



С. УЕДА

НОВЫЙ ВЗГЛЯД
НА ЗЕМЛЮ

Эта книга, принадлежащая перу японского исследователя-геофизика Сэя Уэда, написана с такой убедительностью и с таким знанием дела, с какими может высказываться только ведущий участник научного исследования. Вплоть до конца 1960-х годов среди большинства ученых господствовало представление о Земле как о жестком теле с неподвижными материками и постоянными океаническими впадинами. В настоящее время значительная часть ученых считает, что земная поверхность хрупкая, что она находится в непрерывном движении и состоит из крупных плит. Эти плиты многократно сталкиваются между собой, раскалываются и сходятся вновь. В результате такого движения образуются новые океанические бассейны и горы, происходят землетрясения, извергаются вулканы, формируются новые геологические структуры, возникают другие драматические природные явления. Прошедшая научная революция привела к разработке новой теории глобальной тектоники, которая известна также и как теория дрейфа континентов, и именно эта концепция является центральной темой данной книги. Книга раскрывает также философское понимание процесса научного исследования и служит примером того, как развивается научная мысль.

Живой, неформальный литературный язык книги включает многочисленные обращения к вопросам методики научного исследования, различия между экспериментальной и теоретической наукой. Книга не требует большого знания математики или какой-либо предварительной научной подготовки. Она легко читается и имеет познавательное значение как для студентов, специализирующихся в науках о Земле, так и для более широкого круга интересующихся этими вопросами читателей.

«Эта книга сообщает о сформировавшихся за последние 25 лет взглядах на устройство Земли и на характер геологического развития. Уэда выбрал тему, которую следует разрабатывать именно так, как ее разрабатывает он. Развитие геологии начиная с 1950 г. вызвало подлинную революцию в наших представлениях...»

Сэр Эдуард Буллард



Книга известного японского геофизика С. Уеды представляет собой очень удачное, законченное и логически стройное описание новой геологической теории — концепции неомобилизма, или тектоники плит. С достаточной степенью осторожности и критичности автор оценивает современное состояние отдельных вопросов этой теории, в особенности вопрос о силах, приводящих к движению плит. Подлинно научный анализ материала хорошо сочетается с простотой изложения, что делает книгу интересной для всех геологов, желающих познакомиться с новой концепцией в науках о Земле, и для студентов геологических вузов.

Редакция литературы по геологии

1904030000

У 20802-146

041(01)-80

146—80.

© 1971 by Seiya Uyeda

Originally published in Japanese by IWANAMI

SHOTEN, Publishers, Tokyo

Copyright © 1978 by W. H. Freeman and Company

© Перевод на русский язык, «Мир», 1980

«Новый взгляд на Землю» — так охарактеризовал автор этой книги, известный японский геофизик Сэия Уеда, концепцию тектоники плит, или новую глобальную тектонику, возникшую в последние десятилетия в результате эволюции мобилистских представлений о строении и геологической истории Земли.

В последние годы в СССР выпущено немало работ, посвященных тектонике плит. Издательство «Мир» также опубликовало ряд книг на эту тему, в частности сборник переводов основополагающих работ зарубежных ученых «Новая глобальная тектоника» (1974 г.), монографию Кс. Ле Пишона, Ж. Франшто и Ж. Бонни-на «Тектоника плит» (1977 г.). Кроме того, главные идеи тектоники плит изложены в других книгах иностранных авторов, переведенных на русский язык, а также во многих работах советских геофизиков и геологов.

В такой ситуации могло бы показаться излишним издавать *еще одну* книгу о тектонике плит. Почему же было решено опубликовать этот перевод?

Как отмечает ряд советских ученых, книга С. Уеды — особенная книга. Она написана очень живо и умно и содержит не только популярное изложение новой глобальной тектоники, но и чрезвычайно интересные мысли о путях развития науки. Книга написана как увлекательная повесть, не оставляющая читателя равнодушным к перипетиям ее сюжета. Сюжет повести — возникновение современного мобилистского представления о Земле, история настойчивых попыток разрешить множество труднейших проблем и противоречий. В каждой главе книги автор рассказывает, как преодолевались очередные трудности и как в результате обнаруживались новые противоречия. Говоря о развитии научных гипотез, С. Уеда показывает, что решение очередной задачи нередко ставит ученых перед проблемами, о которых они раньше и не подозревали, в результате чего расстояние, отделяющее исследователей от конечной цели — создания общей теории развития Земли, объясняющей всю совокупность наблюдаемых геологических процессов и явлений, — не всегда сокращается. Автор книги ставит даже вопрос: стоит ли стараться решать все эти проблемы? И отвечает: *стоит*, так как, накопив факты, застав-

ляющие отказаться от ошибочной гипотезы, ученые «возвращаются к поискам истины, вооруженные новыми знаниями». Конечно, С. Уеда прав, рассуждая подобным образом, но очевидно также, что эта мысль приобретает особое значение в случае, если исследователи идут по ложному пути. Именно тогда, дав объяснение факту, не укладывающемуся в рамки выбранной концепции, ученый неизбежно сталкивается со все новыми и новыми трудностями.

Профессор С. Уеда, признанный авторитет во многих вопросах геофизики, не закрывает глаза на те трудности, которые встречает тектоника плит, и не скрывает их от читателей. В этом большое и неоспоримое достоинство предлагаемой книги. Автор — убежденный мобилист, но он предвидит возможность того, что «новый взгляд» не выдержит проверки временем (точнее, проверки фактами) и устареет. С. Уеда допускает, что те идеи, которые он сейчас не разделяет, могут оказаться основой для «еще более нового взгляда».

Книгу с увлечением прочтут представители обеих противоположных школ — и мобилисты, и фиксисты. И те, и другие найдут в этой повести важные для себя сведения и полезные мысли, задумаются о трудной и поучительной судьбе истинных научных открытий и о неизбежном крахе ложных «сенсаций». Книгу С. Уеды полезно прочесть не только специалистам, занимающимся теорией происхождения и развития Земли, не только тем, кого волнуют вопросы истории и методологии наук о Земле, но и широкому кругу читателей, интересующихся процессами, которые протекают в недрах нашей планеты, формируют ее строение и внешний облик, определяют размещение минеральных богатств и проявляются иногда в грозном разгуле природных стихий.

Б. А. Борисов

Английское издание книги является переводом написанной мною по-японски книги «Новый взгляд на Землю», опубликованной в 1972 г. Для английского варианта книги я сделал обширные дополнения — как в отношении текста, так и в отношении иллюстраций, — с тем, чтобы учесть новые достижения науки о Земле, и исключил ряд материалов, которые показались мне не столь интересными для читателей за пределами Японии.

На начальном этапе работы над книгой я воспользовался помощью ряда моих друзей. Ценные замечания при подготовке японского издания сделали д-р Хироо Канамори, д-р Кадзуаки Накамура, д-р Масаси Ясуи и моя жена Мацуко Уеда; для английского издания я получил дополнительные рекомендации от сэра Эдуарда Булларда и д-ра Фрэнка Пресса. Д-р Аллан Кокс критически прочитал весь текст и значительно улучшил как его научное звучание, так и язык. Роберт Геллер и Сет Стайн прочитали верстку и предложили ряд важных изменений, которые я включил в окончательный вариант книги. Я признателен также моему переводчику (с японского) г-же Масако Онуки и моему редактору Микеле Лиापесу за их усердный труд.

Сэия Уеда

Сентябрь 1977 г.

БЫСТРЫЙ ПРОГРЕСС И «ВЕЧНЫЕ» ВОПРОСЫ

В последние годы мы стали свидетелями поистине драматических открытий в научных исследованиях и ускоренного прогресса в них. Одна из причин этого — появление электронной вычислительной техники, которая позволила собирать и систематизировать огромное количество данных, так что стало возможным использовать множество наблюдений для разработки важных и универсальных представлений. В потоке пишущихся в настоящее время статей проявляется изобилие новых идей. Из всех современных наук наиболее быстро развивающимися становятся науки о Земле. В последнее время, особенно в тех отраслях науки, которые изучают твердую часть Земли, произошли такие феноменальные изменения, какие редко случаются в той или иной области знания. Это очень важные изменения: они представляют интерес не только для специалиста-ученого, но и для любого образованного человека. О них речь пойдет в последующих главах.

Быстрый прогресс, однако, не означает, что все вопросы уже решены. Недавно, работая над этой книгой, я вспомнил одну статью, написанную в конце 1940-х годов, в которой перечислялись шесть нерешенных вопросов, считавшихся важными в то время. Я не смог найти ее, пока не связался с моим старым другом Кейити Аки, который работает в Массачусетском технологическом институте и с которым много лет назад мы — оба тогда студенты, занятые поиском интересных тем для своей работы, — читали и обсуждали ту статью. Он сразу же прислал мне нужный оттиск с благодарностью за то, что я напомнил ему о том примечательном отрывке. Это была лекция «Некоторые нерешенные проблемы геофизики», написанная Л. Г. Адамсом [1], президентом Американского геофизического союза, в 1947 г., и в ней перечислялись следующие шесть проблем:

- 1) происхождение горных систем;
- 2) происхождение геосинклиналей (глубоких впадин, заполненных осадками);

- 3) причины вулканических извержений и других магматических процессов;
- 4) причины глубокофокусных землетрясений;
- 5) происхождение магнитного поля Земли;
- 6) температуры, господствующие в недрах Земли.

Хотя перечисленные проблемы не были *единственными* на-
сущно важными вопросами, они действительно имели большое
значение. Более того, ни одна из них до сих пор полностью не
решена; все они остаются такими же насущными, какими были
всегда. Конечно, некоторые могут возразить: «Посмотрите, сколь-
ко из этих задач *уже* решено!». Но решено ли на самом деле?
Этот спорный вопрос будет одной из главных тем предлагаемой
книги. Действительно, каждый специалист в науках о Земле
согласится, что те же самые проблемы считались важнейшими не
только в сороковых годах нынешнего века, но и за сотни лет
до этого. Следовательно, науки о Земле развиваются не столь
быстро, как это кажется.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ НАУК О ЗЕМЛЕ

Почему же так случилось, что, несмотря на быстрый процесс
в развитии наук о Земле, мы не имеем ответов на многие фун-
даментальные вопросы о нашей планете? Дело в том, что мно-
гие основные проблемы наук о Земле не поддаются решению
путем непосредственных экспериментов. Это создает для нас
значительные трудности. Рассмотрим, например, шестую из
перечисленных Адамсом проблем — о температуре земных недр.
Измерить температуру в центре Земли просто невозможно, по
крайней мере в настоящее время. Ее можно определить только
косвенным путем по каким-то другим данным.

Возьмем другой пример — дрейф континентов и движения
внутри Земли, которые являются стержневыми вопросами дан-
ной книги. Их изучение встречает такие же трудности. Проник-
новение в глубокие недра Земли само по себе является задачей
трудной, а измерение движений на большой глубине находится
за пределами возможностей любых имеющихся инструментов и
известных методов из-за огромного масштаба таких глубинных
движений и их исключительно малой скорости. Поэтому нам
очень трудно доказать прямым наблюдением самый факт суще-
ствования таких явлений. Даже если в конце концов мы обнару-
жим (путем точных геодезических измерений расстояний с ис-
пользованием таких инструментов, как лазерные отражатели на
поверхности Луны) современное движение материков относи-
тельно друг друга, это никоим образом не будет доказательством
того, что подобное движение происходило и в отдаленном геоло-
гическом прошлом. Перемещение, раскол и столкновение конти-
нентов, происходившие в истории Земли, — это исключительные
явления; участвующие в них массы слишком велики, а периоды

таких движений слишком продолжительны, чтобы это можно было воспроизвести в лаборатории.

Таковы проблемы, которые делают главные спорные вопросы в науках о Земле очень трудными для решения, несмотря на новые и новые открытия и на горы накапливаемых данных. Эти проблемы могут поставить нас перед вопросом, стоит ли вообще проводить исследования в таких областях. Иногда потенциальное решение какой-либо из этих проблем представляется нам по мере развития исследования все более туманным и кажется, что интервал между текущим моментом исследования и вероятным его окончанием остается практически неизменным. Однако прогресс все-таки *есть*, потому что наше понимание существа и значения основных проблем в науках о Земле становится все глубже. Пожалуй, мы не знаем еще, как ставить наиболее правильные вопросы, но мы по крайней мере начинаем яснее понимать смысл наших вопросов.

Невозможность прямой проверки — очень серьезная трудность в науках о Земле, считающаяся чуть ли не атрибутом этих наук. Однако успешное развитие наблюдений и теории доказывает еще и еще раз пользу косвенной проверки и постепенно приближает нас к истине.

СПЕЦИФИЧНОСТЬ НАУК О ЗЕМЛЕ

Как ни парадоксально, именно то обстоятельство, что решение задач достигалось с большим трудом, возможно, помогало исследователям Земли. Пришлось изучать и терпеливо наблюдать многие, казалось бы, не связанные между собой явления. Эти наблюдения позволили выдвинуть смелые новые гипотезы. Чтобы доказать их, необходимо было искать дополнительные и бесспорные фактические данные — все равно прямые или косвенные. Удачное сочетание полевых работ, играющих главную роль в науках о Земле, с более абстрактными физическими и химическими рассуждениями принесло большой успех, вызывающий восторг геологов. Неизвестные механизмы развития Земли, например те, которые обусловили само происхождение планеты, или конвекцию в ее мантии, или происхождение геомагнитного поля, или возникновение глубокофокусных землетрясений, привлекают особое внимание ученых и зовут их к новым поискам. Подходы к этим интригующим вопросам бывают самые различные, как различны интеллектуальные вкусы и склонности каждого исследователя. И человеческая мысль развивается благодаря общим усилиям людей с различными типами мышления.

ИНТУИЦИЯ

Научное исследование включает несколько видов работы, но необходимы по меньшей мере две процедуры: 1) накопление результатов экспериментов и наблюдений и 2) анализ и теоретиче-

ское обобщение этих данных. Отдельные исследования могут сосредоточивать свое внимание на той или иной из этих процедур — в зависимости от индивидуальных склонностей. В наше время требуется очень высокая квалификация в каждом из видов работы, что позволяет найти свое место в науке всем тем, чьей специальностью может считаться любая из следующих категорий исследования: эксперимент, наблюдение, анализ, теория. Такая специализация в какой-то мере неизбежна. Однако настоящий исследователь не должен позволять себе полностью погружаться во что-то одно и игнорировать остальное. Например, можно настолько увлечься какими-нибудь измерениями, что забыть делать обобщения. Но чтобы работа была действительно ценной, свои усилия следует обосновывать логичными рассуждениями.

Не вызывает сомнения, что хорошее исследование требует глубокого понимания существа основных проблем и способности предвидения. Конечно, часто случается, что поверхностные идеи и представления ошибочно принимаются за настоящую творческую мысль. Такие идеи сами по себе не должны быть объектом порицания, но что действительно необходимо теоретику, так это особое свойство, называемое *интуицией*, — способность отбирать оригинальные перспективные идеи и постепенно превращать их в теорию или в совокупность гипотез, которые можно проверить экспериментально. Это самое важное качество, каким должен обладать ученый.

Обсуждаемые в данной книге взгляды представляют продукт подлинной научной интуиции. Именно благодаря интуиции произошел важный сдвиг в наших суждениях о Земле: от *фиксистского* представления о неизменной и стабильной планете к *мобилистскому* взгляду на Землю с ее дрейфующими массивами суши и впадинами океанов.

ПОСТРОЕНИЕ КНИГИ

Во всех разделах книги изложение ведется так, чтобы читатель-неспециалист мог представить общий фон наук о Земле. В первой главе рассматривается история теории континентального дрейфа, выдвинутой Альфредом Вегенером. Эта теория после своего возникновения на время приобрела большую популярность; вслед за тем она была отвергнута и объявлена чуть ли не вздорной. Затем, уже после второй мировой войны, она внезапно возродилась благодаря развитию палеомагнетизма — науки, изучающей историю магнитного поля Земли по естественной намагниченности горных пород.

Во второй главе кратко описаны новые достижения в геологическом изучении дна океанов — достижения, которые также способствовали возрождению теории дрейфа континентов. В этой области был сделан гигантский скачок после второй мировой войны и появилась огромная информация, которую нельзя было

получить раньше из-за ограниченности исследования пределами суши.

В третьей и четвертой главах кратко излагаются теории разрастания морского дна и тектоники плит. Теория разрастания морского дна основана на представлении о том, что дно океана образуется в пределах срединно-океанических хребтов, разрастается горизонтально и исчезает в глубоководных желобах. Эта теория была замечательным синтезом независимых данных, и ее поразительный успех привел к созданию еще более увлекательной концепции тектоники плит. Согласно этой концепции, основная часть поверхности Земли состоит примерно из 10 плитообразных твердых кусков толщиной около 70 км, которые взаимодействуют между собой. Распространение этой схемы на прошедшие эпохи позволяет предположить, что такое взаимодействие было первопричиной горообразования и других крупных движений земной коры в течение всей геологической истории Земли.

В пятой главе с точки зрения тектоники плит рассматриваются островные дуги на примере Японии. Японские островные дуги образуют часть Тихоокеанского кольцевого пояса вулканов, очагов крупных землетрясений, глубоководных желобов, разломов. Предполагается, что все это связано в Японии с поддвиганием дна Тихого океана под Азиатский материк.

В последней шестой главе описывается переход от так называемого фиксистского представления о Земле к мобилистскому, а также обсуждаются возможные движущие механизмы тектоники плит.

ТЕОРИЯ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО ДРЕЙФА: ЕЕ ВОЗНИКНОВЕНИЕ, СМЕРТЬ И ВОЗРОЖДЕНИЕ

ИДЕЯ ВЕГЕНЕРА

В 1912 г. немецкий ученый Альфред Вегенер (1880—1930) выдвинул новую теорию¹, согласно которой материки по обе стороны Атлантического океана (Северо-Американский и Южно-Американский с одной стороны и Европейско-Африканский — с другой) когда-то были единым массивом, который затем раскололся, и материки разошлись до их нынешнего положения. Вегенер утверждал, что все континенты, в том числе Индия, Австралия, Африка и Антарктида, также принадлежали этому единственному праматерику. Он назвал этот великий гипотетический материк Пангеей. На рис. 1-1 показан процесс распада Пангеи на отдельные континенты. Вегенер считал, что Пангея была единой вплоть до конца каменноугольного периода (около 300 млн. лет назад), а затем начала раскалываться, что привело в конце концов к современному расположению континентов. Поскольку Пангея была единственным континентом, она была окружена одним огромным океаном. Отдельных океанов, таких, как Атлантический, Индийский или Антарктический, по представлению Вегенера тогда не существовало. Такова была основная идея континентального дрейфа, та искорка, из которой зародился новый взгляд на Землю.

