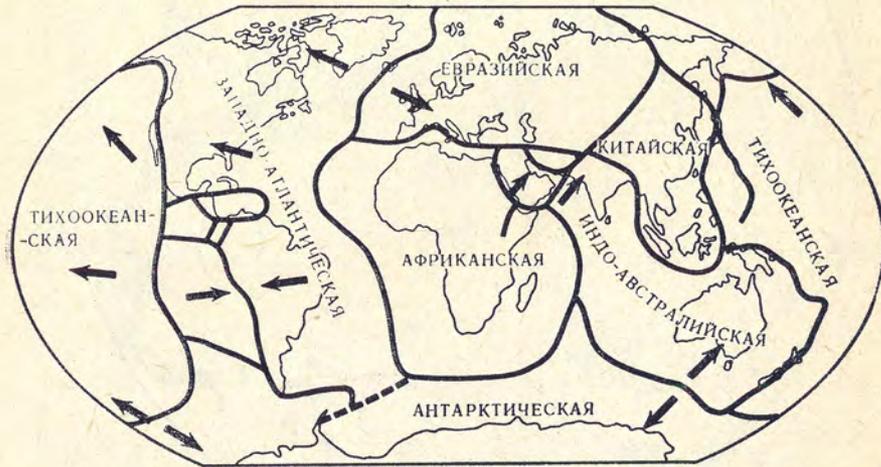


Рис. 43. Каждая из выделенных здесь плит движется равномерно и независимо от других, так что геологическая активность Земли в основном сосредоточена в областях, где эти плиты взаимодействуют друг с другом.

океана и Западной Атлантики, причем тихоокеанская плита движется на северо-северо-запад по отношению к атлантической со скоростью около 5 см в год (рис. 45). Очень небольшие и неопасные перемещения происходят постоянно вдоль системы разломов; при этом из-за сил трения противоположные стороны не меняют взаимного расположения. Когда же накапливаются напряжения, превышающие силы трения, происходит сдвиг и противоположные стороны разлома занимают новое положение. В этом и состоит механизм землетрясения. В населенных областях, подверженных землетрясениям, постоянно измеряют эти небольшие движения и, зная среднегодовое движение благодаря исследованиям, связанным с «тектоникой плит», можно подсчитать величину накопившегося напряжения и предсказать силу землетрясения в ближайшем или далеком будущем. Эти расчеты помогут властям сделать все необходимое, чтобы свести

последствия катастрофы до минимума. К сожалению, из расчетов нельзя определить точную дату землетрясения, хотя вероятность возникновения землетрясения, безусловно, возрастает по мере того, как увеличивается накапливаемое напряжение.



Рис. 44. Разлом Сан-Андреас в Калифорнии, идущий через Элькхорнские горы в Великой долине в Калифорнии, представляет границу между двумя плитами земной поверхности (см. рис. 45). Земная кора на правой и на левой сторонах фотографии движется в противоположных направлениях. Мы знаем, что это движение должно в среднем составлять 5 см в год, причем левая сторона движется по направлению от читателя. Если перемещения не наблюдаются, то, следовательно, накапливаются напряжения вплоть до предела прочности пород коры, после чего стороны резко сдвигаются относительно друг друга, вызывая при этом сильное землетрясение. Знание процесса подготовки землетрясения позволит в скором будущем использовать новую технику для предотвращения разрушительных землетрясений в этом районе.

В ближайшем будущем станет возможным управлять землетрясениями. Например, сдвиговые системы, подобные разлому Сан-Андреас, могут быть «смазаны» путем накачки воды по всей их глубине, что уменьшит трение соприкасающихся плит.

В результате перемещения будут сопровождаться небольшими сотрясениями, а разрушительное землетрясение будет предотвращено. Можно также вызвать мелкие «разгрузочные» землетрясения с помощью мощных взрывов (возможно, ядерных), произведенных в специально подобранных местах. Эти методы могут быть эффективны только благодаря полученным из тектоники плит значениям перемещений, необходимых для снятия накопившегося напряжения.