Идея Вегенера возникла в связи с тем, что он заметил, что края разных континентов при мысленном их соединении совпадают между собой подобно отдельным кусочкам в детской составной картинке-загадке. Это подобие можно увидеть, взглядевшись в очертания противоположных берегов Атлантического океана. Однако такая простая идея считалась в то время нелепой, потому что она противоречила всеобщей убежденности в неподвижности земной поверхности.

¹ Справедливо отмечают, что идея о дрейфе континентов высказывалась давно, задолго до Вегенера, уже А. Снайдером (в 1858 г.) и даже Ф. Бэконом (в 1620 г.). Однако именно Вегенер впервые сделал этот вопрос предметом важной научной дискуссии.

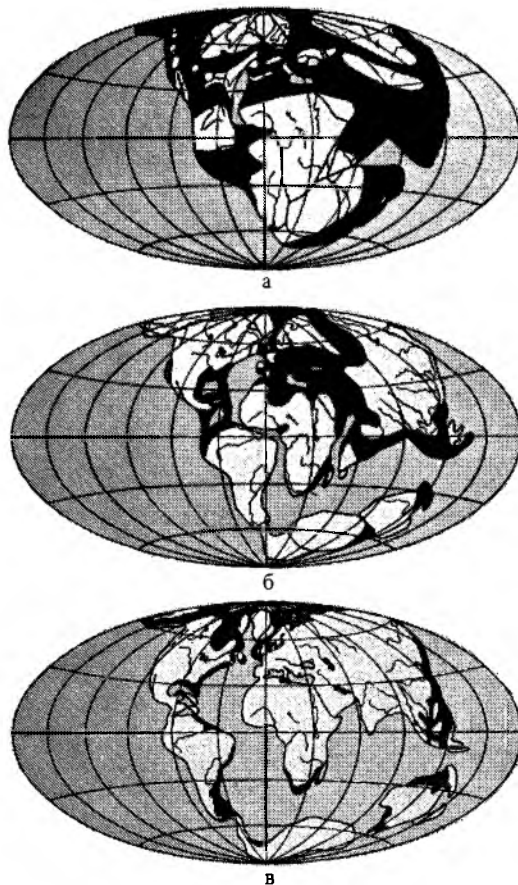


Рис. 1-1. Реконструкция карты мира для трех различных периодов, согласно вегенеровской теории континентального дрейфа [49].

Африка условно считается неподвижной и показана в ее нынешнем положении. Густо заштрихованные области соответствуют мелководным морям.
а — конец каменноугольного периода (300 млн. лет назад); *б* — эоцен (50 млн. лет назад); *в* — ранний плейстоцен (1,5 млн. лет назад).

Вегенер (рис. 1-2), метеоролог по профессии, был одним из пионеров в области метеорологических наблюдений в верхних слоях атмосферы. Он внес большой вклад в исследование Гренландии, в глубь которой до него не удавалось проникнуть никому. Однако кульминацией его разносторонней деятельности было создание и развитие теории континентального дрейфа. Она появилась как простая догадка, но Вегенер не позволил ей остаться только догадкой, решительно взялся за ее разработку и превратил ее в стройную теорию. Именно благодаря своему упорству он и стал великим ученым. Каждому исследователю время от вре-



Рис. 1-2. Альфред Вегенер.
Фотография из фонда компании
«Historical Pictures Services», Чикаго.

мении приходят на ум интересные идеи. Но большинство из этих идей не разрабатывается, так как они кажутся слишком фантастическими и неосуществимыми, а потом вообще забываются. Значительная часть их действительно бесполезна. Вегенер признавался, что идея континентального дрейфа и ему казалась фантастической и нереальной. Однако в отличие от многих других ученых, которые отбрасывают интересные идеи и потом сожалеют об этом, Вегенер начал разрабатывать эту, как тогда казалось, простую теорию. Ему необходимо было приобрести более обширные знания, и он начал с изучения геологии и палеонтологии —

наук, далеких от его специальности. Эта работа, начатая в 1910 г., была прервана его экспедициями в Гренландию и первой мировой войной, где он был ранен. И все же никакие препятствия не остановили его. В 1915 г. он опубликовал свой выдающийся труд «Die Entstehung der Kontinente und Ozeane» («Происхождение материков и океанов») и к 1923 г. трижды переиздавал его. В 1924 г. была опубликована (совместно с метеорологом В. Кёппеном) работа «Die Klimate der Geologischen Vorzeit» («Климаты геологического прошлого»). В этот период он опубликовал также множество других статей. Эти работы были плодом его революционных взглядов на Землю, выросших из концепции континентального дрейфа. Получилось так, будто вся современная наука о твердой Земле стала быстро развиваться в мыслях этого человека, опередившего всех остальных ученых на десятки лет.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД

Будучи метеорологом, а не геологом, Вегенер более, чем в чем-либо ином, нуждался в знании геологии для своих поисков исторических следов континентального дрейфа. Чтобы понять сущность идей Вегенера, нам также необходимо знание основ геологии.

Особенно важны следующих два фундаментальных принципа, применяемых геологами при изучении истории Земли:

1. *Закон напластования.* Если один слой (пласт) лежит на другом, то верхний слой образовался позднее, чем нижний.

2. *Закон фаунистических ассоциаций.* Слои, содержащие ископаемые остатки одних и тех же видов животных и растений, образовались в один и тот же период.

Первый закон самоочевиден: если бы не было первого слоя, то новый слой не смог бы отложиться на его поверхности. Этот закон позволяет нам установить хронологические соотношения в слоистых горных породах в каком-либо одном месте.

Закон фаунистических ассоциаций дает нам возможность выяснить временные соотношения в пластах, залегающих в различных местах. Всем известно, что все формы жизни постоянно находятся в процессе эволюции. Этот процесс может показаться нам медленным, но в действительности он происходит очень быстро, если рассматривать его в геологическом масштабе времени. Прimitивные формы жизни впервые появились на Земле около 3 млрд. лет назад; постепенно из них развились более сложные организмы. В эволюции существует только одно направление — от простого к сложному, и это позволяет нам определять возраст слоев по ископаемым остаткам организмов (например, трилобитов или динозавров), сохранившимся в горных породах. На рис. 1-3 показана шкала геологического времени, построенная по ассоциациям ископаемых животных и растений. Изучение окаменелостей составляет предмет палеонтологии, в которой создана детально разработанная научная система. Все приведенные на рис. 1-3 названия геологических эр, периодов, эпох (каждое из них имеет обоснованное и интересное происхождение) будут часто упоминаться в нашей книге.

Хотя палеонтологический метод и дает большую информацию, он содержит два свойственных ему ограничения. Первое — это длительность времени, на которое мы можем заглянуть в прошлое. Как показывает рис. 1-3, только в отложениях, сформировавшихся не более 600 млн. лет назад, окаменелости растений и животных имеют достаточно сложное строение, так что по ним можно сравнивать возраст слоев. В более древних породах окаменелостей для палеонтологической датировки недостаточно. Тот ранний период, который характеризуется малым количеством или отсутствием ископаемых остатков, был в каком-то смысле предысторией или биологически «темным временем». Он назван докембрийским периодом, или докембрием. Второе ограничение состоит в том, что палеонтология не дает нам «абсолютной» хронологии, так как в качестве измерителя времени используются данные об эволюции животных и растений. Можно установить, например, что слой А древнее слоя В, но нельзя узнать, каков возраст того или иного из этих слоев или насколько А древнее В.

Такие ограничения были в последние годы преодолены благодаря разработке методов определения абсолютного возраста. В основе этих методов лежит явление самопроизвольного распада радиоактивных элементов, таких, как уран, торий, строн-

Эпоха	Период	Эра		
Голоцен	Четвертичный	Кайнозой		
Плейстоцен				
2	Третичный ¹			
12				
26				
37				
53				
Палеоцен				
65	Мел		Мезозой	
136	Юра			
190	Триас			
225	Пермь			
280	Каменно-угольный		Пенсильванский	Палеозой
320				
345	Девон			
395				
430	Силур			
500	Ордовик			
	Нембрий			
570	Докембрий			

Рис. 1-3. Шкала геологического времени [41].

Сбоку от колонки показан возраст в млн. лет.

¹ Третичный «период» обычно разбивают на два периода: палеоген (палеоцен, эоцен и олигоцен) и неоген (миоцен и плиоцен). — *Прим. перев.*

ций и калий, которые содержатся в малом количестве в горных породах. Эти элементы постоянно и закономерно превращаются в другие элементы в соответствии с законом радиоактивного распада. Такое превращение также можно считать одним из видов эволюции, но в отличие от эволюции растений и животных в этом случае скорость превращения измерена физиками точно. Величины абсолютного возраста, показанные на рис. 1-3, получены методом измерения радиоактивности.

Геологические пласты сложены либо изверженными, либо осадочными горными породами. Изверженные породы — это первичные породы, образовавшиеся при охлаждении и затвердевании магмы. Осадочные породы — вторичные, они образуются в результате эрозии и осадконакопления. Вторичными они называются потому, что большая часть слагающих их частиц, принесенных водой и отложившихся из нее, прежде принадлежала другой породе. Большинство пород, которые мы наблюдаем теперь в слоистом залегании, — это осадочные породы. Таким образом, поверхность суши почти полностью покрыта осадочными породами, даже высокие горные хребты, такие, как Альпы и Гималаи, а это означает, что их знаменитые вершины тоже были когда-то под водой!

Представим себе, что некоторый район оказался поднятым выше уровня моря; в это время осадконакопление здесь прекращается и сменяется эрозией. В результате эрозии даже высочайшие горы постепенно разрушаются, и на их месте оказывается плоская равнина. Историю поднятой территории, претерпевшей эрозию и лишенной осадочных пород, проследить очень трудно, ее можно изучить только косвенно, по сведениям о характере размыва. Если район снова погружается, процесс осадконакопления возобновляется, и опять начинают накапливаться осадочные породы — более полные свидетельства геологической истории. Любой геолог считает простым фактом то, что породы, слагающие многие горы, образовались когда-то под водой, но первая мысль об этом может поразить человека. Я хорошо помню, как сам удивился, когда впервые это услышал.

СУХОПУТНЫЙ МОСТ

Если континенты, которые в настоящее время разбросаны среди мирового океана, когда-то составляли единый огромный материк, то породы, существовавшие там до его распада, должны иметь общие черты, а слои, образовавшиеся уже после раскола, должны быть различными на разных континентах. Чтобы доказать эту гипотезу и тем самым подтвердить свою теорию континентального дрейфа, Вегенер начал поиски соответствующих данных. Он говорил, что его скептическое отношение к этой идее изменилось, когда он встретил палеонтологическую статью, в

которой обсуждалась возможность связи в прошлом Бразилии с Африкой. Для Вегенера явилось полной неожиданностью то, что такое утверждение уже высказывалось, причем совершенно независимо от его гипотезы дрейфа континентов. Но именно это обстоятельство представляется особенно интересным, потому что оно показывает важность того, в какой *перспективе* интерпретируются научные данные. Вегенеру, который был в палеонтологии только любителем, не были известны свидетельства древней связи между континентами, а между тем палеонтологи уже давно изучали возможность существования этой связи. Однако общепринятое толкование полностью отличалось от предположения Вегенера, — это была теория сухопутного моста.

Изучив распределение ископаемых остатков животных, таких, как обезьяны, дождевые черви, змеи, и разных видов растений, палеонтологи установили тесное родство видов, обитавших в Африке и Южной Америке, в Европе и Северной Америке, на Мадагаскаре и в Индии. Поскольку такие животные, как, например, змеи, не могли переплыть широкий океан, ученые предположили, что два материка, из которых были найдены почти идентичные ископаемые остатки змей, раньше соединялись посредством какого-то сухопутного моста. В то время как Вегенер интерпретировал такое распределение окаменелостей как показатель того, что когда-то существовал единый континент, расколовшийся затем на несколько частей, традиционное палеонтологическое толкование того же самого явления предполагало неподвижность континентов, а значит — существование сухопутного моста между ними. Наблюдались одни и те же явления, но истолковывались они с различных точек зрения, в результате чего появились две весьма различные теории.

Если континенты действительно соединялись сушей, то такой мост между Африкой и Южной Америкой едва ли мог быть длинным, узким перешейком через Атлантический океан. Более правдоподобным предположением кажется суша, которая должна бы быть сравнима по размеру с континентом. Поскольку такой гипотетический мост уже не существует, необходимо было объяснить исчезновение целого массива суши. Самый обычный способ объяснения — приписать все грандиозному погружению земной коры. Таким образом, теория сухопутного моста предполагает, что территория размером с континент могла «стать» морем. Это, по сути дела, равносильно утверждению, что распределение суши и океана управляется *вертикальными* движениями земной коры. В теории же континентального дрейфа главными считаются *горизонтальные* движения. В этом состоит принципиальное различие между этими двумя концепциями.

Прежде чем продолжать обсуждение теории континентального дрейфа, нам надо рассмотреть природу земной коры. Самым непосредственным способом изучения недр Земли является бурение. Однако бурение скважин глубиной значительно больше 10 км при современном уровне развития техники невозможно. Другим прямым методом исследования внутренних областей Земли является изучение распространения сейсмических волн. Когда возникает землетрясение, сейсмические волны, зарождающиеся в его очаге, проходят через тело Земли. Эти волны относятся к двум главным типам. *Продольные* (первичные) волны, или Р-волны, проходят через тело Земли точно так же, как звуковые волны проходят через воздушную среду. Продольные волны передают изменение *объема*, т. е. чередующиеся сжатие и расширение горных пород. *Поперечные* (вторичные) волны, или S-волны, передают изменение *формы* материала. Движение частиц при продольных волнах происходит в направлении их распространения, а при поперечных волнах — перпендикулярно этому направлению. Различие между этими двумя типами волн показано на рис. 1-4. Р-волны распространяются быстрее, чем S-волны (приблизительно в 1,7 раза). Землетрясение обычно ощущается двумя последовательными ударами: сначала — легкое встряхивание, а затем — более сильный толчок. Первый показывает приход Р-волны, второй — S-волны. Поперечные волны распространяются в твердом материале, но не могут пройти через жидкость, тогда как продольные волны проходят и через твердое, и через жидкое вещества.

Анализ распространения сейсмических волн, возникающих при естественных или искусственных землетрясениях, показывает, что до какой-то глубины волны идут сравнительно медленно. Но как только волна достигает этой глубины, ее скорость резко возрастает: например, скорость Р-волн увеличивается скачком от 6 или 7 км/с примерно до 8 км/с.

Поверхностный слой над этой границей называется *корой*, а слой, лежащий ниже, — *мантией*. Сама же граница называется *разделом Мохоровичича* — по имени югославского сейсмолога, открывшего ее в 1909 г. Этот раздел часто называют просто границей (или поверхностью) *Мохо*, или еще короче — *разделом М.*

Континентальная кора (толщиной 30—50 км) гораздо толще, чем кора океанического дна, мощность (толщина) которой всего несколько километров, как это показано на рис. 1-5. Кора континентальных районов состоит из верхнего слоя гранитных пород и нижнего слоя базальтовых пород того вида, который геологи называют *габбро*. Химический и минеральный состав этих пород меняется в широких пределах. Кроме того, породы одинакового состава могут иметь разную структуру в зависимости от способа их образования. Все эти различия породили множество названий,

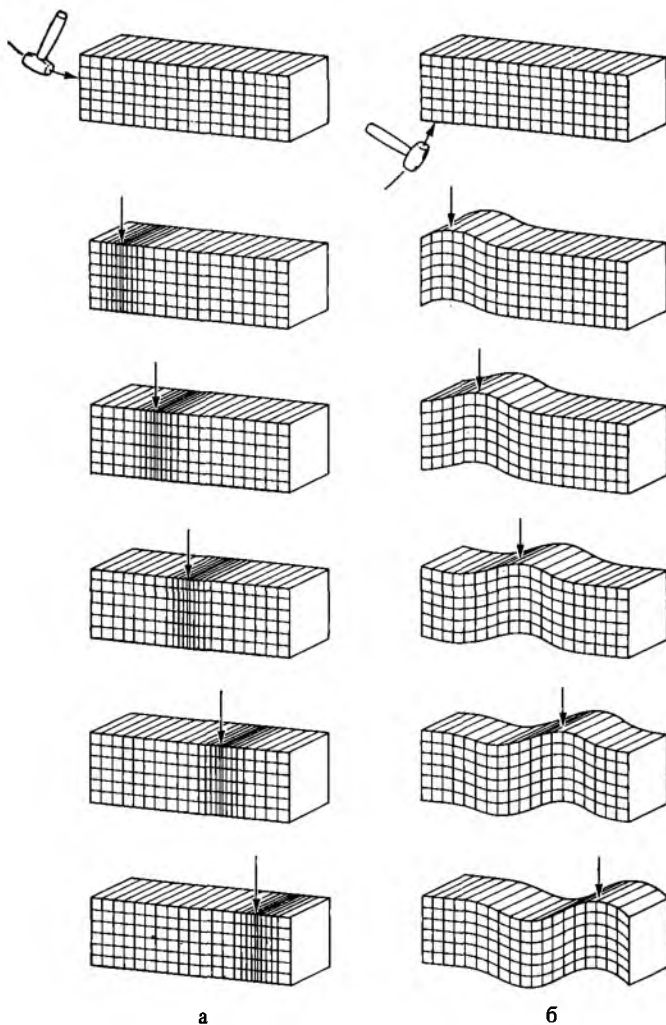


Рис. 1-4. Прохождение импульса сейсмической волны через блок твердого вещества.

Многочисленные удары молотком или другие циклические толчки создают последовательность (цуг) волн. Стрелками показаны гребни волн; а — продольные волны; б — поперечные волны.

понятных чаще всего только специалистам. Мы столкнемся здесь только с несколькими из крупных *типов* горных пород, названия которых перечислены в конце книги. Породы базальтового состава сильно отличаются от гранитных пород. Базальты — темные, довольно тяжелые породы, они «первичны» в том смысле, что образовались из магмы, поступившей непосредственно из

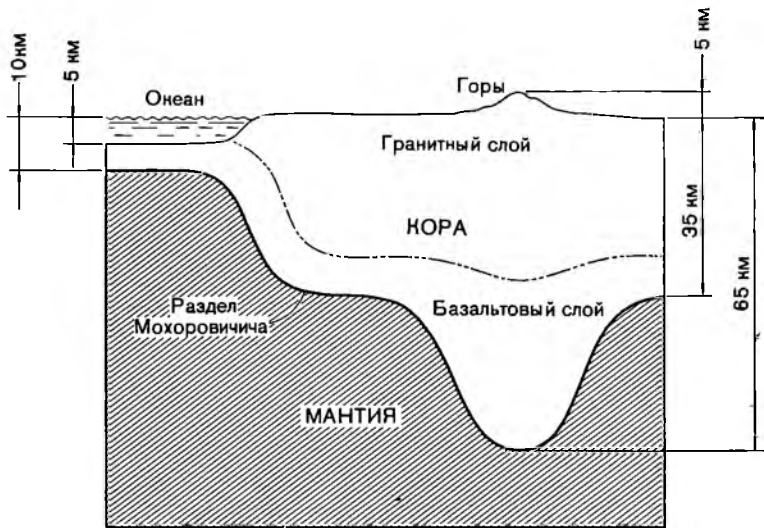


Рис. 1-5. Схематический разрез земной коры.

мантии. Гранитные породы светлее и легче, а химический состав многих из них свидетельствует о геологической «рециркуляции» (т. е. о циклической переработке вещества геологическими процессами.— *Прим. перев.*).

Значительная часть коры находится на большой глубине, откуда невозможно взять образцы горных пород, тем не менее мы можем судить о составе последних, сравнивая сейсмические скорости (скорость производимых землетрясениями сейсмических волн, проходящих через слои этих пород) с измеренными в лаборатории скоростями упругих волн в породах известного состава. Следовательно, когда мы говорим, например, что верхний слой континентальной коры имеет гранитный состав, мы подразумеваем, что в этом слое те же самые скорости сейсмических волн, что и в гранитных породах. В действительности это не обязательно граниты, потому что породы разного состава могут иметь одинаковые скорости. Под океанами кора состоит из тонкого верхнего слоя осадков и двух лежащих ниже слоев, которые называются вторым и третьим слоями. Второй слой сложен предположительно *эффузивными* породами типа базальтов и их *интрузивными* аналогами типа габбро¹. Наличие базальтов в верхней части

¹ *Эффузивные* породы образуются из вулканической магмы, застывающей на земной поверхности. Их можно узнать по структуре (стекловатой или гонкокristаллической), обусловленной быстрым охлаждением. *Интрузивные* породы образуются, когда магма охлаждается и затвердевает на глубине; эти породы отличаются более грубой структурой с крупными зернами (кристаллами), что связано с медленным остыванием. *Габбро* — один из типов интрузивных пород; по составу габбро эквивалентны базальтам.

второго слоя доказано работами по Проекту глубоководного бурения (см. гл. 3). До сих пор не установлено, из чего состоит третий слой. Он также может быть сложен либо каким-нибудь видом габбро, либо породами, которые называются серпентинитами (см. таблицу в конце книги). Таким образом, океаническая кора отличается сравнительно малой толщиной и отсутствием гранитного слоя. (Верхняя часть мантии состоит, очевидно, из пород, которые гораздо тяжелее гранита, таких, как перидотит и эклогит.) Малая толщина океанической коры установлена сейсмологическими экспериментами только в 1950-х годах. Из-за недостатка данных строение коры представлялось во времена Вегенера не совсем таким, как показано на рис. 1-5. Однако уже тогда у геологов были правильные идеи. Они сделали вывод, что континентальная кора существенно отличается от коры под дном океана; они также подозревали, что нет материков с тонкой «океанической» корой и нет участков океанического дна с толстой «континентальной» корой.

Эта идея подтверждалась измерениями силы тяжести, которые показывали, что под районами с высоким рельефом находятся «корни», состоящие из материала малой плотности. Поскольку породы земной коры легче материала мантии, это явление было истолковано как показатель того, что кора толще там, где выше поверхность Земли. Кора как бы плавает на поверхности мантии, как айсберг в океане. Согласно закону Архимеда, все айсберги, чтобы они могли плавать, должны быть глубоко погружены в воду. Чем выше айсберг, тем больше его подводная часть. Этот закон приложим, очевидно, и к земной коре: возвышенные материка имеют более толстую кору, чем низменные пространства океанов. Это явление называется изостазией. Оно означает, что океан — это не просто результат присутствия воды; деление земной поверхности на сушу и море обусловлено различным устройством недр Земли. Материк не может погрузиться, пока сохраняется в силе основной закон плавучести. Таким образом, материк *не может* быстро превратиться в океан, и наоборот. Вегенер подчеркнул это обстоятельство и тем самым опроверг теорию сухопутного моста. Современные сейсмические и гравиметрические исследования океанического дна показывают, что Вегенер был прав.

ПРЯМАЯ СВЯЗЬ МЕЖДУ КОНТИНЕНТАМИ

Самое убедительное свидетельство прямой связи, существовавшей между континентами, — это размещение древних ледников. Через различные промежутки времени происходит на Земле оледенение. В нынешнем четвертичном периоде, который продолжается около 2 млн. лет, Земля прошла через несколько эпох оледенения, разделенных межледниковыми эпохами. Во время последнего такого оледенения, которое закончилось только около

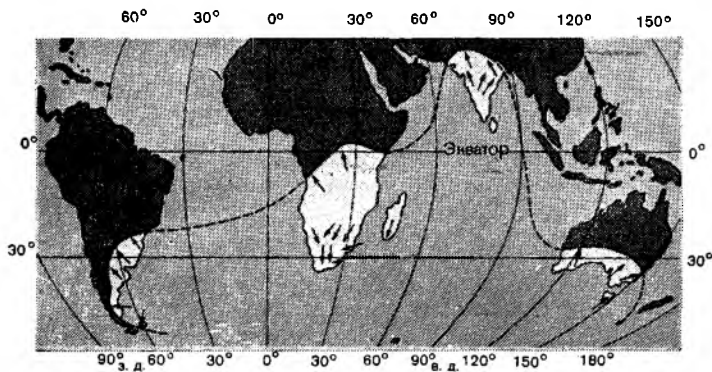


Рис. 1-6. Карта оледенения Гондваны в конце каменноугольного периода [24]. Материки показаны в их нынешнем положении. Стрелками обозначено направление течения льда.

10 тыс. лет назад, большая часть Европы и Северной Америки находилась под толстым слоем льда. Однако в период, предшествующий четвертичному, Земля больше 100 млн. лет была свободна ото льда. До сих пор неизвестно, почему оледенения происходят только в определенное время, и этот вопрос представляет интересную тему для обсуждения, но здесь мы не имеем возможности рассматривать ее.

В этой проблеме нас особенно занимает вопрос, какие свидетельства своего существования оставляют ледники в геологической истории Земли. Мощные материковые ледники при своем движении по твердым породам царапают их, оставляя характерные следы, называемые ледниковой штриховкой. На своем пути ледники создают особые формы рельефа, такие, как ледниковые долины с крутыми бортами. Они также дробят и размалывают камни, переносят обломки вниз по долине и откладывают их перед своим фронтом — там, где происходит таяние льда. Образующиеся в результате накопления этих обломков осадочные породы имеют настолько характерный облик, что их ледниковое происхождение может быть установлено опытным путем геолога даже спустя миллионы лет после таяния ледника. Анализ распределения ледников в течение древней геологической истории Земли показывает, что оледенение охватывало обширные площади в каменноугольно-пермское время, примерно 300 млн. лет назад. Это оледенение затронуло все материки южного полушария. Когда мы смотрим на карту этого оледенения (рис. 1-6), нас удивляет картина распределения ледников: тропические районы, такие, как Индия и Африка, были подо льдом, но едва ли можно найти для этого времени следы оледенения в остальной части северного полушария, даже на территориях, находящихся вблизи современного Северного полюса.

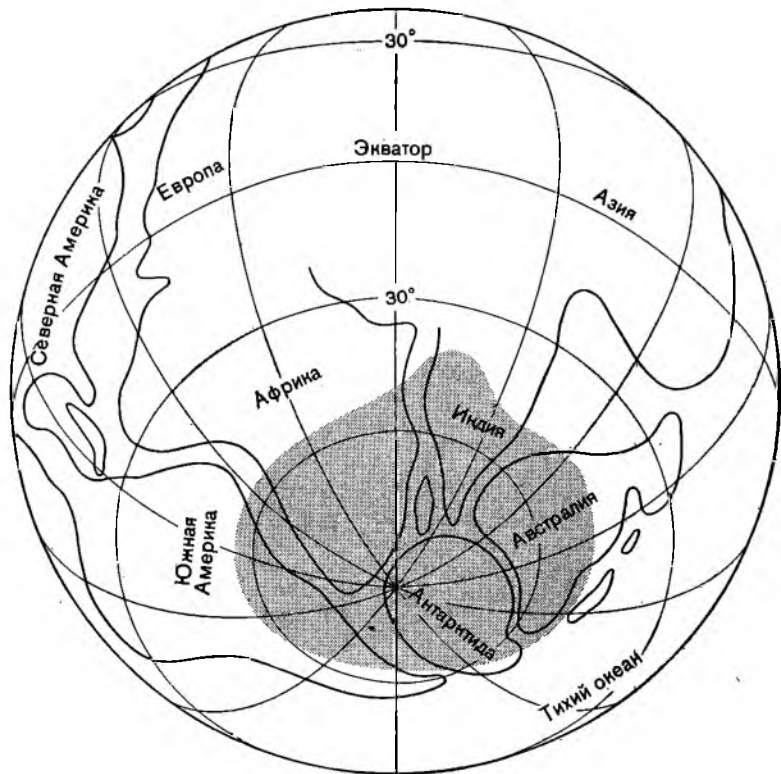


Рис. 1-7. Карта оледенения Гондваны в конце каменноугольного периода [24].
Материки соединены по схеме интерпретации А. Вегенера.

Теория дрейфа континентов дает нам четкое объяснение этой картины. На рис. 1-7 показан праматерик Гондвана¹. Обратите внимание на то, что ледники образуют почти круговую ледяную шапку в полярном районе Гондваны. Вероятно, именно благодаря этому впечатляющему доказательству теория континентального дрейфа встретила энтузиазм геологов из южного полушария, таких, как А. Л. Дю-Тойт из Южной Африки и С. У. Кэри из Австралии, и поддерживалась ими даже тогда, когда она была практически отвергнута большинством ученых северного полу-

¹ Гондваной назван гигантский материк южного полушария, составными частями которого были современные южные континенты. Предположение о том, что этот материк раньше существовал, основано на распределении ископаемых остатков, например каменноугольной флоры *Glossopteris*. Название «Гондвана» (по имени древнего индийского племени гондов) предложил австрийский геолог прошлого века Э. Зюсс, который исходил из теории сухопутного моста.

шария. Геологи из южного полушария сами наблюдали следы древних ледников и были уверены, что объяснить их можно только в том случае, если удастся доказать, что материки двигались.

КОНТРАКЦИОННАЯ ТЕОРИЯ И ДРЕЙФ КОНТИНЕНТОВ

Как было сказано во введении, одной из крупнейших геологических проблем, перечисленных Адамсом, является *орогенез*, или происхождение великих горных хребтов. Как же были воздвигнуты такие величественные хребты, как Альпы, Гималаи, Скалистые горы, Анды? Отдельные толстые пачки горных пород, слагающих эти горы, представляют собой осадочные отложения, образовавшиеся в давние времена на морском дне. Значит, горы каким-то образом были подняты с этого дна. Но как-то страшно вато подумать, что там, где ныне воздымаются горы, прежде была океанская котловина, на дне которой отложился слой осадков толщиной 10 тыс. метров. Тем не менее многие такие котловины, называемые *геосинклиналями*, формировавшиеся на морском дне, потом неизбежно поднимались и образовывали горы. Что могло заставить их воздыматься?

Господствовавшая раньше теория орогенеза была основана на представлении о сжимающейся Земле. В свою очередь это представление базировалось на другой теории—о «горячем» происхождении нашей планеты, которая, как считалось, вначале была «огненным» шаром из раскаленного газа, а затем последовательно уплотнялась и постепенно остывала. В большинстве случаев при геологических съемках в горных районах обнаруживается наклон слоев. Во многих местах слои горных пород образуют своего рода волны, называемые *складками* и состоящие из чередующихся арок (*антиклиналей*) и прогибов (*синклиналей*); в некоторых случаях породы так сильно смяты в складки, что слои оказываются перевернутыми, как это видно на рис. 1-8. Казалось, что теория сжатия Земли (теория контракции) легко объясняет образование складок. Согласно этой теории, когда поверхностная часть горячей Земли начала остывать, затвердевать и сжиматься, ее объем уменьшился. Внутренние же части были еще горячими. Растяжение, возникшее в быстро сжимающемся внешнем слое, вызвало образование трещин на его поверхности, подобно тому как возникают трещины на поверхности высыхающей грязи. К таким гигантским трещинам, где могла собираться вода и могло происходить осадконакопление, были приурочены геосинклинали. Недра Земли затем также начали остывать, их объем должен был уменьшаться. Сокращение объема должно было повлечь за собой сжатие уже остывшей поверхности: как костюм, когда он велик, земная кора стала «слишком велика» для сократившихся внутренних зон Земли и сморщилась в складки. Так объяснялось возникновение складчатых горных хребтов.



Рис. 1-8. Пример сильно смятых в складки третичных песчаников, п-ов Кии, Япония (фото Ф. Кумона, Университет Киото).

Теория казалась правдоподобной, но ее надо было доказать количественно. В одной из попыток такого доказательства геологи вначале определили степень сжатия в горных хребтах. По этим данным было подсчитано, что вся Земля должна была охладиться на тысячи градусов, чтобы сокращение объема было достаточным для образования одной только горной цепи высотой в несколько тысяч метров. Такое сильное охлаждение представлялось нереальным. Еще сложнее оказалось объяснить то, что хребты образовались в разное время, а некоторые из них — совсем недавно. Невозможно представить себе, что Земля могла остывать на тысячи градусов перед воздыманием каждого из хребтов. На эту проблему было указано уже во времена Вегенера, и с тех пор контракционная теория утратила под собой почву.

В настоящее время в результате различных космогонических исследований даже основное допущение — что Земля была раньше в раскаленном состоянии — подвергается серьезному сомнению. Поэтому господствовавшая прежде контракционная теория теперь уже не кажется правдоподобным объяснением горообразования. Вегенер заявил, что для смятия слоев в складки и для формирования гор никакой контракции не требуется. Он утверждал, что передовой край надвигающегося материка должен встречать сопротивление и в результате этого сжиматься и сминаться в складки. Когда Северная Америка и Южная Америка смещались на запад, оставляя за собой Атлантический океан, на их переднем крае образовывались горы: Сьерра-Невада и соседние хребты в Северной Америке и Анды в Южной Америке. Дальше Вегенер предположил, что после раскола Гондваны Индия стала двигаться на север и в конце концов столкнулась с Азиатским материком. Наползание Азии на Индию в зоне их столкновения привело к образованию Гималаев.

Теория континентального дрейфа, выдвинутая метеорологом Вегенером, стала настоящим переворотом в сложной проблеме орогенеза, которая годами вызывала смущение и недоумение профессиональных геологов. Вызов, брошенный дерзкой теорией Вегенера, был поддержан некоторыми геологами, но большинство отнеслось к столь простой логике скептически.

Как уже было сказано, многие горные породы, слагающие современные горные хребты, первоначально накапливались на дне моря, причем их мощность часто превышала 10 тыс. метров. Все подобные отложения, как согласно заявляли специалисты, образовались на мелководье. Но если море было мелким, то как могли накопиться такие толщи пород? Единственным объяснением могло быть то, что морское дно погружалось по мере того, как накапливались новые и новые слои осадков, так что глубина океана оставалась постоянной. Таким образом, осадки опускались все глубже и глубже в недра Земли. В настоящее время те же самые слои подняты высоко над уровнем моря. В какой-то момент процесс опускания осадочного бассейна, или геосинклинали, должен был смениться на обратный и привести к воздыманию пород и превращению прогиба в горный массив. Почему прогибы возникали именно в тех местах, которые потом превратились в горы? Мы видим, что теория Вегенера дает ключ к решению и этой проблемы.

ЧТО ПРИВОДИТ МАТЕРИКИ В ДВИЖЕНИЕ? ВЫЗОВ ГЕОФИЗИКЕ

Теория континентального дрейфа бросила вызов классической геологии, дав простое и логичное объяснение множеству геологических процессов. Однако еще более дерзкий вызов был брошен геофизике.

Вопрос, который поставила эта теория, был очень серьезным. Какого рода силы могли заставить материи передвинуться на расстояние в несколько тысяч километров? Что было движущим механизмом континентального дрейфа? Иначе говоря, объяснение *результата* не имеет смысла, если не удастся установить *причину*; поэтому даже если вегенеровская теория континентального дрейфа действительно дала четкое объяснение многих геологических явлений, например древнего оледенения и горообразования, она мало кем будет считаться научной, если не сможет объяснить, что послужило причиной движения континентов. Вегенер понимал, какое решающее значение имеет для его теории эта перво-причина, но ему так и не удалось объяснить ее. Нелегко было — даже такому человеку, как Вегенер, — «сдвинуть» с места «неподвижную» Землю.

Вегенер предположил, как показано на рис. 1-1, что составные части Гондваны располагались раньше вокруг Антарктиды. Позднее суперматерик стал раскалываться и ушел из района Южного

полюса. Это дало Вегенеру повод предполагать, что континенты в общем расходятся от полюсов и дрейфуют к экватору. Он считал, что это явление связано с действием особой «полюсобежной» силы и объяснял ее происхождение так: Земля вращается вокруг своей оси, поэтому и существует центробежная сила вращения. Эта сила слегка отклоняет силу земного притяжения, так что она оказывается направлена не к центру Земли, а ближе к экватору, хотя и очень немного. Следовательно, рассуждал Вегенер, материки, плавающие на поверхности Земли, постепенно движутся к экватору. Эта гипотеза натолкнулась на возражения, связанные с реальной величиной этой силы; как показали расчеты, проведенные различными учеными, сила, оттягивающая материки от полюсов, чрезвычайно мала: она в несколько миллионов раз меньше силы тяжести. Но Вегенер настаивал, что хотя эта сила, вероятно, и мала, но вследствие ее непрерывного действия в течение долгого времени она может в конце концов двигать континенты. Многие ученые продолжали все же считать, что для перемещения материков, плавающих на твердой мантии, требуется гораздо бо́льшая сила. Кроме того, эта сила должна быть достаточной, чтобы сминать в складки некогда ровные слои осадочных пород и нагромождать их, создавая горы высотой в несколько тысяч метров, чего не могла сделать «полюсобежная» сила.

Западный дрейф обоих Американских материков Вегенер приписывал приливному действию Солнца и Луны. Эта теория также встречала возражения. Оппозицию возглавил знаменитый английский геофизик Г. Джеффрис. В каждом издании своей очень известной и очень глубокой по содержанию книги «Земля» [27] Джеффрис квалифицировал вегенеровскую теорию континентального дрейфа как физически нереальную.