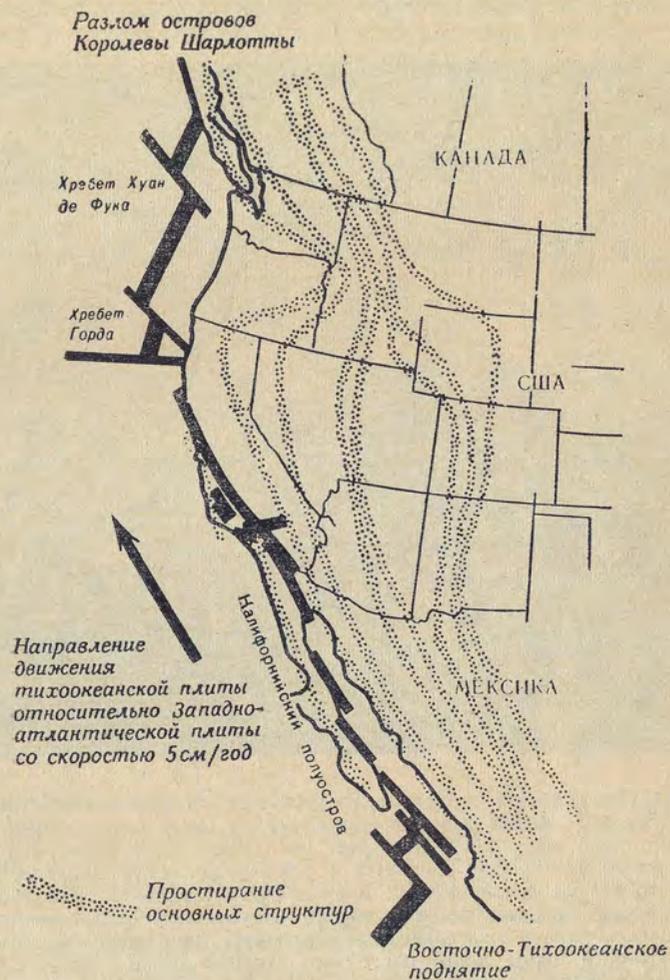


Рис. 45. Дрейф материков и землетрясения в Калифорнии.

трясения с помощью мощных взрывов (возможно, ядерных), произведенных в специально подобранных местах. Эти методы могут быть эффективны только благодаря полученным из тектоники плит значениям перемещений, необходимых для снятия накопившегося напряжения.

Разрушительные волны цунами вызываются, по-видимому, землетрясениями в районах желобов, где плиты сталкиваются передними краями так, что одна плита заталкивается под другую. В частности, такая ситуация возникает недалеко от Аляски, у дуги большей частью ненаселенных Алеутских о-вов; поэтому за данной областью следует наблюдать особенно тщательно, чтобы вовремя дать предупреждение о начале цунами всем обитаемым островам Тихого океана. Поскольку цунами связаны с землетрясениями, очевидно, имеется возможность их предсказания, подобная предсказанию землетрясений.

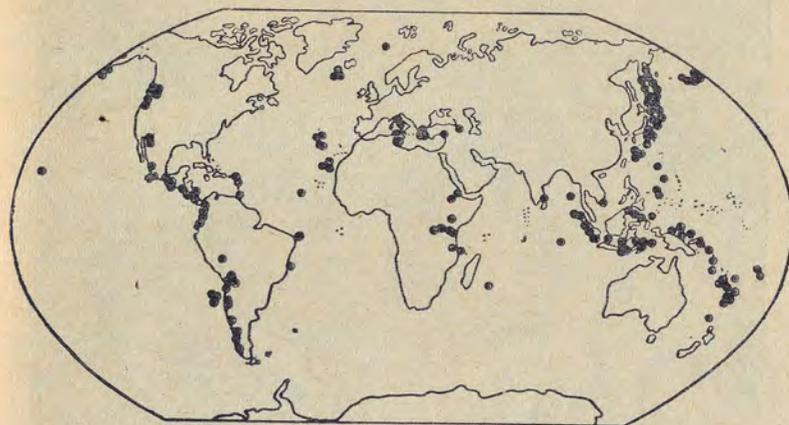


Рис. 46. Расположение активных и бывших недавно активными вулканов на земном шаре. Большинство вулканов земного шара находится под водами океанов, и установить их местоположение в настоящее время не представляется возможным. Вулканы же, встречающиеся на суше, приурочены в основном к краям материковых плит, под которые погружаются океанические плиты.