СМЕРТЬ ТЕОРИИ

Вплоть до конца 1920-х годов теория Вегенера оставалась предметом горячих споров. Затем интерес к ней почти полностью пропал: во-первых, потому, что эта теория противоречила общепринятому в то время убеждению, что Земля твердая и прочная, а во-вторых, потому, что Вегенеру не удалось удовлетворительно объяснить, какая сила приводит материки в движение. Ученые не могли согласиться с его предположением, что дрейф континентов осуществился в недавний период истории Земли — скажем, в последние 200 млн. лет, которые составляют очень малый процент от всего возраста Земли, насчитывающего 4,5 млрд. лет. Они указывали, что если континентальный дрейф и был когда-то возможен, он должен был происходить только в ранней стадии истории Земли, когда она была еще горячая и мягкая. Такое рассуждение было, конечно, основано на господствовавшей в то время гипотезе «горячего» происхождения. Итак, теория континентального дрейфа, родившись в 1912 г., к 1930-м годам была

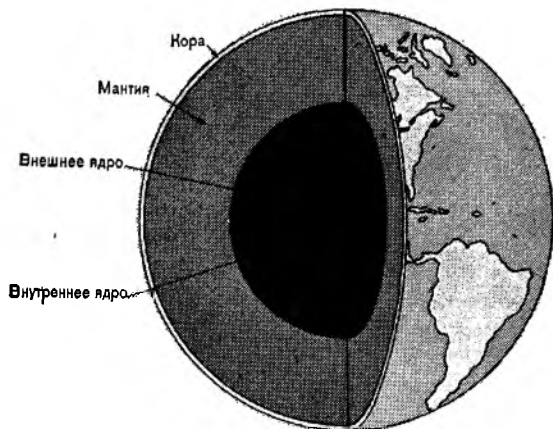


Рис. 1-9. Разрез Земли.
Толщина коры преувеличена.

уже практически мертва. Осталась только горстка упрямых приверженцев этой теории — геологов из южного полушария, которые по-прежнему стояли перед фактом распространения каменноугольно-пермских ледниковых отложений на континентах этой части Земли.

СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ

Оставленная большинством ученых примерно на двадцать лет теория континентального дрейфа внезапно возродилась в конце 1950-х годов. Подкреплённая новыми доказательствами она заставила по-новому взглянуть на Землю. Причину такого возрождения теории можно лучше понять, если суммировать некоторые дополнительные важнейшие факты о Земле. Прежде всего строение внутренних частей Земли к настоящему времени изучено сейсмологическими методами. Эти методы в чем-то похожи на «метод», каким мы пытаемся выбрать спелый арбуз. Как звук, который издает арбуз, когда мы тихонько постукиваем по нему, позволяет судить о его спелости, так и сейсмические волны говорят нам о внутреннем состоянии Земли. Они показывают, что Земля имеет слоистое строение (как луковица); она включает внешнюю кору, твердую мантию, уходящую до глубины 2900 км от поверхности, внешнее ядро, которое считается жидким, и, наконец, в центре Земли, твердое внутреннее ядро радиусом около 1100 км (рис. 1-9). Кора, состоящая из легкого гранита и других типов горных пород, имеет низкую плотность. Каждый последующий слой коры имеет более высокую плотность, чем находящийся над ним. Мантия, которая начинается у раздела Мохоровичича, состоит из еще более тяжелых пород, таких, как пери-

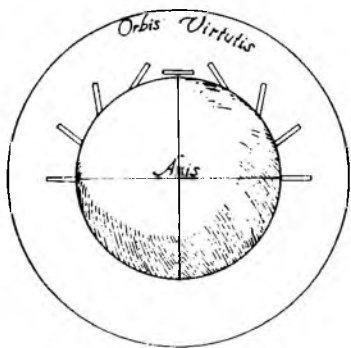


Рис. 1-10. Сферическая магнитная Земля по У. Гильберту [18].

дотит. До недавнего времени считалось, что вся мантия твердая, но теперь мы предполагаем, что на некоторых глубинах породы настолько близки к точке плавления, что способны к пластическому течению. Внешний слой ядра обычно считается состоящим в основном из жидкого железа, смешанного с такими элементами, как никель, углерод, кремний или сера. (Это жидкое состояние внешнего ядра имеет, как мы покажем в дальнейшем, прямое отношение к земному магнетизму.) Внутреннее ядро состоит из тех же элементов, но в твердой форме.

ЗЕМНОЙ МАГНЕТИЗМ

Общеизвестно, что стрелка компаса неизменно указывает на север или почти на север. Это явление уже в XIV в. использовали моряки для навигационных целей. Уильям Гильберт, придворный врач королевы Елизаветы I, объяснил (в 1600 г.) это явление, предположив, что сама Земля — огромный сферический магнит, полюсы которого расположены почти у географических полюсов (как показано на рис. 1-10). Гильберт рассуждал, что если это так и если учесть, что разные магнитные полюсы притягиваются, а одинаковые — отталкиваются, естественно, что магнитные стрелки компасов будут стремиться располагаться одним концом на север, а другим — на юг. Это чисто интуитивный вывод Гильберта. Точнее северный и южный полюсы магнита следовало бы называть стремящимися к северу или к югу. (Интересно заметить, что геомагнитный полюс у Северного географического полюса в действительности является южным магнитным полюсом — иначе он не притягивал бы северный конец стрелки компаса.)

Данное Гильбертом объяснение было правильным, но, как это всегда бывает в научных исследованиях, оно породило другой вопрос: почему Земля — магнит? Это трудный вопрос. Напомним, что происхождение магнитного поля Земли было отнесено Адамсом в 1947 г. к одной из самых трудных нерешенных проблем геофизики. Простейшей из всех теорий о происхождении земного магнетизма была та, в которой предполагалось, что в центре Земли имеется огромный постоянный магнит. Давно уже известно, что среди широко распространенных металлов только железо и никель могут быть постоянными магнитами. (Эти материалы называются *ферромагнитными*.) Поскольку земное ядро состоит главным образом из железа и никеля, такое объяснение земного

магнетизма казалось очевидным. Однако это предположение оказалось неправильным по одной простой причине: все ферромагнитные вещества теряют свои ферромагнитные свойства, когда нагреваются выше определенной температуры. Иначе говоря, магнит перестает быть магнитом, если его температура достигает величины, которая называется *точкой Кюри* (770°C для железа и 358°C для никеля). Таким образом, ясно, что железо и никель в ядре не могут создать постоянный магнит, так как температура в ядре определено выше точки Кюри любого металла. Изучение сейсмических волн показывает, что внешняя часть земного ядра жидкая, так что температура там должна быть выше точки плавления железа и никеля, а лабораторными экспериментами установлено, что точки Кюри железа и никеля много ниже, чем их температуры плавления. Фактически только на глубинах не более 50 км от земной поверхности температура достаточно низка, чтобы материал мог быть ферромагнитным.

Согласно другой предлагавшейся гипотезе, любое вращающееся тело неизбежно намагничивается просто вследствие своего вращения. Английский физик, лауреат Нобелевской премии П. М. С. Блэккет, который выдвинул эту гипотезу, предположил, что магнетизм таких небесных тел, как Солнце, некоторые звезды и Земля, может быть обусловлен их вращением. Он подчеркивал, что такое объяснение не основано на каких-либо известных законах физики, а требует разработки какой-то совершенно новой концепции. Для доказательства своей теории Блэккет построил в конце 1940-х годов поразительно точный магнитометр. Однако он не добился успеха и сам опроверг свою собственную гипотезу. К счастью, сообщая о своей неудаче в широко известной статье, озаглавленной «Отрицательный эксперимент» [6], он дал замечательно полное описание проведенных им очень точных и сложнейших измерений. В действительности этот эксперимент не был неудачей, поскольку для его проведения был изобретен исключительно чувствительный магнитометр. Позднее, когда Блэккет начал изучать магнетизм горных пород, этот прибор оказался в высшей степени полезным, и проведенные с его помощью опыты внесли жизненно важный вклад в возрождение теории континентального дрейфа. Магнитометры системы Блэккета имеются в настоящее время во многих геофизических лабораториях мира.

Из многих выдвигавшихся теорий к настоящему времени сохранилось только одно объяснение происхождения магнитного поля Земли, то, в котором Земля рассматривается скорее как электромагнит, чем как постоянный магнит. Магнитное поле может быть образовано либо постоянным магнитом, сделанным из ферромагнитного материала, либо с помощью электрического тока. В 50-х годах нашего столетия некоторые ученые, например У. М. Эльзассер (из США) и Э. Буллард (из Англии), пришли к выводу, что если Земля слишком горяча и не может быть постоянным магнитом, то она является, очевидно, своего рода элек-

тромагнитом, и решительно взялись за изучение возможности того, что геомагнитное поле возникает вследствие электрических токов в Земле.

Чтобы возник поток электричества, достаточный для создания геомагнитного поля, электропроводность земных недр должна быть такой же высокой, как у металлов. Ядро, состоящее из железа, является единственной частью Земли, которая, возможно, обладает такой высокой проводимостью. Кроме того, должна постоянно сохраняться электродвижущая сила (напряжение), поддерживающая электрический ток и геомагнитное поле в течение геологически длительного времени. Другими словами, земное ядро должно быть не только хорошим проводником, через который проходит электрический ток, но и должно действовать как динамомашина, или генератор. Это представление о природе земного магнетизма называется *теорией динамо*.

Однако немыслимо, чтобы внутри ядра Земли мог существовать некий механизм, похожий на обычные генераторы — сложнейшие механические устройства. И все же в 1960-х годах молодые геофизики — американец Г. Баккус и англичанин А. Херзенберг — утверждали, что тело, подобное земному ядру, может, по крайней мере теоретически, действовать как динамо. В 1963 г. англичанам Ф. Д. Лоузу и И. Уилкинсону удалось построить генератор, похожий на тот, который должен быть по теории. В разработке этой модели участвовали также японские ученые Х. Такеути, И. Симадзу и Т. Рикитакэ. Однако теория до сих пор еще не доказана окончательно. С развитием электронно-вычислительной техники теоретические расчеты становились все более утонченными, и в доказательстве теории вскрывались новые сложности. Поэтому было бы правильнее сказать, что происхождение магнитного поля Земли все еще остается тайной. Но теоретики уже теперь считают возможным согласиться по крайней мере с тем, что магнитное поле Земли генерируется своего рода динамомашиной.

Теория динамо в том виде, в каком она предстает на сегодняшний день, допускает, что в ядре Земли происходит исключительно сложное взаимодействие различных процессов. Мы не будем описывать здесь все эти процессы, но важно понять, что для того, чтобы Земля работала как генератор, необходимы следующие условия:

- 1) ядро Земли должно состоять из вещества, проводящего электрический ток как же хорошо, как металлы;
- 2) вещество ядра должно быть в жидком состоянии;
- 3) проводящая жидкость должна как-то перемешиваться; процесс перемешивания как раз и дает ту энергию, которая необходима для поддержания магнитного поля.

Из этих условий следует, что земное ядро состоит из жидкого металла, — вероятнее всего, из железа, самого известного и распространенного в мире металла.

Примечание: Знаменитый американский геофизик Ф. Берч сделал в своей классической статье [5] следующее шутовское замечание:

«Неискушенного читателя следует предупредить, что наш обычный язык изменяется, когда речь идет о недрах Земли, как бы отражая господствующие там высокие давления.

Вот несколько примеров таких изменений:

Слова, отражающие высокие давления

уверенный
несомненно
твёрдое доказательство
неоспоримый довод
чистое железо

Обычные выражения

сомнительный
возможно
туманное предположение
слабое возражение
неопределенная смесь всех элементов».

ПАЛЕОМАГНЕТИЗМ: ИСТОРИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

На первый взгляд теория континентального дрейфа и земной магнетизм имеют мало общего. Однако в конце 1950-х годов было показано, что на самом деле они очень тесно связаны. Первый шаг в понимании этого был сделан геофизиками, когда они задались вопросом, всегда ли стрелка компаса показывала на север. Если бы геомагнитное поле создавалось «постоянным» магнитом, то история земного магнетизма была бы скучным повторением одного и того же, но если мы решим, что магнитное поле Земли — это электромагнитное поле, создаваемое динамомашиной, то его история может оказаться весьма разнообразной. Концепция динамо была подкреплена следующим наблюдением. В современном Токио магнитная стрелка отклоняется на 6° к западу от направления на истинный север. Угол этой девиации называется *магнитным склонением*. Интересно, что склонение с течением времени меняется: известно, что 150 лет назад стрелка компаса в Токио отклонялась на 3° к востоку. Такие явления хорошо изучены во всем мире и называются *вековыми вариациями* геомагнитного поля. Точные измерения и регистрация земного магнетизма начались только 300 лет назад. Понятно, что это слишком короткий период, чтобы получить данные об изменениях, происшедших в течение всего геологического времени. Важно, однако, отметить, что и за этот короткий отрезок истории человечества магнитное поле Земли значительно изменилось. Насколько же сильнее могло оно измениться за долгий период геологической истории? Ответ на этот интересный вопрос может пролить свет на природу земного магнетизма. Но как узнать, каким было магнитное поле миллион лет назад? Магнитное поле — это только «поле», а не что-либо вещественное: изменяясь во времени, оно не оставляет ничего, что говорило бы о его прежнем состоянии, — вот почему чрезвычайно трудно проследить его историю. Тем не менее была обнаружена одна интересная возможность: постоянная естественная намагниченность горных пород может оказаться «отпечатком» магнитного поля, каким оно было раньше. Из различных видов горных пород рассмотрим вулканические породы —

те, которые представляют собой остывшую и затвердевшую магму. Исследование вулканических пород, таких, как базальты, показывает их удивительно сильную намагниченность. Конечно, она составляет разве что тысячную долю от силы обычного магнита, который может притягивать железные предметы, держать на весу гвозди. И все же с помощью чувствительного прибора определить направление намагничения вулканических пород — довольно простая задача. Но прежде всего — почему они намагничены? Ответ таков: когда вулканическая порода появляется на свет, т. е. когда она извергается из жерла вулкана, она представляет собой раскаленную лаву, и ее температура много выше, чем точка Кюри. Когда лава, остывая, проходит через точку Кюри, ее магнитный момент устанавливается в направлении действующего в это время геомагнитного поля и остается в таком положении навсегда. Эта «окаменевшая» намагниченность свойственна всем вулканическим породам. Ее исследовали в 1940-х годах многие ученые, в том числе немец И. Г. Кёнигсбергер, японец Т. Нагата, француз Э. Телье. Знаменитый Нобелевский лауреат француз Л. Нэль дал хитроумное теоретическое объяснение этого явления, названного *термоостаточной намагниченностью*. Поскольку механизм такой намагниченности был уже установлен, появилась возможность, по крайней мере в теории, проследить историю магнитного поля Земли, измеряя направление намагниченности горных пород разного геологического возраста.

Эта область исследований называется *палеомагнетизмом*. Палеомагнетизм приобрел большую популярность в 1950-х годах и раскрыл много новых фактов; самыми замечательными из них оказались те, что были связаны с возрождением теории континентального дрейфа! Однако перед тем, как анализировать этот важный аспект палеомагнетизма, давайте на время отвлечемся и рассмотрим другой спорный вопрос, который в равной степени важен для раскрытия темы данной книги.

ИНВЕРСИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ ИЛИ САМООБРАЩЕНИЕ НАМАГНИЧЕННОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД?

Изучение палеомагнетизма традиционно развивалось наиболее активно во Франции и в Японии. Пионерами в этой области исследований были Б. Брюнес и М. Матуяма. Уже в 1906 г. Брюнес обнаружил, что некоторые породы намагничены противоположно современному геомагнитному полю, и высказал предположение, что в момент образования этих пород магнитное поле Земли было обратным. В 1920-х годах Матуяма установил, что около половины изученных им вулканических пород из Японии и Кореи намагничены в направлении современного магнитного поля Земли, остальные — в противоположном направлении. На основании этого исследования Матуяма сделал вывод, что геомаг-

нитное поле переменяло знак (испытало *инверсию*) примерно в начале ледниковой эпохи, в раннем плейстоцене. Это утверждение прозвучало тогда очень дерзко. Однако позднее, в 1950-х годах, аналогичные данные стали поступать из Исландии, Франции, Англии, США, СССР и других стран. Американцы А. Кокс, Р. Доуэлл и Б. Далримпл и австралийцы И. Мак-Дугалл, Д. Тарлинг и Ф. Чеймлон детально изучили этот вопрос и выяснили историю инверсий геомагнитного поля для последних нескольких миллионов лет.

Должен признаться, что и меня очень интересует эта проблема. В 1951 г., будучи еще студентом Токийского университета, я выполнил серию опытов под руководством проф. Т. Нагата. Я изучал, каким образом ферромагнитные минералы, содержащиеся в различных вулканитах, приобретают термоостаточную намагниченность, когда при остывании в магнитном поле они проходят через точку Кюри. Технология опыта была такова: пробы породы, помещенные в пробирки из кварцевого стекла, нагревались до температуры выше точки Кюри и затем охлаждались в магнитном поле. В ходе этих экспериментов я заметил, что одна из проб, состоящая из ферромагнитных зерен, которые были извлечены из пемзы японского вулкана Харуна, намагнитилась в направлении, противоположном внешнему полю, созданному в моей лаборатории. Это, конечно, могло получиться за счет неправильного обозначения ориентировки образца; казалось совершенно ясным, что получить намагниченность, обратную по отношению к намагничивающему полю, нельзя и что это полная бессмыслица, если фундаментальные законы физики остаются в силе. Однако полученный результат не был ошибкой. Я был ленивым студентом и не утруждал себя тем, чтобы повторять процедуру нагревания и охлаждения для каждой пробы отдельно; вместо этого я ставил в печь сразу по несколько проб. Таким образом, когда я обнаружил, что только одна из них намагнитилась в противоположном, чем другие, направлении, я понял, что ошибки быть не может. Мы оба — профессор и я — были совершенно ошеломлены этим странным явлением. Но вскоре мы сообразили, что это может оказаться важным открытием. Мы стали лихорадочно проводить различные эксперименты и придумали «теорию», объясняющую физические причины этого феноменального явления, которое мы назвали *обратным термоостаточным намагничиванием*. Тогда же Т. Рикитакэ обратил наше внимание на статью Л. Нэля [39], в которой такой феномен был теоретически предсказан. Статья была напечатана во Франции примерно в то же самое время, когда мы проводили в Токио свои опыты. Интуиция Нэля произвела на нас большое впечатление. Позднее мы узнали, что исследование Нэля было подсказано письмом к нему американского геолога Джона Грэма, в котором он спрашивал, возможно ли подобное явление теоретически. Вопрос же Грэма был вызван частыми находками пород с

обратной намагниченностью. Он заинтересовался, нельзя ли объяснить это, не привлекая инверсий геомагнитного поля, и не обладают ли некоторые породы способностью к обратному намагничиванию. Джон Грэм умер в 1971 г., но его долго будут вспоминать за его богатое воображение и остроумные идеи во многих областях наук о Земле.