Вулканы земного шара также связаны с плитами и их движениями. В настоящее время мы можем отметить на карте (рис. 46) лишь распределение вулканов на суше и на океанических островах. Однако, поскольку все дно океанов было сформировано вулканической породой, внедрившейся в центре океанических горных хребтов, подавляющая часть современной (и прошлой) вулканической активности мира должна быть сосредоточена у этих хребтов.

Геологи уже давно различают два типа вулканов. Первому типу свойственны более спокойные базальтовые извержения, характерные, например, для островов глубоководных районов океанов (такие места достаточно безопасны для того, чтобы служить местом посещения туристами, примером чему служат Гавайи или

Исландия). Второй тип характеризуется обычно бурными андезитовыми извержениями. Располагаются вулканы этого типа в основном на стороне океанических впадин, обращенной к материку. Как мы упоминали в гл. 9, извержения этих андезитовых вулканов состоят из газов и жидкостей, выделяющихся из пород



Рис. 47. Новый вулканический остров Сёртсей, образовавшийся недалеко от южной Исландии. Его образование сопровождалось рядом мощных извержений, начавшихся в 1963 г. Этот вулкан — один из многих, образованных после разделения материков и уже при сформировавшемся новом океаническом дне.

океанической коры при погружении ее в более горячие области мантии. Состав извержения зависит от глубины, с которой эти летучие вещества выводятся на поверхность. Таким образом, детальный состав андезитовых вулканов можно предсказать, зная глубину верхней поверхности опускающейся коры, которая в свою очередь может быть определена по глубине залегания очагов землетрясений непосредственно под вулканами. И наоборот,

состав древних андезитов земного шара позволяет судить о положении нисходящих конвективных потоков в прошлом.

Степень вулканической активности андезитовых вулканов, вероятно, зависит от скорости, с которой океаническая плита погружается в мантию, поскольку именно этот материал (по крайней мере частично) питает корни вулканов. Взаимодействие



Рис. 48. Вулканический остров Као в архипелаге Тонга. Вулкан полностью отличается от Сёртсея, поскольку он образован вблизи глубоководного жолоба Тонга, где старое океаническое дно погружается в недра Земли.

двух плит также влияет на извержение, поскольку расплавленные породы достигнут поверхности легче в тех местах, где разломы уже сформированы. Например, вдоль Анд вулканы встречаются там, где движения коры создают разломы растяжения, но в местах, где благодаря этим движениям сжались и закрылись трещины, ведущие к поверхности, вулканы отсутствуют. Располагая соответствующей информацией, можно рассчитать среднюю вулканическую активность в любой интересующей области и таким образом предсказать вероятность возобновления вулканической деятельности. Это значит, что в активных областях можно оценить вероятность извержения существующих вулканов, а в областях, находящихся сейчас в видимом покое, таких, как северный остров Новой Зеландии и западная часть США, — вероятность сохранения спокойствия.

Базальтовые вулканы «питаются» породами мантии с глубин 50—60 км. Именно этот тип вулканических пород поднимался

вверх и изливался на поверхность земли через трещины, которые открылись при разделении континентов. И сегодня эти породы продолжают подниматься в районах океанических хребтов. Вдоль хребтов Атлантического и Индийского океанов поднимающаяся лава местами создала достаточно высокие пики, достигающие поверхности океана, где они образуют срединно-океанические острова (рис. 5). В Тихом океане плиты разделяются быстрее, так что вулканические пики вдоль хребтов гораздо ниже и большинство базальтовых вулканических островов Тихого океана не связано с системой рифтовых хребтов.

Основное практическое значение гипотезы дрейфа континентов — это объяснение распределения минералов на земном шаре. Обнаружение месторождений руды по одну сторону океана подразумевает ее присутствие на противоположной стороне; весьма существенно, что дрейф материков непосредственно влияет на концентрацию различных ископаемых и способствует формированию месторождений, пригодных для эксплуатации. Например, медь присутствует в большинстве пород и составляет 0,01% земной коры, но добыча ее целесообразна лишь из пород, содержащих не меньше 1,5% меди.