После открытия самообращения остаточной намагниченности в горных породах многие ученые, в том числе и я, заключили, что теперь уже не требуется предполагать инверсию геомагнитного поля в геологическом прошлом. Действительно, в течение нескольких лет не прекращался поток статей по этому вопросу из разных стран мира. Все они касались исследования горных пород, которые имели естественную намагниченность в направлении, противоположном геомагнитному полю; целью работ было узнать, не способны ли эти породы к самообращению намагниченности, подобно породам горы Харуна. Против ожидания, результаты исследований, изложенные в статьях, доказывали, что такие породы встречаются весьма редко. Хотя стало ясно, что самообращение — явление редкое и для его возникновения требуется присутствие особого ферромагнитного материала, этот необычный вид термоостаточного намагничивания настолько увлек меня, что я посвятил целых шесть лет изучению его механизма. Как было выяснено, настоящая причина этого феномена отличается от первых моделей, предложенных как Нэлем, так и нами. Скорее, она связана, по-видимому, с очень сложным квантово-механическим взаимодействием в минералах, содержащихся в пробе. В настоящее время эта проблема все еще является предметом исследований, проводимых молодыми учеными в разных частях земного шара.

Получаемые результаты настолько убедительны, что мы должны, по крайней мере в данный период, признать, что магнитное поле Земли все-таки испытывало инверсии в прошлые геологические эпохи. Значение этих инверсий для нового взгляда на Землю будет объяснено в гл. 2.

ДВИЖУТСЯ ПОЛЮСЫ, ДВИЖУТСЯ И КОНТИНЕНТЫ

Если взять образец лавы японского вулкана Фудзияма и измерить направление остаточной намагниченности, можно установить, где располагался геомагнитный полюс во время излияния лавы. Магнитное поле Земли приблизительно изображается как поле правильного дипольного вида (рис. 1-11), что почти точно соответствует полю стержневого магнита, помещенного в центр Земли. Такой вид поля позволяет установить положение Южного и Северного полюсов по направлению магнитных силовых линий в каждой данной точке. Однако по ряду причин магнитное поле Земли не имеет совершенного дипольного вида. В действительности оно имеет гораздо более сложный характер. Таким обра-

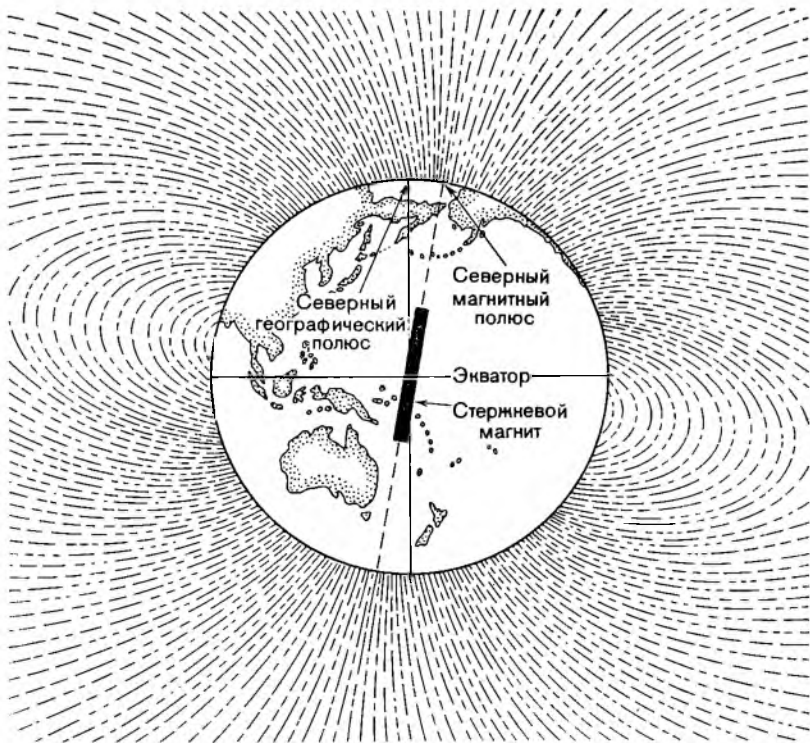


Рис. 1-11. Магнитное поле Земли, очень похожее на поле, которое возникает, если в центр Земли поместить гигантский стержневой магнит и слегка (на 11°) отклонить его от оси вращения [41].

зом, нельзя точно определить положение полюса, если при расчете исходить из предположения о правильном дипольном характере поля. Тем не менее такие подсчеты приближенно верны, особенно если делается достаточно много измерений и берется среднее из них. Это подтверждается измерениями намагниченности молодых горных пород на всем земном шаре. Если мы допустим, что поле было дипольным и в прошлом, то положение геомагнитных полюсов в прежние эпохи можно оценить по направлениям естественной остаточной намагниченности более древних пород. Это предположение (что магнитное поле Земли всегда было дипольным) имеет важное значение, но пока остается только *предположением*.

В конце 1940-х — начале 1950-х годов изучение палеомагнетизма развивалось в основном в Японии и во Франции. В середине 1950-х годов оно было подхвачено английскими учеными, которые с большим умением и энтузиазмом применили его к

исследованию пород разного возраста из всех районов мира с целью последовательного выяснения истории магнитного поля Земли. Следуя за П. М. С. Блэккетом и С. К. Ранкорном, они приложили к этому делу огромные усилия. Хорошо известно, что высокочувствительный магнитометр, построенный Блэккетом для его «отрицательного эксперимента» (описанного выше), сыграл важную роль в данной работе. Этот британский энтузиазм, проявившийся в такой, казалось бы, неувлекательной проблеме и именно в такое время, озадачил нас, работавших в Японии. Англичане известны своей беспредельной любовью к природе и Земле, — возможно, это и было причиной такого энтузиазма, однако проницательность и научное руководство Ранкорна и Блэккета, очевидно, также играли важную роль. Могло показаться, что английские ученые увлеклись просто изучением магнетизма горных пород, но их усилия в большой степени побуждались чьим-то мудрым предвидением. Но каков бы ни был этот стимул, он заставил их разъехаться по всему миру для сбора и изучения образцов горных пород. К 1957 г. они достигли блестящих результатов.

Ранкорн с сотрудниками пытались воссоздать магнитное поле Земли прошлых эпох по положению древних магнитных полюсов. Это был лучший из возможных способов единообразного анализа результатов, полученных при изучении горных пород, собранных в самых различных, отдаленных друг от друга местах. Вначале были исследованы породы из Англии и с Европейского континента и определено положение магнитного полюса для каждого геологического периода от докембрия до современной эпохи. Результат показан на рис. 1-12. Если бы магнитный полюс не менял своего положения на протяжении всей истории Земли, на схеме (рис. 1-12) оно изображалась бы одной точкой. Однако мы видим систематическое движение полюса. Около 250 млн. лет назад, в пермском периоде, магнитный полюс находился к северу от нынешнего положения Японских островов — на значительном удалении от современного Северного полюса; 500 млн. лет назад, в кембрийском периоде, он был еще дальше — в Тихом океане. Это явление называется *блужданием полюсов*.

Весьма интересно, что путь движения полюса, определенный палеомагнитным методом, в грубом приближении соответствует пути движения совсем другого полюса, прослеженному совершенно иным методом. Этот другой полюс — палеоклиматологический, определяемый по размещению окаменелостей древних растений и животных. Совпадение путей обоих полюсов позволяет предполагать, что положение древних палеомагнитных полюсов отражает изменение ориентировки оси вращения Земли. Исходным предположением было то, что в прошлом полярные районы были холодными, а экваториальные — теплыми и что положение ископаемых остатков организмов показывает прежнюю широту тех мест, откуда были взяты образцы. Основываясь на материалах

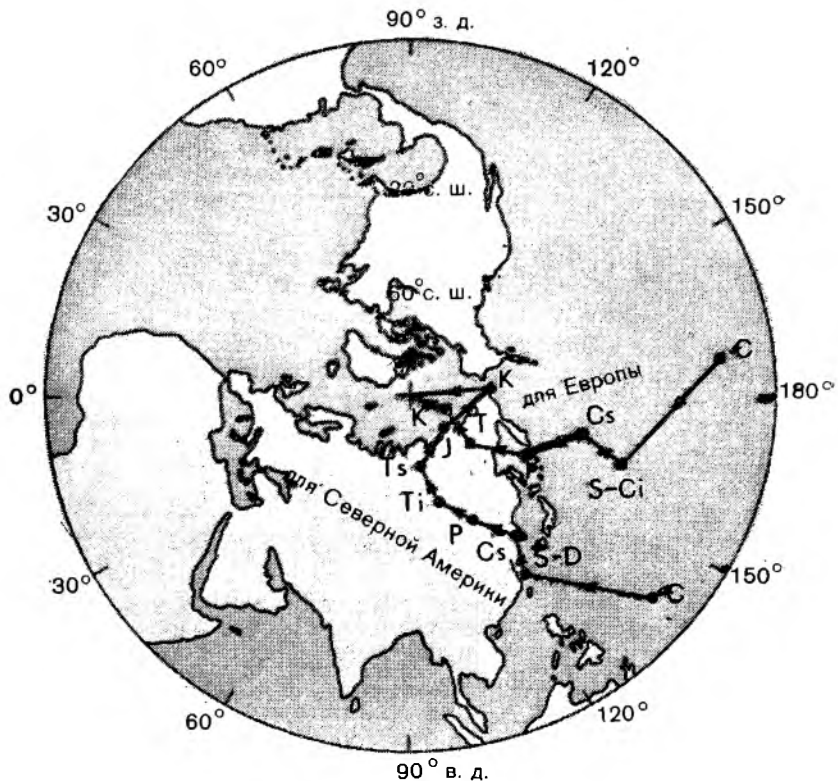


Рис. 1-12. Сравнение путей кажущегося блуждания полюса для Северной Америки (кружки) и для Европы (квадратики) [33].

Сами кружки и квадратики означают существенно устойчивые районы расположения полюса, определенное на каждом континенте для различных геологических периодов. Буквами обозначены названия геологических периодов: *K* — мел; *J* — юра; *T* — триас; *Ts* — поздний триас; *Ti* — ранний триас; *P* — пермь; *Cs* — поздний карбон; *S-Ci* — силур — ранний карбон; *S-D* — силур — девон; *Є* — кембрий.

этого анализа, такие ученые, как Вегенер, Кёппен и Крайхгауер, уже в 1910-х годах начали говорить о блуждании полюсов. Совпадение путей магнитного и палеоклиматологического полюсов, хотя и далеко не точное, должно было вдохновлять английских ученых в их исследованиях.

Ранкорн и его сотрудники интенсивно изучали пути движения магнитного полюса, используя породы не только из Европы, но и из Северной Америки. Результат этой работы также показан на рис. 1-12, где обозначено расположение магнитных полюсов, определенное по намагниченности горных пород Англии и Европы, и то же самое — по породам Северо-Американского материка. Если посмотреть на рисунок, каждому станет ясно, что линии блуждания полюсов подобны одна другой и дают настолько

связную картину, что трудно считать это совпадение движений лишь видимостью или случайностью. Кроме того, при внимательном сопоставлении этих линий обнаруживается, что хотя они и очень похожи одна на другую, но не совсем идентичны. Расхождения имеют систематический характер. С. Ранкорн и И. Эрвинг детально исследовали эти расхождения и пришли к выводу, который должен был способствовать возрождению теории континентального дрейфа.

Их вывод был прост. Если бы палеомагнитологи жили в пермское время, 250 млн. лет назад, они должны были бы установить, что палеомагнитные полюсы для пород, образовавшихся в то время в разных местах земного шара, совпадают, — точно так же, как они совпадают сейчас, в частности, в Европе и в Северной Америке. Теперь посмотрим, что происходит, если Северная Америка отодвигается от Европы. Палеомагнитный полюс ведет себя так, будто он жестко прикреплен к материкам, потому что он определен по палеомагнитным измерениям, которые указывают нам, что древний полюс был на определенном расстоянии от места взятия образца по дуге определенного большого круга. Если континент движется, то и этот полюс движется вместе с ним. Значит, если Северная Америка после пермского периода отодвинулась от Европы, то и полюс отошел вместе с ней, и нельзя ожидать, что палеомагнитные полюсы для этих континентов совпадут. Ранкорн и Эрвинг установили, что полюсы для Северной Америки и Европы занимают явно различное положение, и доказали тем самым, что эти материки отошли один от другого. Было также выяснено, что если следовать представлениям Вегенера и «захлопнув» Атлантический океан, снова свести материки воедино, магнитные полюсы совпадут, как это показано на рис. 1-13. Это исследование возродило теорию дрейфа континентов и дало совершенно независимые свидетельства в ее пользу.

Во время моего пребывания в Кембриджском университете в 1958—1959 гг. почти всякий раз, когда меня знакомили с каким-нибудь геофизиком, он приветствовал меня вопросами: «Верите ли Вы в дрейф континентов?» или «Верите ли Вы в инверсию магнитного поля Земли?» Мне была несколько чужда эта явная склонность английских ученых к таким идеям, как дрейф континентов, и мой ответ обычно звучал нерешительно: «Пожалуй, да, но не безоговорочно». Я хорошо знал об открытиях, сделанных в то время, и понимал, что доказательства весьма убедительны, но мое настроение не вполне совпадало с энтузиазмом англичан.

Как я уже говорил, некоторым из нас казалось какой-то таинной, почему англичанам именно в это время вздумалось возродить теорию континентального дрейфа посредством своих напряженных исследований магнетизма горных пород. Те ученые, которые активно работали, когда теория континентального дрейфа была популярна, к этому времени были уже слишком стары, чтобы ознакомиться с новой областью палеомагнетизма, а более мо-

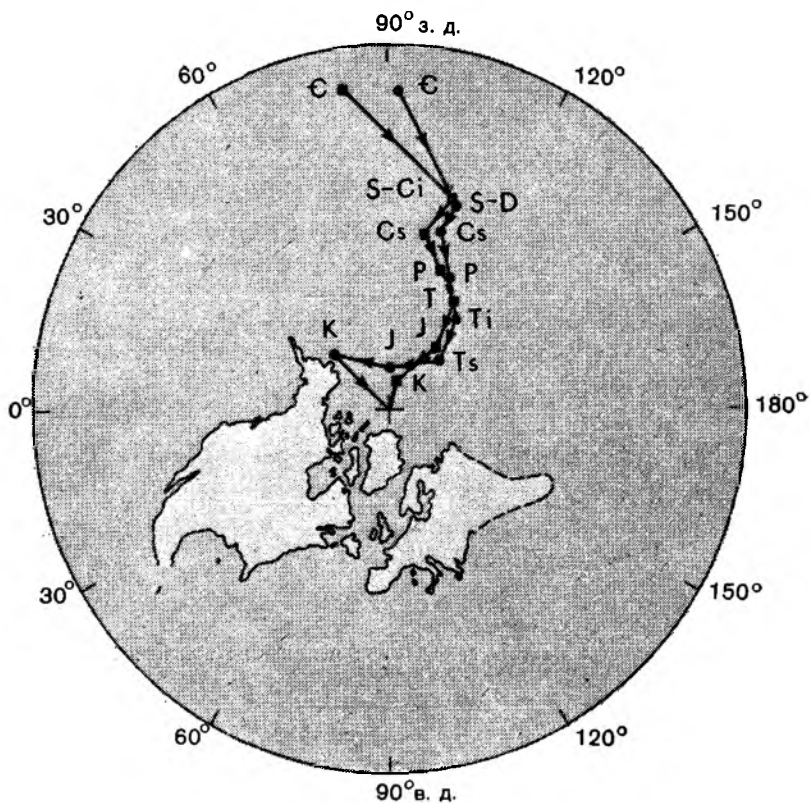


Рис. 1-13. Пути блуждания полюсов совпадают, если представить Северную Атлантику в реконструкции Булларда и др. [см. 33].

Как и на рис. 1-12, кружки (для Северной Америки) и квадратик (для Европы) означают устойчивые районы расположения полюса для каждого геологического периода. Буквенные обозначения см. на рис. 1-12.

лоды исследователи в большинстве стран, разрабатывавшие эту новую область, были мало знакомы с теорией континентального дрейфа. Однако Англия была, вероятно, исключением — в основном, как я полагаю, благодаря отличному учебнику «Основы физической геологии» профессора Эдинбургского университета Артура Холмса [24]. В этой книге живо обсуждалась непопулярная тогда теория дрейфа континентов, а вместе с нею и знаменитая теория Холмса о конвекции в мантии.

ТЕОРИЯ КОНВЕКЦИИ В МАНТИИ

Как уже указывалось, теория континентального дрейфа была в 1930-е годы оставлена, так как не нашлось объяснения тому, каковы причины движения материков. Из многих гипотез,

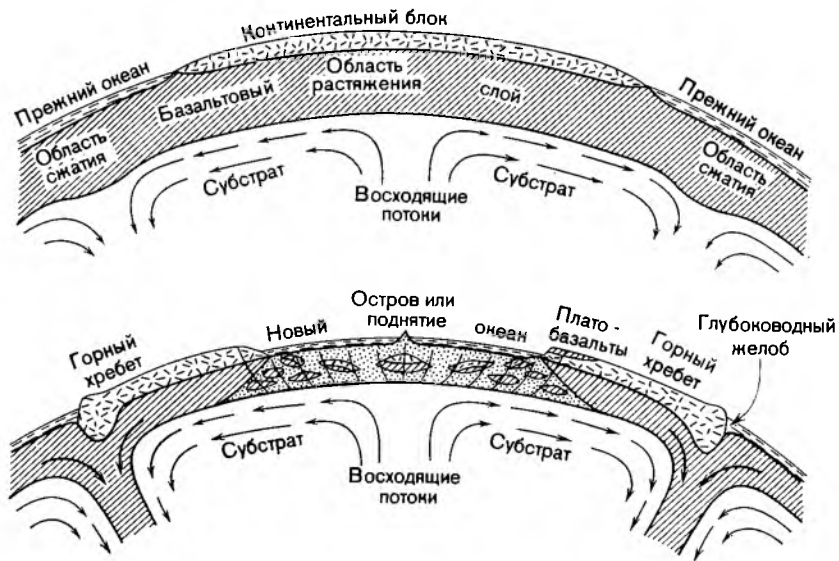


Рис. 1-14. Модель конвекции в мантии как возможного механизма континентального дрейфа [24].

Показано растаскивание континента восходящими мантийными потоками и образование нового океана в результате разрастания рифта. В районе нисходящего потока образуется горный хребет, а рядом с ним — глубоководный желоб.

которые Вегенер предложил, но не подтвердил строгим доказательством, уцелела только одна, а именно что в мантии происходит тепловая конвекция, которую можно сравнить с тем, что происходит в кастрюльке с супом на плите: когда суп на дне нагревается, он расширяется, становится менее плотным и поднимается вверх. Вначале предположение о том, что подобный процесс имеет место в Земле, могло показаться нелепым, так как мантия твердая. Однако известно, что ряд материалов, например вар или воск, могут раскалываться как жесткие тела при резком изгибе, но могут и медленно течь как жидкость, если к ним приложить небольшое усилие на долгое время. За длительный период времени даже лед проявляет способность к пластическому течению; то же самое может происходить и с мантией. Артур Холмс заявил, что именно такое течение, обусловленное конвекцией, и представляет собой движущий механизм континентального дрейфа. Он уподобил это течение «бесконечно движущемуся поясу», или тому, что мы называем «лентой конвейера», и доказывал, что даже целый материк может перемещаться, находясь на такой ленте.