Концентрация полезных ископаемых происходит в основном двумя путями. Первичные полезные ископаемые, такие, как медь, серебро, свинец, цинк, марганец и т. д., концентрируются в земной коре под действием температуры и давления. При определенных геологических условиях (например, гранитные интрузии) горячие жидкости и газы поднимаются к поверхности и конденсируются в виде руд на различных уровнях. По мере того как вышележащие породы разрушаются, руды оказываются на поверхности. Вторичные полезные ископаемые концентрируются в результате выветривания и эрозии. При разрушении пород нерастворимые остатки могут содержать концентраты важного минерала, примером чему могут служить бокситы Арканзаса или Западной Африки. При переносе частицы разрушенных пород оседают в соответствии с их плотностью, образуя отложения россыпного типа.

Формирование первичных полезных ископаемых, очевидно, зависит от степени разогрева пород коры, происходящего двумя путями, которые в свою очередь связаны с движениями плит. Когда накапливаются большие толщи осадков, как, например, в прогибах над нисходящими конвективными течениями, то более погруженные части прогибов нагреваются отчасти из-за глубинного тепла, но в основном за счет тепла, выделяющегося при распаде радиоактивных элементов внутри слоя осадков. Так, большинство гранитов сформировалось в подобных прогибах, заполненных осадками, и наиболее известные залежи гранитов располагаются вблизи от мест нисходящих конвективных пото-

ков. Другой источник сильного разогрева — восходящие конвективные потоки. Здесь кора нагревается непосредственно от тепла, поступающего из внутренних областей Земли. Очень богатые месторождения меди, железа, марганца, золота, серебра и цинка были недавно найдены в районах повышенного теплового потока из недр Земли в Красном море. В этом месте нагрев происходит из-за восходящих конвективных потоков, отделяющих в настоящее время Аравийский п-ов от Африки. Подобно этому, отложения серебра, свинца и цинка в Ирландии и на Ньюфаундленде образовались около 350 млн. лет назад в трещинах, которые позднее должны были открыться и образовать Северную Атлантику. Эти наблюдения позволяют предположить, что сходные богатые залежи будут найдены и в других районах мира: в Лабрадорском море между Гренландией и Канадой, которое, как мы видели в гл. 8, слегка открылось 120—150 млн. лет назад; вдоль африканских прогибов; в северной части Южной Америки (рис. 34, в), где Южная Атлантика раскрылась сначала в виде щели между этими материками, прежде чем занять свое современное положение.

Образование вторичных полезных ископаемых в значительной степени зависит от климатических условий, и поэтому история движения материков чрезвычайно важна и для их поиска. Большинство вторичных полезных ископаемых, таких, как бокситы, нефть и природный газ, может накапливаться в больших количествах лишь в тропических широтах. Поэтому знание местоположения древних тропических зон дает нам возможность объяснить, почему, например, нефть не встречается в Восточной Африке и в то же время может быть найдена в Европе и на севере Аляски. Большая часть Северной Америки и Европы находилась в тропических широтах в течение по крайней мере части последних 400 млн. лет, а Восточная Африка располагалась южнее и вошла в тропические широты лишь в геологически недавнее время (рис. 34, а, б, в).

Представляется вполне вероятным, что исследование палеоширот может также помочь нам объяснить распространение ледников, поскольку они, видимо, не являются постоянной чертой климата Земли. В гл. 5 мы описывали, как южные полярные ледники около 400 млн. лет назад покрывали область Сахары, затем Южной Африки и Бразилии, а к периоду 250 млн. лет назад — Индию, Австралию и Антарктиду. После этого периода следы ледников отсутствуют; по-видимому, климат на Земле был более мягким и ледников не было. Лишь около 3 млн. лет назад оледенение вновь возникло в северных полярных областях. Можно предположить, что оледенение возникает либо когда перемещающиеся материк окружают полярное море, либо когда материк входит в полярные области и постепенно покрыв-

ваются льдом, поскольку выпавший на них снег отражает большую часть солнечных лучей, снижая температуру все больше и больше. Когда вблизи полярных областей нет суши, циркуляция океанских вод препятствует накоплению полярного льда и тем самым улучшает климат на земном шаре. Все это, конечно, очень гипотетично, но применимо для объяснения современного четвертичного оледенения, и, кроме того, отсюда следует вывод, что современные ледники сохранятся в течение многих миллионов лет, пока Антарктида не уйдет от Южного полюса или северные материки не изменят свое околополярное расположение, позволив тем самым тропическим водам войти в Арктику и растопить льды.