Все другие гипотезы о механизме континентального дрейфа были основаны на той навязчивой идее, что материки сами прокладывают себе путь через твердую мантию. Поскольку теорети-

ческий анализ, проведенный геофизиками, показал, что такое проталкивание невозможно, геофизики потеряли интерес к теории континентального дрейфа.

Холмс рассуждал, что если восходящее течение в мантии направлено к середине материкового массива и расходится наверху в разные стороны, материк должен расколоться, а его две половины — отойти друг от друга. Атлантический океан образовался в таком расширяющемся расколе (рифте). Схема этого гипотетического механизма показана на рис. 1-14.

Теория Холмса, впервые предложенная им в 1929 г., не была отвергнута и не встретила значительных возражений, вероятно, потому, что его идеи далеко опережали время. Если мы внимательно рассмотрим модель, показанную на рис. 1-14, нам ничего не остается сделать, как только признать ее удивительную близость к новому взгляду на Землю — к гипотезе разрастания морского дна, которая будет описана в следующих главах. К проблеме конвекции в мантии мы вернемся в других разделах книги.

Английские ученые продолжали свои замечательные работы по революционной перестройке основных представлений в науках о Земле вплоть до конца 1950-х годов. Затем, в 1960-х годах, на сцену вышли ученые из Нового света.

СОВРЕМЕННАЯ «СОСТАВНАЯ КАРТИНКА-ЗАГАДКА»

Впервые идея о континентальном дрейфе пришла Вегенеру на ум тогда, когда он попытался совместить береговые линии по обе стороны Атлантики. Этим же методом пользовались и позднее для доказательства сходства между окаменелостями древних растений и животных и между геологическими слоями на противоположенных материках. Некоторые ученые, подобно Вегенеру, считали, что это сходство очень близкое, другие же отмечали, что при совмещении береговых линий получаются большие зияния и области перекрытия. Все попытки оценить совпадение тем или иным путем подвергались критике как слишком субъективные. В последние годы были разработаны более объективные методы такой оценки.

Сэр Эдуард Буллард и его коллеги решали этот спор, составив программу для электронной вычислительной машины с целью проверки всех возможных совмещений и нахождения лучшего из них [8]. Они обнаружили, что совмещение лучше прослеживается по линии глубин около 1000 м, чем по современной береговой линии (рис. 1-15), и сделали вполне разумное предположение, что изобата 1000 м может считаться контуром прежнего континента. Совмещение, выбранное компьютером, оказалось поразительно точным. Хотя перекрытия и зияния все равно остаются, они чрезвычайно малы. Представляется, таким образом, что электронный вычислитель доказал, что континенты можно совместить между собой почти также точно, как отдельные кусочки в дет-

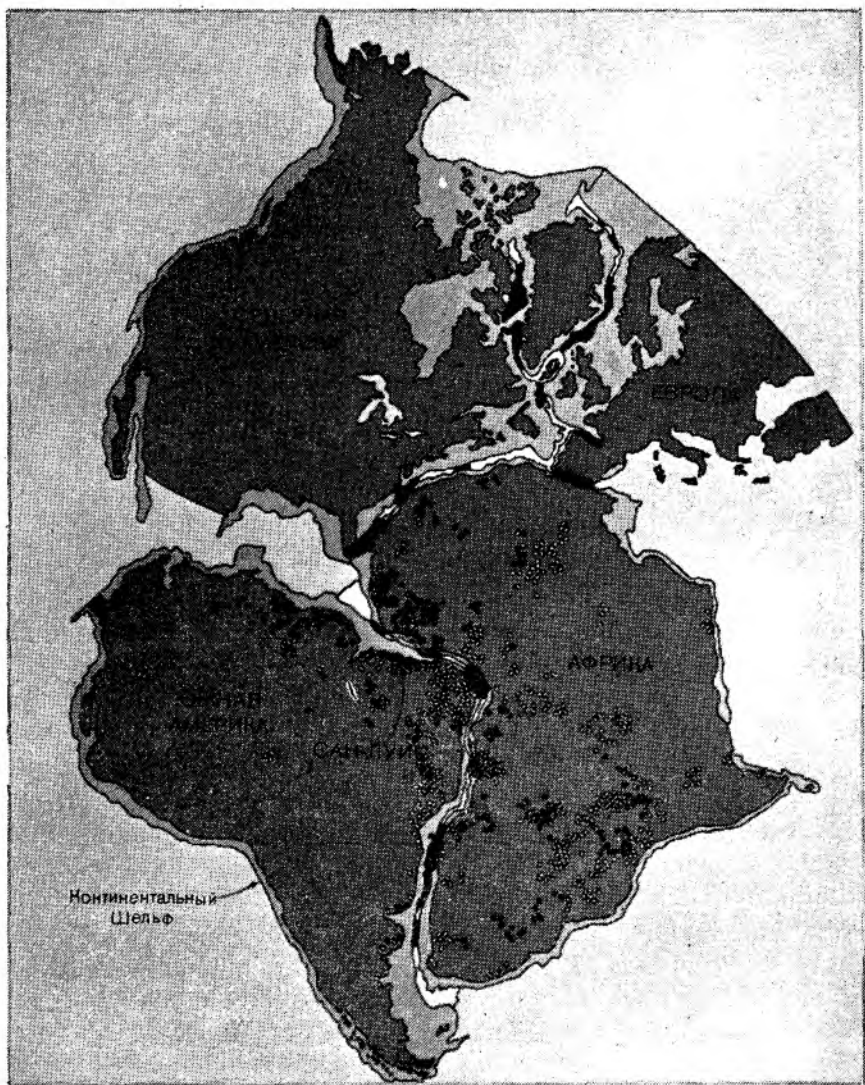


Рис. 1-15. Карта, показывающая подобие очертаний континентов, окружающих Атлантический океан [25].

Черным отмечены области побережий, где контуры континентов перекрываются, белым показаны зияния. Совпадает также возраст горных пород в Южной Америке и Африке. Темными кружками обозначены породы древнее 2 млрд. лет, светлыми кружками — более молодые породы, с возрастом примерно 600 млн. лет.

ской составной картинке-загадке. Исходя из допущения, что это совпадение не является чисто случайным (как случайно то, что Апеннинский полуостров по форме похож на сапог), Буллард заключил, что оно подкрепляет предположение о том, что материки по обе стороны океана раньше составляли один континентальный массив.

Другой метод был разработан американцем П. Херли [25] и его коллегами из Бразилии. Было установлено, что некоторые геологические структуры по обе стороны Атлантики совпадают между собой, хотя всегда существовало подозрение, что на процесс такого сопоставления влияет элемент субъективности. Исследователи нашли возможность доказать объективно, насколько точно совмещаются континенты, путем определения абсолютного возраста пород радиологическим методом, который сам по себе почти полностью объективен. В этом методе, как объяснялось в начале этой главы, скорость самопроизвольного распада радиоактивных элементов с долгим периодом полураспада служит основой для определения возраста пород с такой точностью, которую может обеспечить современная физика. С помощью этого метода Херли и др. [25] проанализировали возраст огромного количества древних пород из восточной части Южной Америки и из западной части Африки (рис. 1-15). Датированные породы этих двух континентов четко делятся на две группы: с возрастом более 2 млрд. лет и около 600 млн. лет. В обоих случаях возраст пород древнее, чем предполагаемый раскол Гондваны. Обнаружилось, что районы одного и того же возраста по обе стороны океана, как и следовало ожидать, совмещаются. Типичным примером, отмеченным на рис. 1-15, является район, который первоначально, по-видимому, был частью древнего Африканского континентального блока, а ныне обособлен на бразильском берегу, около города Сан-Луис. Ввиду этих открытий стало все труднее отвергать теорию континентального дрейфа и считать ее дикой фантазией метеоролога, который вдруг ринулся в геологию.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОКЕАНИЧЕСКОГО ДНА

НОВЫЙ РУБЕЖ: НАУКА О ПРИРОДЕ ОКЕАНИЧЕСКОГО ДНА

В то время как развитие палеомагнетизма привело к драматическому возрождению теории континентального дрейфа, быстро шла вперед и совершенно другая область знания — изучение океанического дна. Океан покрывает две трети земной поверхности, и поэтому исследования океанического дна становятся важнейшим условием, необходимым для понимания Земли в целом. Еще перед второй мировой войной ученые начали осознать значение таких исследований. Однако по мере развития океанографии они все яснее понимали, что вовсе не большой размер океанов определяет важность морской геологии и геофизики. Сама *природа*, особый характер океанов — вот что оказалось наиболее существенным.

Одним из тех, кто уже в 1930-е годы начал понимать это, был голландец Венинг-Мейнес. Он разработал способы измерения силы тяжести на море, удивительно совершенные для того времени. Измерения силы тяжести требуют высокой точности — точнее, чем одна миллионная. Для них необходима точная нивелировка прибора, а этого чрезвычайно трудно добиться даже на суше. Чтобы провести такие измерения в океане, где нельзя найти закрепленное или устойчивое основание для прибора, требуется невероятная ловкость! Однако Венинг-Мейнес установил свой хитроумный измерительный прибор на подводной лодке, которая погружалась на глубину, где на нее не влияли морские волнения, и сохраняла там сравнительно устойчивое положение; таким способом удалось измерить силу тяжести во многих точках океана. Исследования Венинг-Мейнеса были особенно детальными в водах, омывающих архипелаг Индонезии — в то время голландской колонии. Этот же метод применили для измерения силы тяжести японские исследователи М. Матуяма и другие на подводной лодке японского императорского военно-морского флота. В результате проведенных съемок были обнаружены сильнейшие аномалии силы тяжести в районе глубоководных желобов, расположенных вдоль островных дуг Индонезии и Японии. Такие аномалии никогда раньше не отмечались — на суше их просто

не существует. Для геологов и геофизиков это было предзнаменованием того, что в океанах вскоре будет открыто нечто абсолютно новое. Получив эти результаты, Венинг-Мейнес пришел к гипотезе о происхождении желобов и островных дуг, основанной на теории конвекционных потоков в мантии.

Для людей «прозорливых» было очевидно, что изучение океанического дна совершенно необходимо для решения основных проблем геологии, таких, как происхождение материков, происхождение океанов, строение мантии. Однако как технические, так и финансовые возможности для этого изучения были тогда еще очень скудными. Несмотря на большие старания группы выдающихся ученых в 1930—1940-е годы, подлинное развитие науки об океаническом дне могло начаться только после окончания второй мировой войны.

ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОКЕАНИЧЕСКОГО ДНА

Съемку океанического дна на глубине в тысячи метров нельзя проводить обычными приемами, используемыми в «сухопутной» геологии и геофизике. Необходимо особое снаряжение. Прежде всего нужен исследовательский корабль. Он должен быть оснащен различными видами специального оборудования — в дополнение к оборудованию, которое требуется для плавания на большие расстояния. Например, нужны особые инструменты для определения точного местоположения судна и измерения глубины моря, нужны также длинные, прочные канаты и мощные лебедки для опускания различных приборов на глубину нескольких тысяч метров. Кроме того, работы такого рода отнимают массу времени, и для них необходимо судно, специально предназначенное для данного вида исследований. По этим причинам изучение океанов могло проводиться в послевоенные годы только странами-победительницами: Соединенными Штатами Америки, Великобританией и Советским Союзом.

Как это ни парадоксально, изучение океанов сразу же после того, как была создана соответствующая техника, разработана методика и появились исследовательские суда, пошло вперед гораздо быстрее, чем работы на суше. Тогда как необходимое для наземных съемок оборудование надо перетаскивать через долины и горы, а иной раз переправлять из одной страны в другую, корабли могут свободно идти в любой океан, где не нужны сложные хлопоты по получению виз при пересечении границ.

Хотя прогресс в деле изучения морского дна стал возможным в результате самоотверженных усилий ученых, никто не мог бы предсказать, что за какие-то 20 лет будут достигнуты такие замечательные успехи и что это явится толчком в развитии теории континентального дрейфа, возрожденной исследованиями по палеомагнетизму. Прозорливость и интуиция сделали здесь, оче-

видно, свое дело, хотя и нельзя было точно предвидеть, по какому пути пойдут будущие исследования.

Большой вклад в изучение мирового океана внесла Ламонтская геологическая обсерватория при Колумбийском университете, основанная в 1949 г. Ее первым директором был Морис Юинг, человек выдающихся организаторских и творческих способностей. Исследовательские работы, которые он проводил во всемирном масштабе, привели к ряду новых открытий и теоретических обобщений. Проработав директором обсерватории более 20 лет, Юинг в 1972 г. перешел в Техасский университет. Он умер в начале 1974 г., оставив после себя важные достижения почти во всех областях исследования морского дна. Обсерватория носит теперь название «Геологическая обсерватория Ламонт-Догерти» и продолжает свою важную работу под руководством Тальвани.

Скриппсовский океанографический институт был основан на заре нынешнего столетия. Усиленное изучение морского дна было начато Р. Ревеллом, директором института, в 1948—1964 гг. Начиная с 1950-х годов институт провел ряд крупных экспедиций, главным образом в Тихом и Индийском океанах и особенно в восточной части Тихого океана.

Мне посчастливилось провести значительное время в обоих этих выдающихся научных учреждениях. С захватывающим интересом я наблюдал, как обе исследовательские группы делали одно открытие за другим. Океанографические организации других стран, таких, как Великобритания, СССР, Япония, Франция, Канада и ФРГ, также присоединились к этой энергичной работе; коллективы ученых из многих стран стали сотрудничать в ряде объединенных проектов. Ведь океаны принадлежат всем народам мира!

ПОЯВЛЕНИЕ НОВЫХ МЕТОДОВ

Японский исследовательский корабль «Хакуго-мару» служит примером современного судна, снабженного самым совершенным научным оборудованием (рис. 2-1). Важнейшей частью оборудования, необходимого для исследования морского дна, является прецизионный акустический регистратор глубин. Раньше глубину океана определяли с помощью свинцового груза, подвешенного на канате: измеряли, на какую длину разматывается канат, когда груз достигает дна. Эта процедура отнимала очень много времени и сил. В 1920-х годах был разработан метод эхолотирования, позволяющий измерять глубину океана, посылая с судна звуковые волны и отмечая время прихода ответного сигнала. Этот метод постепенно был доведен до совершенства и к 1950-м годам стало возможно измерять глубину океана на всем земном шаре, даже во впадинах, где глубина превышает десять тысяч метров. Разрешающая способность современного прецизионного эхолота точнее $1/5000$, т. е. удастся обнаружить изменение глубины в пределах даже 1 м при общей глубине океана 5 тыс. м.

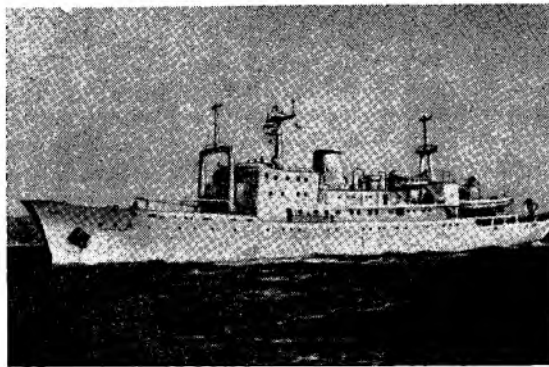


Рис. 2-1. Исследовательское судно «Хакуго-мару» (водоизмещением 3225 т).

На основе большого количества собранных данных Б. Хейзен и М. Тарп, ученые из обсерватории Ламонт-Догерти, составили хорошо известную теперь обзорную схему мирового океана с чрезвычайно выразительным рисунком рельефа его дна. В упрощенном виде эта схема показана на рис. 2.2.

Для более сложных исследований используются, как и на суше, сейсмические волны. Можно наблюдать распространение сейсмических волн, искусственно вызванных посредством подводных взрывов у поверхности океана. Эта отрасль исследований называется морской взрывной сейсмологией. Развитие этого метода в 1940—1950-х годах было связано большей частью с работами американских и английских ученых. Именно с помощью этого метода удалось определить строение земной коры под океанами. В последнее время был разработан другой метод — метод пневматического излучателя, в котором серия волн генерируется выстрелами из пневматической пушки, установленной на корабле. Структура верхней части океанической коры с замечательной четкостью рисуется непрерывно поступающими волнами, отражающимися от погребенных слоев осадочных пород. На рис. 2-3 показан пример записей отраженных сейсмических волн, получаемых этим методом. Традиционный взрывной метод широко используется в настоящее время для изучения более глубокой структуры океанической коры и верхней мантии.

Другим главным методом исследования структуры океанической коры является измерение силы тяжести. Метод Венинг-Мейнеса был ограничен возможностями подводной лодки и отнимал много времени и сил, поэтому было крайне желательно разработать методику морских гравиметрических измерений, которую можно было бы применять на обычных кораблях. Благодаря усилиям многих специалистов из разных стран в настоящее время используется несколько видов чрезвычайно сложно устроенных гравиметров для обычных судов, в результате чего получено большое количество очень ценных материалов. В Японии эти

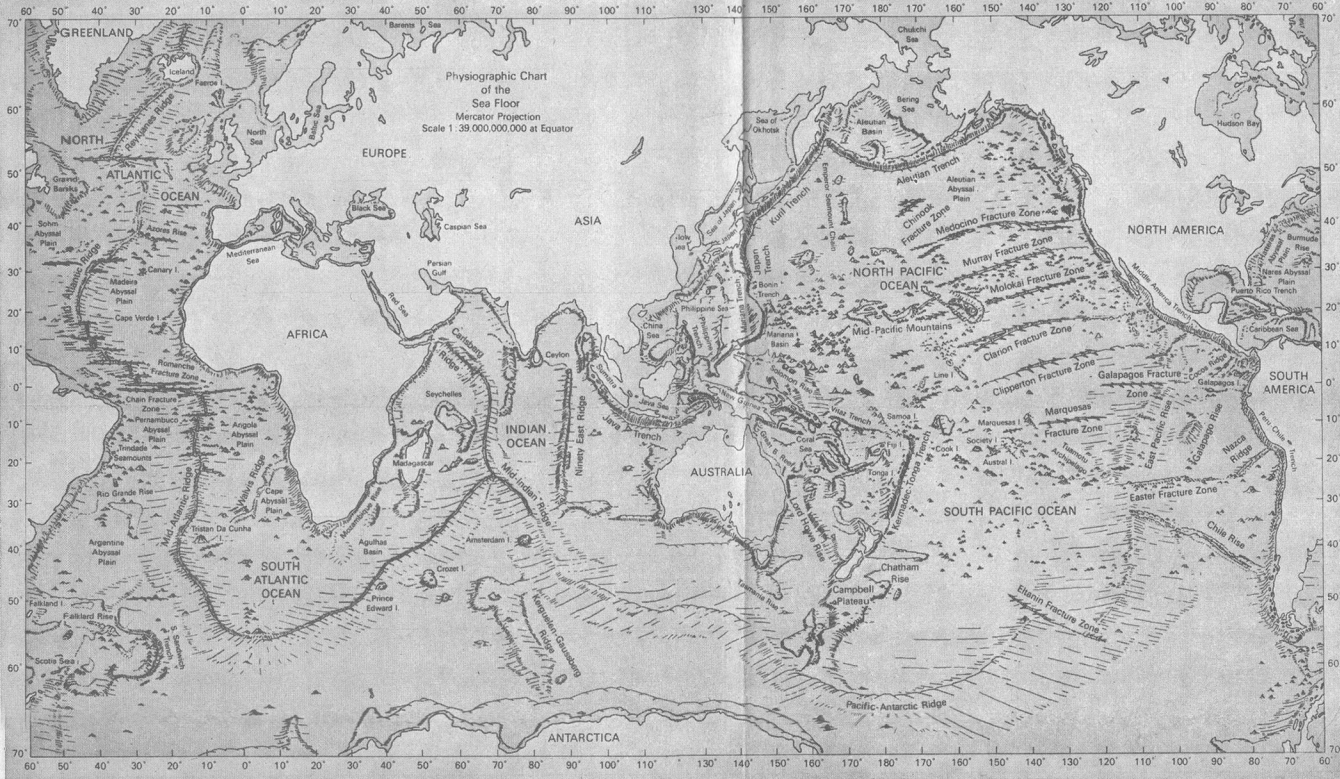


Рис. 2-2. Дно океанов.
 Физико-географическая схема в проекции Меркатора; масштаб по экватору около 1:120 000 000.

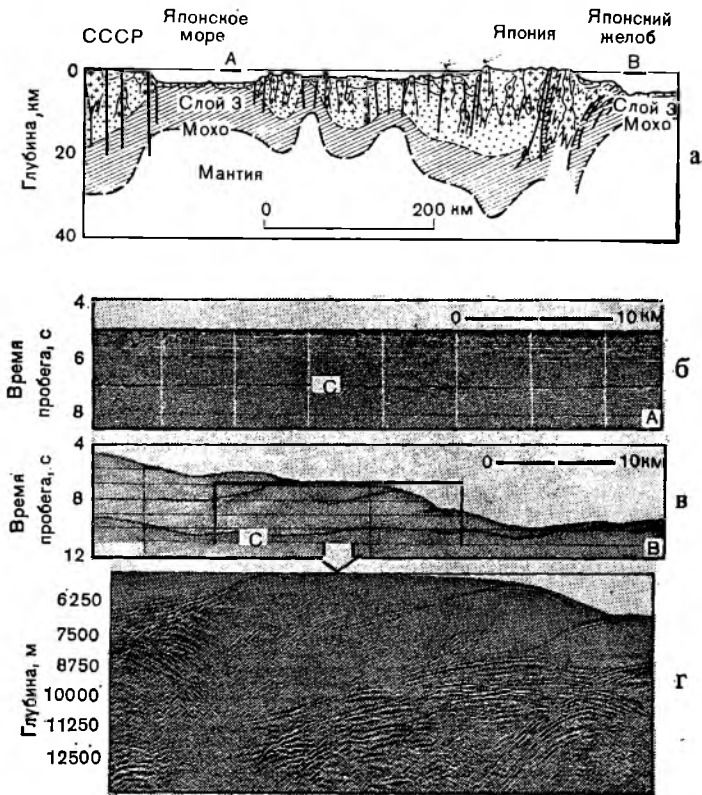


Рис. 2-3. Пример современных записей отраженных сейсмических сигналов для Японского моря и Японского глубоководного желоба (R. H. Beck, P. Lehner et al., New geophysical data on key problems of global tectonics, in "Proceedings of the Ninth World Petroleum Congress", 1975).

a — схематический разрез предполагаемой структуры коры (буквами *A* и *B* показаны участки, для которых приведены записи сейсмических сигналов); *б* — время (в секундах) прихода звуковой волны на участке *A* в Японском море (буквой *C* обозначена поверхность субстрата под осадочным слоем); *в* — то же на участке *B* в Японском желобе; *г* — деталь разреза прилежащего к суше склона Японского желоба (на схеме *в* обведено прямоугольным контуром).

исследования возглавил Т. Цубои, а И. Томода и др. успешно разработали морской гравиметр, установленный теперь на исследовательском судне «Хакуго-мару».

Важной областью исследований на океанах стали также измерения геомагнитного поля. Обычный метод магнитометрических наблюдений, используемый на суше, требует точных измерений очень слабого движения подвешенного магнита — задача, абсолютно невыполнимая в условиях корабельной качки. Поэтому для измерений магнитного поля на океанах (в 1950-х годах) был разработан особый метод, основанный на совершенно новой идее. Были созданы приборы, в которых используется явление прецессии протонов; эти приборы называются магнитометрами ядерно-

резонансного типа, или *протонными прецессионными магнитометрами*. Известно, что в некоторых веществах, таких, как вода, каждый протон непрерывно вертится, как волчок, и имеет, кроме того, свой собственный магнитный момент; помещенный в магнитное поле, протон испытывает прецессионное движение, точно так же как игрушечный волчок в поле силы тяжести. Работа ядерно-резонансного магнитометра основана на том, что частота прецессионных колебаний протона в точности пропорциональна напряженности магнитного поля. Для производства измерений не требуется нивелировать или ориентировать магниточувствительный элемент. Соответственно измерение полной напряженности геомагнитного поля с судна, крейсирующего по поверхности океана, стало простой и обычной операцией. Датчик магнитометра буксируется за кормой судна на расстоянии, достаточном для того, чтобы не сказывалось магнитное воздействие самого корабля (как правило, суда построены из стали и поэтому сильно магнитны). Магнитные съемки, проведенные с этими приборами, внесли большой вклад в развитие науки о морском дне и, как мы покажем ниже, в создание нового взгляда на Землю.

Еще одним методом исследования океанического дна является измерение с корабля тепла, которое выделяется из недр Земли через морское дно. Обладая высокой внутренней температурой, Земля постоянно испускает тепло. Количественная характеристика этого процесса называется *тепловым потоком Земли*. Интенсивность теплового потока можно оценить путем измерения *геотермического градиента* (скорости возрастания температуры с глубиной) и *теплопроводности* слоев. Теплопроводность материала показывает его способность передавать тепловую энергию. Интенсивность (скорость) земного теплового потока определяется простым умножением величины геотермического градиента на величину теплопроводности. Измерение теплового потока на суше производится так: вначале измеряют в какой-нибудь шахте или глубокой скважине геотермический градиент, а затем — теплопроводность образцов горных пород, взятых из этой шахты или скважины. Однако на океанах такие измерения раньше не талккивались на технические трудности, так как бурить скважины посреди океана чрезвычайно дорого и сложно. В 1950-х годах эта проблема была решена Буллардом и его сотрудниками, разработавшими измерительный инструмент с зондом длиной несколько метров, вдоль оси которого помещены термометры. Зонд погружают в породы, слагающие дно океана, и измеряют температуру в различных точках зонда.

Другое техническое новшество, которое в последнее время сильно способствовало прогрессу морской геологии и геофизики, — использование искусственных спутников Земли для точного определения местоположения судна в океане. Если неизвестны точные координаты судна, то измерения силы тяжести или магнитного поля имеют мало смысла независимо от того, насколько

ко точно они выполнены. Обычно штурман определяет положение судна, делая отсчеты по Солнцу и звездам, но ясно, что в плохую погоду этот астрономический способ не подходит. Однако и в ясную погоду большинство таких оценок дает ошибку в несколько миль. В последние годы были разработаны различные методы определения местоположения судна с помощью электромагнитных волн, посылаемых береговыми радиостанциями. Точность этих методов при благоприятных условиях составляет 1—2 мили. И все же, по мере того как измерения, производимые при различных съемках, становятся все точнее и точнее, любая погрешность — даже малая — при определении местоположения судна становится недопустимой. Спутниковая навигация — это метод, при котором местоположение корабля определяется с помощью электромагнитных волн, передаваемых через спутник. Положение корабля можно определять автоматически каждый раз, когда спутник проходит над данным районом (приблизительно один раз в час), с точностью в пределах 100 м. Этот прием имеет значительное преимущество перед прежними методами и в настоящее время широко используется.

Все эти новые технические приемы привели к открытию важных новых фактов, а синтез этих открытий оформился в новую науку. Прогресс в разработке передовой техники идет безостановочно. За последние годы мы научились производить различные виды измерений с помощью приборов, устанавливаемых прямо на дне океана. В частности, *донные сейсмографы* дают нам такие сведения, какие трудно было бы получить иным путем. Разрабатываются также океанские *донные магнитометры*, которые можно будет использовать для оценки теплового состояния верхней мантии под океанами. Можно надеяться, что эти новые методы откроют в нашей науке новые, еще неизвестные горизонты.

ОКЕАНИЧЕСКОЕ ДНО

Карта на рис. 2-2 показывает рельеф океанического дна. Следует обратить внимание, например, на длинную цепь возвышенностей, протягивающихся вдоль средней части Атлантического океана. Это гигантское подводное горное сооружение, названное *Срединно-Атлантическим хребтом*. О существовании такой возвышенности подозревали уже в конце прошлого века, когда прокладывали первый трансокеанский подводный кабель. Тогда ее называли «Телеграфным плато». Съемка, произведенная в 1925—1927 гг. со знаменитого немецкого судна «Метеор», позволила установить, что это «плато» представляет собой длинную гряду, вытянувшуюся практически вдоль всего Атлантического океана. Последующие исследования показали, что такие же срединно-океанические хребты существуют, как это видно на рис. 2-2, и в Тихом, и в Индийском океанах.

На карте хорошо видны также узкие цепочки глубоких океа-

нических впадин, расположенных по периферии Тихого океана близ островных дуг. Эти глубокие впадины называются *желобами*. Между срединно-океаническими хребтами и материками или желобами находятся обширные области совершенно плоского океанического дна с выступающими из него многочисленными подводными горами. Если подводные океанические хребты и окраинные зоны считать аномальными участками, то плоские впадины между хребтами и окраинами отразят состояние среднего, или нормального, океанического дна. Структура коры под океанами была установлена с помощью взрывной сейсмологии прежде всего в пределах этих впадин.

Как указывалось в гл. 1, океаническая кора в большинстве районов тоньше 10 км и в ее составе нет мощного гранитного слоя, присутствующего всюду в континентальной коре. Напомним также, что главные слои океанической коры, залегающие под тонким чехлом осадков, состоят из пород базальтового типа, плотность и сейсмическая скорость которых выше, чем у гранитов. Нижний слой океанической коры сложен, вероятно, породами типа габбро (интрузивный аналог базальта) и серпентинита (гидратированный перидотит).

Первые измерения теплового потока, сделанные в океане, дали неожиданные результаты. Мы знаем, что тепло, идущее из Земли, образуется при распаде радиоактивных элементов: урана, тория и калия. Химический анализ показал, что эти элементы в гораздо больших количествах содержатся в гранитных породах, чем в базальтах, габбро и перидотитах. Поэтому ученые ожидали, что средний тепловой поток со дна океана будет небольшим — вероятно, не больше одной десятой от среднего потока из континентальной коры. Исследователи, проводившие первые измерения теплового потока со дна океана, надеялись найти подтверждение этого вывода. Раньше других такие измерения осуществили в 1954 г. Буллард и его сотрудники. Результат получился неожиданный. Тепловой поток среднего океанического района был совсем не такой малый, как предполагали; в действительности, он оказался примерно такой же величины, что и на материках. Сходство значений теплового потока в континентальных и океанических районах, несмотря на большое различие между ними в величине коровых источников тепла, должно было навести на мысль, что в океанических районах большая часть теплового потока идет *из-под* коры. Это дополнительное тепло поступает, очевидно, из мантии. Как мы покажем в следующих главах, это было важное открытие.

СРЕДИННО-ОКЕАНИЧЕСКИЕ ХРЕБТЫ

Среди форм подводного океанического рельефа крупнейшими являются срединно-океанические хребты (рис. 2-2). Например, Срединно-Атлантический хребет протягивается от Северного Ле-

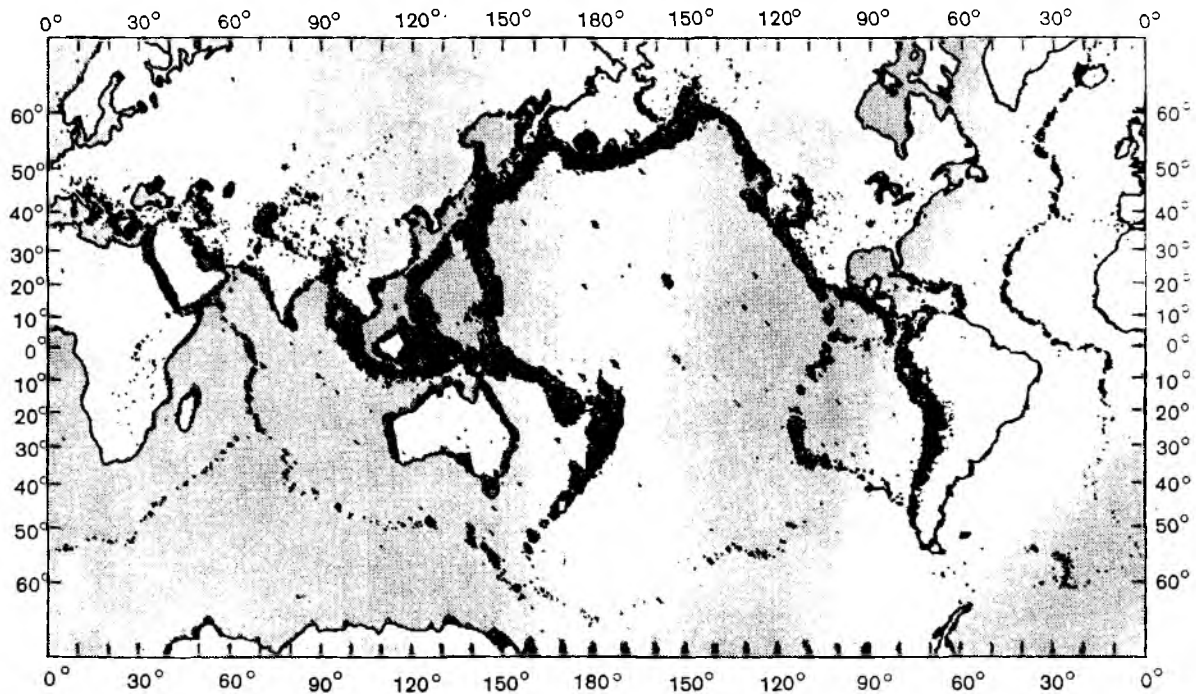


Рис. 2-4. Схема распределения очагов землетрясений (*M. Barazangi, J. Dorman, World seismicity map compiled from ESSA Coast and Geodetic Survey Epicenter data, '1961—1967, Bull. Seismol. Soc. Amer., 59, p. 369, 1969).*

Можно видеть, что в океанах очаги землетрясений сосредоточены вдоль срединно-океанических хребтов.

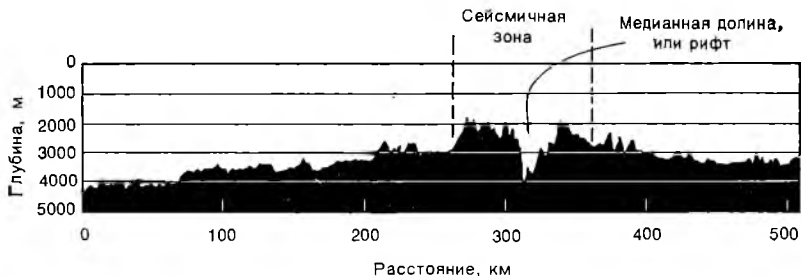


Рис. 2-5. Профиль Срединно-Атлантического хребта (по Б. Хейзену, в [42]).

довитого океана вдоль всего Атлантического океана, проходит мимо Африканского побережья, огибая мыс Доброй Надежды, в Индийский океан, откуда продолжается в Тихий океан, опоясывая практически весь земной шар. Срединно-океанические хребты имеют высоту более 3 тыс. м и ширину более 2 тыс. км. Фактически, они превосходят по размерам и Альпы, и Гималаи. Первыми, кто понял, что вся Земля опоясана такими громадными подводными хребтами, были Юинг и Хейзен. Это важное открытие было сделано в результате наблюдений, показавших, что срединно-океанические хребты выделяются не только своим своеобразным рельефом, но и сейсмической активностью. По линейному характеру очаговых зон землетрясений, отмеченных в океанах, Юинг и Хейзен смогли предсказать существование хребтов даже там, где топографическая съемка еще не была проведена. На рис. 2-4 показано распределение эпицентров землетрясений на всем земном шаре, где ясно видно, что большинство землетрясений в океанах возникает вдоль срединно-океанических хребтов.

В 1953 г. Хейзен и Тарп сделали еще одно важное наблюдение: вдоль осевой линии Срединно-Атлантического хребта вьется глубокая долина. Если посмотреть на профиль этого хребта, показанный на рис. 2-5, можно сказать, что долина, по-видимому, образовалась в результате раскола хребта. В отличие от крупных горных хребтов на суше, сложенных преимущественно *осадочными* породами с проявлениями складчатости, которая возникла вследствие *сжатия* с обеих сторон, срединно-океанические хребты имеют преимущественно *вулканическое* происхождение и такие особенности структуры, которые обусловлены, вероятно, *растяжением*.

Еще одним не менее важным открытием явилось то, что тепловой поток имеет повышенные значения у гребней срединно-океанических хребтов. В 1961—1962 гг. я принял участие совместно с Р. П. фон Герценом из Скриппсовского океанографического института в организации и проведении детальной съемки

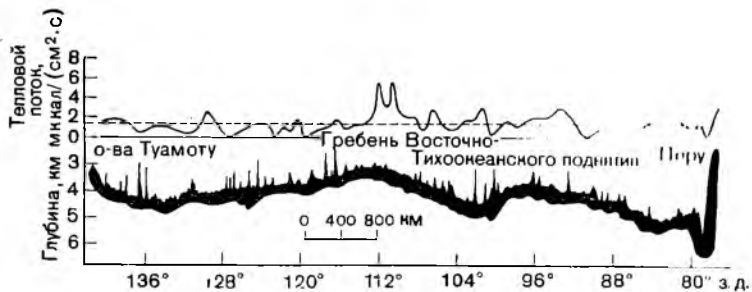


Рис. 2-6. График значений теплового потока вдоль профиля Восточно-Тихоокеанского поднятия от островов Туамоту до побережья Южной Америки (R. P. von Herzen, S. Uyeda, Heat flow through the Eastern Pacific ocean floor, J. Geophys. Res., 68, p. 4219, 1963).