Возможно, время покажет, что практические аспекты, кратко обрисованные выше, окажутся даже менее существенными, чем влияние этой революционной гипотезы на научное мировоззрение геологов и геофизиков, заставляющее заново обдумать, казалось бы, установившиеся принципы и ставить новые проблемы. Например, в настоящее время нам известна эволюция современных океанов, но то, что мы знаем теперь об океанических осадках, поднимает новый вопрос, а именно: почему океаны были мелкими и со слабыми течениями с момента их возникновения до 70 млн. лет назад, а затем, когда началось основное раздвижение дна, они стали глубокими, с сильными течениями, которые и сформировали современные материковые склоны.

Мы знаем все еще очень мало о горообразовании, однако общий ход этого процесса становится сейчас более ясным. Мы видели, как нисходящие конвективные потоки образуют глубокие прогибы (подобные нашим современным океаническим жолобам), способствующие накоплению большой толщи осадков. Эти осадки толщиной от 8 до 10 км легче, чем породы по обеим сторонам прогиба; поэтому прогиб начнет подниматься, если его не будет тянуть вниз нисходящий конвективный поток. Таким образом, создается сложное равновесие, особенно когда глубоко лежащие осадки плавают в результате собственного радиоактивного разогрева и образуют гранит. Когда равновесие между силами, вызывающими подъем и погружение, нарушается, слои пород, заполняющих прогиб, значительно искривляются, а когда направленные вверх силы становятся намного значительнее сил, направленных вниз (это имеет место, если конвективный поток либо замедляется, либо прекращается), расплавленный гранит и глубоко лежащие осадки воздымаются вверх. Такое поднятие перемещает вышележащие осадки на значительную высоту, откуда они, подобно гигантским оползням, «ломтями» сползают вниз. При этом слои искривляются и меняют форму, особенно если нижележащие породы продол-

жают подниматься вверх*. Нечто подобное мы можем заметить в строении Альп. Образование некоторых горных цепей еще больше усложнилось, когда Африка и Индия столкнулись с Европой и Азией, раздавливая бывшие между ними прогибы, заполненные осадками. Более полное представление о связи конвективных потоков с горообразованием будет получено при детальном изучении изменений скоростей роста океанического дна. Согласно современным исследованиям, около 10 млн. лет назад у расширения дна была пауза, которой соответствует время формирования многих структур наших современных горных цепей.

Хотя существование дрейфа материков в настоящее время можно считать установленным, все же имеются некоторые противоречащие ему факты, которые до сих пор не объяснены. В основном эти факты относятся к распределению древней растительности. Последнее свидетельствует, что материки и климатические пояса сохраняли современное положение (или близкое к нему) в течение всего геологического времени. Теперь, когда мы знаем в общих чертах, если не в деталях, как и когда происходили движения континентов, мы можем пересмотреть большинство из этих фактов. Возможно, что в некоторых случаях палеоботанические заключения основаны на случайном распределении некоторых ископаемых остатков, находимых лишь в небольшом числе обнажений, тогда как истинное их распределение пока не известно. Вполне возможно, что в определенных случаях палеонтологи найдут факты, противоречащие гипотезе дрейфа, но тогда будет интересно проследить, в какой связи они найдутся с другими факторами, такими, как циркуляция ветра в случае растений и хищники в случае животных. Поэтому, пересматривая некоторые из аргументов, использованных прежде за и против реальности дрейфа материков, мы должны достичь более полного понимания древнего мира. Например, имеются некоторые доказательства того, что число видов, развившихся за последние 150 млн. лет, было больше, чем прежде. Хотя этот факт, возможно, отражает лишь большую легкость обнаружения остатков в молодых породах, в то же время это может быть и результатом новой географической изоляции материалов, а следовательно, большего разнообразия условий окружающей среды.

Наши современные представления о дрейфе материков все еще очень общи, и необходимо провести гораздо более детальные исследования, чтобы ответить на многие неразрешенные вопросы: где находится современный материковый склон Восточной Африки? До тех пор пока он не определен, трудно уста-

* Такое объяснение горообразования явно противоречит имеющимся геологическим и геофизическим данным. — *Прим. ред.*

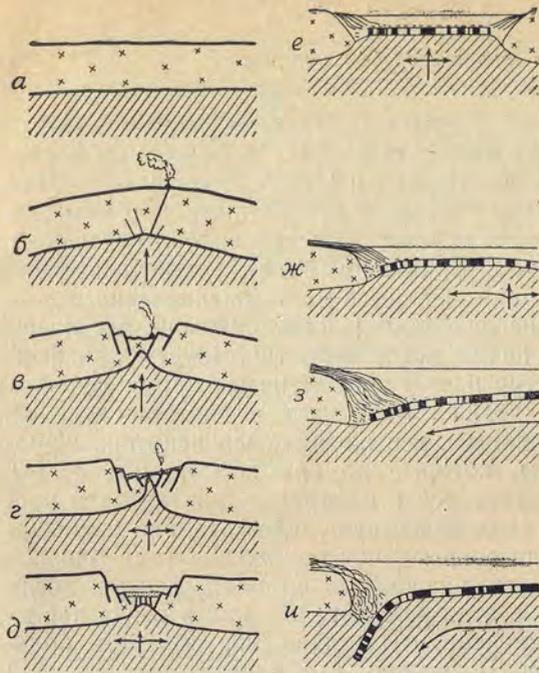


Рис. 49. Эволюция океанов.

a — типичная континентальная кора толщиной 30—40 км, лежащая над типичными породами мантии. Пример — Южная Африка или Канада.

б — изгибание континентального массива в виде арки и обширные излияния мантийной лавы на поверхности земли по раскрывшимся разломам. Пример — некоторые части Восточной Африки.

в — излияние лавы с последующим слабым раздвижением коры, со-

провожаемое дальнейшими разломами и обрушиванием арки. Пример — Восточно-африканская рифтовая долина.

г — уменьшение изгибания в виде арки, хотя вертикальные движения все еще преобладают. В образовавшемся на поверхности прогибе скапливается и испаряется вода. Горячие источники и вулканическая активность обусловлены близким к поверхности расположением мантийного материала. Пример — современная депрессия Афар на юге Красного моря.

д — породы мантии достигают поверхности: образуется новая океаническая кора, одновременно с этим начинается основное разделение материковых блоков. Центральные области находятся теперь ниже уровня моря, но моря все еще очень мелки, поэтому в них накапливаются мелководные отложения известняка и сланца. Пример — Красное море сегодня.

е — раздвижение продолжается; при этом у краев материков накапливаются большие толщи осадков. Океаны, однако, все еще мелки, так что океаническая циркуляция слаба и вдали от краев материков осадки накапливаются медленно и содержат много органического материала, такого, как известняк. Новая океаническая кора приобретает полосы магнитных аномалий чередующейся полярности. Пример — Атлантика около 120 млн. лет назад.

ж — раздвижение продолжается, но океаны все еще мелки. Пример — Атлантический океан 70 млн. лет назад.

з — раздвижение продолжается, но океаны стали глубже, возникает значительная океаническая циркуляция, которая придает материковым склонам их современную форму. Отложения в глубоководных районах океана разнообразны и часто содержат материал, сползший в океанические бассейны с материковых склонов. Пример — Атлантика в течение последних 60 млн. лет до сегодняшнего дня.

и — в зонах ослабления на границе материк — океан конвективные течения опускаются вниз и способствуют накоплению осадков во впадинах, которые в будущем превратятся в горы. Пример — Перуанско-Чилийский желоб, желоб Тонга, Индонезия и т. д.

новить время отделения Мадагаскара от Африки и провести более правильную подгонку индо-австрало-антарктической части Гондваны с Африкой. Наши сведения о Дальнем Востоке и его движениях еще более малочисленны, чем о Восточной Африке. Этот перечень вопросов можно продолжить. Как Атлантико-Индийский срединно-океанический хребет, который возник вдоль береговой линии Африки, входившей в состав Гондваны, достиг своего современного положения? Если все океаны были мелкими около 70 млн. лет назад, то где была вся та вода, которая сейчас заполняет океанические бассейны? Почему картина магнитных аномалий дна океана наводит на мысль, что породы намагничены в виде даек, поднимающихся к поверхности, а не в виде потока лавы, изливающегося на океаническом дне? Это может быть следствием быстрого охлаждения горячих пород при соприкосновении с водой; в таком случае в океан и атмосферу будет выделяться лишь незначительное количество воды и газов, содержащихся в вулканических породах. Однако, если лава действительно растекается, но при этом не участвует в формировании характерной картины магнитных аномалий, наблюдаемой на поверхности, за последние 100 млн. лет к атмосфере Земли должен был добавиться большой объем вулканических газов.

Возможно, самый основной из оставшихся неразрешенными вопросов — это вопрос о том, являются ли конвективные потоки неглубокими и ограничиваются «мягким» слоем или охватывают всю глубину мантии. Ответ на этот вопрос особенно важен для понимания термической истории Земли. Мы знаем сейчас, что планеты произошли из холодного пылевого облака, в котором произошло разделение частиц: более плотные двигались ближе к Солнцу, а более легкие — дальше от него*. Возможно, это было вызвано взаимодействием магнитного поля солнечной системы и солнечной радиации, причем оба эти фактора 4500 млн. лет назад были гораздо сильнее. По той или иной причине пылевые частицы слипались в комья материала, которые росли и постепенно образовали планеты. Внутри этих растущих планет вследствие ударов падающих на планету тел (несколько напоминающих современные метеориты), а также из-за радиоактивного распада начало аккумулироваться тепло. В небольших телах, подобных Луне, это тепло быстро уходило к поверхности и излучалось в пространство, в результате чего могли быть сформированы лишь небольшие объемы расплавленных пород. Большие же планеты, такие, как Земля, теряли свое тепло гораздо медленнее, и их внутренние области нагревались в достаточной мере для развития конвективных потоков, которые спо-

* Здесь авторы чрезмерно упрощают действительность. Распределение твердых частиц и газов в протопланетном облаке, несомненно, было гораздо более сложным. — *Прим. ред.*

собствовали переносу более тяжелых элементов вниз, где образовалось ядро, а более легких — вверх, где формировалась кора. Земля никогда не была полностью расплавлена, иначе было бы потеряно в пространство большинство легких элементов, например водорода *. В действительности циркуляция этих потоков собрала более легкую «пену» в кору над нисходящим потоком, образовав, возможно, первый примитивный материк около 3500—4000 млн. лет назад. Здесь мы должны пересмотреть наши представления о дальнейшем развитии Земли, поскольку, если бы конвективные потоки охватывали всю мантию, они бы перенесли тепло к поверхности с гораздо большей скоростью, чем та, что была раньше принята при учете одной только теплопроводности вещества Земли. Как бы то ни было, очень похоже на то, что было сформировано несколько ядер первоначальной коры, которые разрастались при добавлении по краям заново дифференцированного материала. Эти ядра, с возрастом примерно 3500 млн. лет, можно сейчас обнаружить на некоторых материках — в Канаде, Австралии, Европе, Сибири; однако в Африке ситуация кажется более сложной, поскольку целая серия древних плит континентальных пород объединилась вместе всего лишь 550—650 млн. лет назад. Если конвективные потоки все еще проходят через всю мантию, что кажется наиболее вероятным, то современный дрейф материков — это просто одна из стадий постоянно меняющейся картины, которая частично зависит от роста земного ядра. С другой стороны, если конвективные потоки расположены неглубоко, тогда изменяющаяся конфигурация континентов не может быть простой.

Тем временем интересно поразмышлять о будущем современных материков. Как мы видели, океаническая кора формируется быстрее в Тихом океане, чем в остальных океанах мира, распространяясь на 6 см в год в каждом направлении от Восточно-тихоокеанского поднятия. Тем не менее общая площадь Тихоокеанского бассейна сокращается, поскольку почти все впадины мира сосредоточены здесь и через них океаническая кора поступает в мантию. Это заставляет предположить, что в будущем, возможно через 50 млн. лет, восток и запад встретятся. Скалистые горы и Анды войдут в соприкосновение с Японией, Филиппинами и Тонга. Однако еще до этого Альпы и Атласские горы сдвинутся навстречу друг другу и, сжимая осадки Средиземного моря, образуют еще более массивную горную систему. Но как бы ни были интересны эти и другие предположения, придется немало потрудиться, прежде чем мы полностью поймем современное состояние Земли и сможем начать применять наши знания на пользу человеку.

* Важна не только легкость, но и легкоплавкость элементов и их соединений (например, воды). — *Прим. ред.*