Горизонтальная штриховая линия показывает среднее мировое значение теплового потока.

Восточно-Тихоокеанского поднятия — структуры, аналогичной Срединно-Атлантическому хребту. Предыдущие съемки этой площади указывали на то, что тепловой поток у гребня хребта, вероятно, повышен. В то время в Японии морские измерения теплового потока были проведены только в нескольких пунктах, хотя на суше эти работы были развиты достаточно широко (гл. 5). Поэтому трехмесячная съемочная работа на борту исследовательского судна «Спенсер Ф. Бэрд» в юго-восточной части Тихого океана, когда было сделано более 300 измерений, явилась для меня большим открытием: морские геофизические работы в настоящее время должны быть именно такими исчерпывающими. Прошли те времена, когда выводы можно было делать на основании какой-нибудь пары измерений. Некоторые результаты, полученные в этом рейсе, показаны на рис. 2-6. Обратите внимание на очень высокий тепловой поток у гребня Восточно-Тихоокеанского поднятия. Мы выяснили также, что высокий тепловой поток отмечается только в пределах двух узких зон, проходящих по гребню поднятия. В непосредственной близости к этим зонам наблюдались поразительно низкие значения теплового потока. Такое близкое расположение зон с высокими и низкими значениями теплового потока, как выяснилось позднее, вообще характерно для активных срединно-океанических хребтов. Это явление интерпретируется как следствие гидротермальной деятельности в земной коре у гребня хребта и стало теперь предметом интенсивных исследований. Таким образом, срединно-океанические хребты — это гигантские возвышенности, где выделяется из недр Земли тепло и действуют силы растяжения.

По мере того как продвигались исследования в Атлантическом и Тихом океанах, рос интерес и к срединно-океаническим хребтам Индийского океана. Международный проект экспедиционных работ в Индийском океане (1959—1965 гг.) явился вопло-

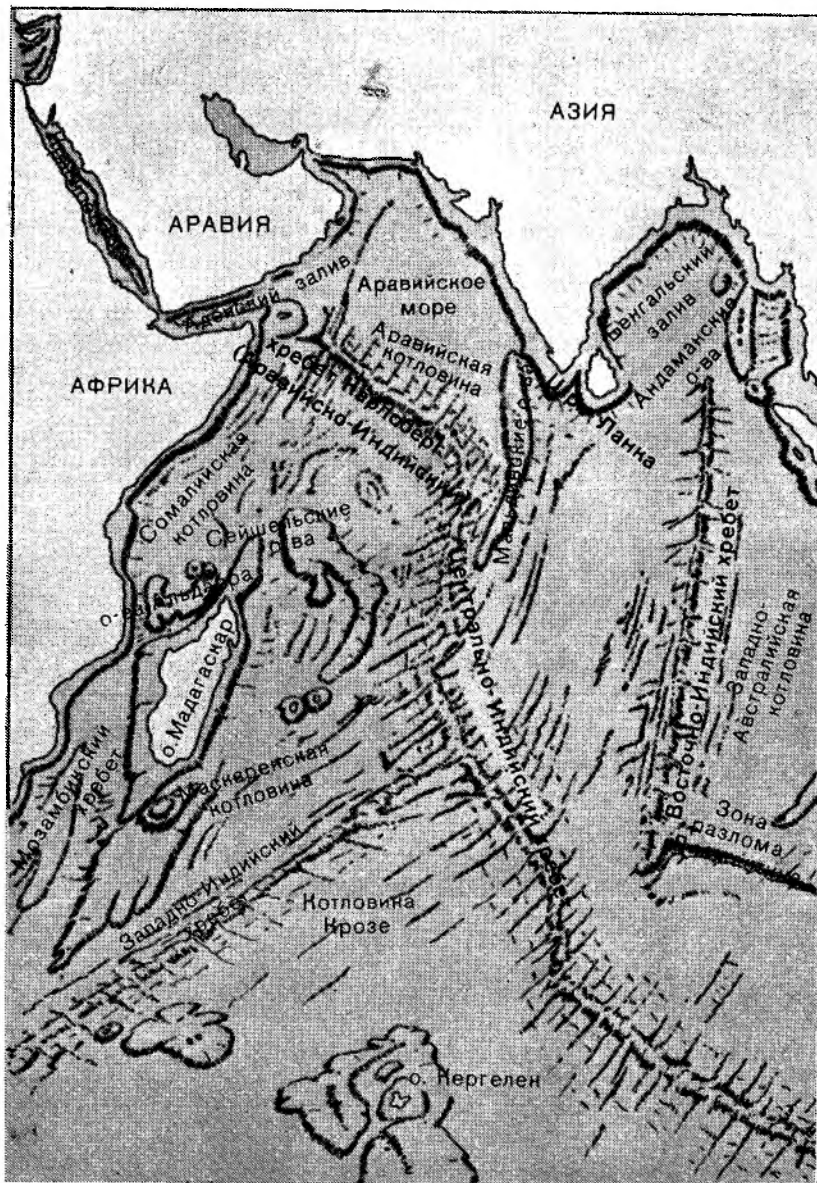


Рис. 2-7. Фрагмент карты дна океанов.

В верхней части схемы слева виден активный рифт между Азией и Африкой, проходящий через Аденский залив и Красное море.

щением того духа сотрудничества, который родился во время Международного геофизического года (1957—1958 гг.) и работ по Проекту верхней мантии (1962—1970 гг.). Научные учреждения США, Великобритании, СССР, Франции, ФРГ, Японии направили своих ученых и исследовательские корабли для проведения обширных работ.

Рельеф дна Индийского океана показан на рис. 2-2. В этом океане также существует система крупных срединно-океанических хребтов, и она тоже очень сложна. Например, продолжение Срединно-Атлантического хребта, огибающего южную оконечность Африки, проходит в Индийский океан и там раздваивается. Одна из ветвей протягивается на восток южнее Австралии и в конце концов достигает Тихого океана. Другая ветвь через Аденский залив проходит в Красное море. Если мы вообразим, что какой-то горячий поток поднимается из-под срединно-океанических хребтов и раздирает их надвое, то логично будет предположить, что Аденский залив и Красное море в данный момент составляют части активного рифта, по которому происходит раскол двух континентов (рис. 2-7). И действительно, в настоящее время имеется много доказательств правильности такого предположения. Как мы увидим позже, материалы, собранные Международной Индоокеанской экспедицией и другими экспедициями, оказались чрезвычайно ценными: «новый взгляд на Землю» дал возможность интерпретировать эти материалы, опираясь на представление об эволюции мирового океана.

ОКЕАНИЧЕСКИЕ ЖЕЛОБА

Казалось бы, океан должен быть глубже всего где-то в своей средней части. В действительности же это не так. Как показывает топографическая карта дна океана (рис. 2-2), наибольшие глубины располагаются вблизи суши, на краю океана. Центральные районы океана имеют меньшие глубины, так как там проходят срединно-океанические хребты. Точно так же размещаются высочайшие горы на материках. Высокие горные хребты, за небольшим исключением (например, Гималаи), находятся не в середине материков, а на их окраинах, обращенных к глубоководным океаническим желобам.

Это кажущееся парадоксальным размещение глубоководных впадин, отмелей и горных хребтов тесно связано с условиями образования материков и дна океанов. Желоба широко развиты в таких областях, как западная окраина Тихого океана (где они протягиваются от Аляски и Алеутских островов вдоль Курильских островов и Японии; южнее расположены Идзу-Бонинский и Марианский желоба, а также желоб Кермадек — Тонга) и юго-восточная окраина Тихого океана (у западного побережья Южной Америки). Вдоль материковой стороны океанических желобов располагаются островные и континентальные дуги, где про-

исходят сильные землетрясения и вулканические извержения. Следует отметить, что океанические желоба и дуги всегда встречаются вместе, образуя структурную пару. Система островных дуг и желобов хорошо развита и в Индонезийском регионе.

Пионерами исследования островных дуг были голландские ученые, которые начали детальное изучение Индонезийского архипелага уже в 20-х годах нашего столетия. Измерение силы тяжести в океане, проведенное Венинг-Мейнесом, как уже упоминалось, было одним из таких первых исследований. Результаты этих измерений показали, что над желобами сила тяжести необычайно мала. На первый взгляд это кажется вполне объяснимым, поскольку желоба заполнены водой (имеющей плотность 1 г/см^3), а не горными породами (с плотностью $2,6\text{—}3,0 \text{ г/см}^3$). Но мы не должны забывать закон изостазии (см. стр. 24), согласно которому вещество, находящееся под горными массивами, должно быть легче, чтобы поддерживать их плавучесть. По той же причине под океаническими желобами для поддержания их прогнутости должно находиться тяжелое вещество. Однако низкие значения гравитационного поля, полученные над желобами, показали, что никакого тяжелого материала, необходимого для изостатического равновесия, под желобами определенно нет. Открытие Венинг-Мейнеса поставило следующий важный вопрос: какая сила держит океанические желоба в прогнутом состоянии? Если бы такой силы не было, то они, очевидно, поднялись бы и быстро исчезли, точно так же и горный хребет, если бы его не поддерживали «корни», состоящие из легкого материала, должен был бы погрузиться и быстро исчезнуть.

Другой особенностью океанических желобов является их низкий тепловой поток в противоположность необычно высокому тепловому потоку вдоль гребней подводных хребтов. Эти свойства океанических хребтов и желобов позволяют сделать следующее предположение о их происхождении: в мантии происходит непрерывное течение вещества, которое поднимается у океанических хребтов и погружается у желобов. Другие результаты геофизических измерений в районах желобов и дуг, а также их геотектоническое значение будут рассмотрены в гл. 5.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ МОРСКОГО ДНА: ЗАГАДОЧНАЯ КАРТИНА

Новые методы измерения геомагнитного поля с помощью океанских магнитометров (см. стр. 52) стимулировали исследования по геофизике морского дна и предоставили чрезвычайно интересные данные о распределении геомагнитных аномалий в океанах. Интенсивные магнитные съемки в восточной части Тихого океана были начаты по инициативе Скриппсовского океанографического института, Береговой и геодезической службы США и таких ученых, как В. Вакье, Р. Мейсон и А. Рафф.

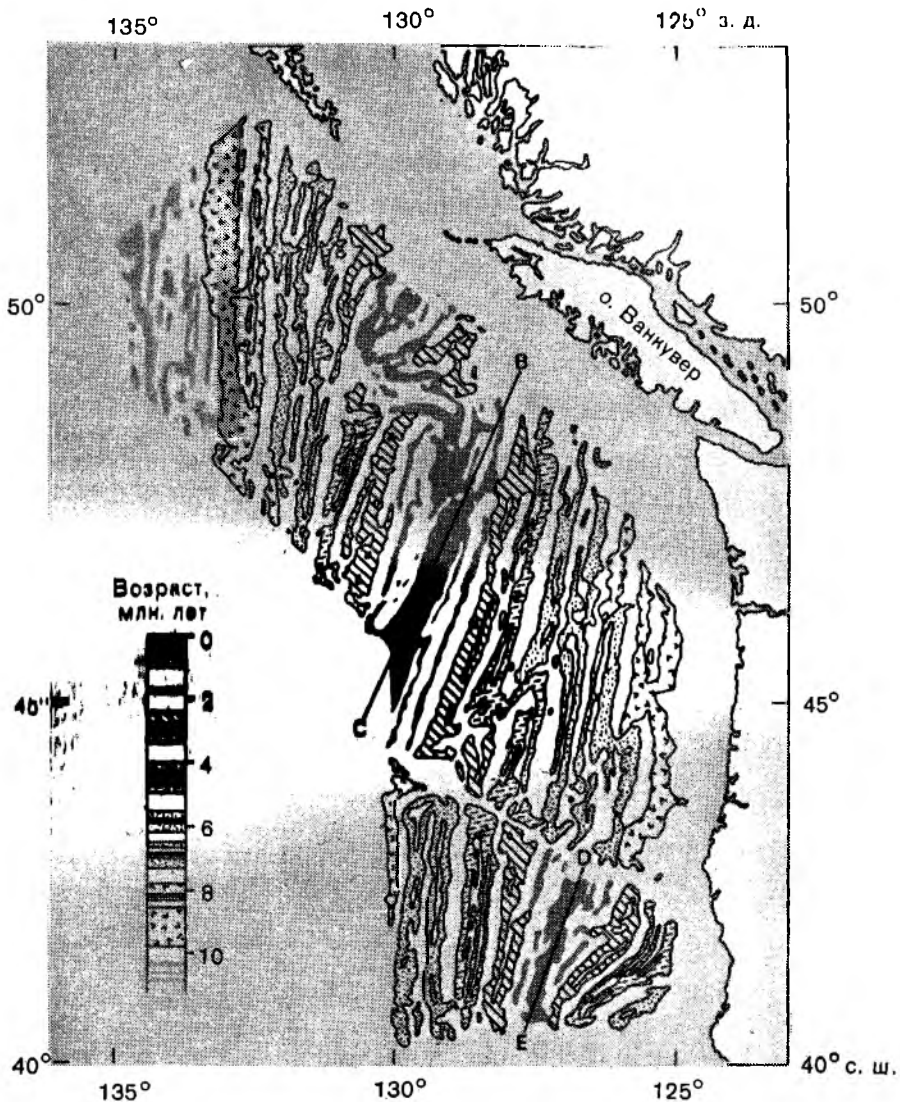


Рис. 2-8. Обзорная схема аномалий полного магнитного поля к юго-западу от острова Ванкувер (по Вайну, см. [40]).

Предполагается, что положительные аномалии (заштрихованы) приблизительно соответствуют участкам прямого намагничивания в земной коре. Различной штриховкой обозначен различный геологический возраст в соответствии с вертикальной шкалой. Центральные аномалии (показаны темно-серым цветом) совпадают с гребнями хребтов Хуан-де-Фука на севере (линия *BC*) и Горда на юге (линия *DE*). Можно видеть, что отрезки *BC* и *DE* смещены по зоне разлома *CD*.

На рис. 2-8 схематически показан облик геомагнитных аномалий восточной части Тихого океана с четкими меридиональными полосами — явление, неизвестное на суше. Хотя магнитное поле Земли в целом имеет дипольный вид (см. рис. 1-11), фактические наблюдения показывают некоторые отклонения. Эти отклонения называются *магнитными аномалиями*. Различают два главных типа таких аномалий: 1) крупные аномалии размером в тысячи километров, называемые *региональными аномалиями*, и 2) аномалии меньшего размера — *локальные аномалии*. Происхождение региональных аномалий связывают с особенностями работы магнитного динамо в ядре Земли. Локальные аномалии вызваны неоднородным намагничиванием вещества земной коры, аномалии дна океанов несомненно относятся к этому типу. Характер распределения магнитных аномалий, показанных на фиг. 2-8, позволяет предположить, что океаническая кора намагничена полосами. Когда был установлен такой своеобразный характер магнитного поля, его причина оказалась одной из самых трудных загадок в морской геофизике.

Имеется и другая важная и вызывающая удивление особенность в картине распределения аномалий, показанных на рис. 2-8. На отдельных участках полосы аномалий как бы разрезаны на части. Более внимательный анализ таких участков показал, что полосы там смещены больше чем на 100 км; в нескольких местах (не показанных на фиг. 2-8) это смещение чрезвычайно велико, оно превышает 1000 км. Линии такого смещения совпадают с топографическими разделами, которые известны как *зоны разлома*. Смещение полос магнитных аномалий было одним из ключевых наблюдений, приведших к разработке теории тектоники плит.

Многие ученые отвергали теорию Вегенера потому, что для них была неприемлема идея о том, что материка могли переместиться на тысячи километров. И все же оказалось, что расстояние, на которое разошлись соседние участки океана, оцениваемое по смещению полосовых магнитных аномалий, больше 1000 км¹.

Следовательно, в прошлом могли быть и еще бóльшие горизонтальные перемещения, однако вопрос о происхождении самой картины полосовых аномалий оставался открытым. Когда, наконец, ответ был найден, то оказалось, что смещение этих магнитных полос вызвано не просто движением по разломам, а каким-то еще более интересным явлением. Это открытие послужило толчком к созданию нового целостного представления о Земле, что и будет темой следующей главы.

¹ «Американское смешанное научное общество», которое ежегодно награждает людей за выдающиеся достижения, присудило награду за 1966 г. Виктору Вакье (ученому, внесшему большой вклад в капитальное изучение геомагнитного поля в восточной части Тихого океана), назвав его «человеком,двигающим океаническое дно на тысячи километров». В это время Вакье был гостем Токийского университета, и, насколько я помню, ему подарили чучело альбатроса. Этот эпизод свидетельствовал об интересе океанологов к смещению полос магнитных аномалий в океане.

ГИПОТЕЗА РАЗРАСТАНИЯ ОКЕАНИЧЕСКОГО ДНА: СИНТЕЗ

ГЕОПОЭЗИЯ

Когда теория континентального дрейфа получила новый импульс, а прогресс в морской геофизике заставил ученых обратить внимание на важную роль срединно-океанических хребтов, тогда и предположение Холмса о том, что материки перемещаются в результате конвекции в мантии (см. гл. 1), стало привлекать больший интерес. Именно в это время Г. Хесс (геофизик из Принстона) опубликовал смелую статью, в которой пытался развить новый взгляд на нашу планету, отбросив привычные представления о неподвижной земной тверди и неизменном океане. Эту статью под названием «История океанических впадин» специалисты читали еще задолго до ее опубликования (в 1962 г.), так что, когда она вышла в свет, изложенная в ней гипотеза уже была широко известна. В введении к своей статье Хесс писал: «Я буду считать эту работу опытом геопоэзии». Земля, как она изображалась в этой «геопоэме», схематически показана на рис. 3-1. Срединно-океанические хребты — это места выхода материала, поднимающегося из мантии, иными словами, это районы, в которых «лента конвейера», впервые описанного Холмсом (стр. 44), выходит на поверхность. Именно здесь рождается новая океаническая кора. Это новое океаническое дно расходится в обе стороны от океанических хребтов и снова опускается в мантию у океанических желобов.

Считается, что скорость такого конвейера составляет несколько сантиметров в год. Это означает, что для того, чтобы океаническое дно, поднявшись в районах срединно-океанических хребтов, переместилось через весь океан и погрузилось в океанические желоба, потребуется не больше 200 млн. лет. Из этого следует, что океаническое дно не существует *постоянно*, а непрерывно обновляется. Материки же, находясь на «ленте конвейера», не могут свободно погрузиться в земные недра, так как они слишком легкие. Поэтому они, так сказать, *полупостоянны*. Такое представление объясняет два загадочных явления, которые десятилетиями не давали покоя морским геологам: 1) Почему на дне океанов не находят горных пород древнее 150 млн. лет? 2) Поче-

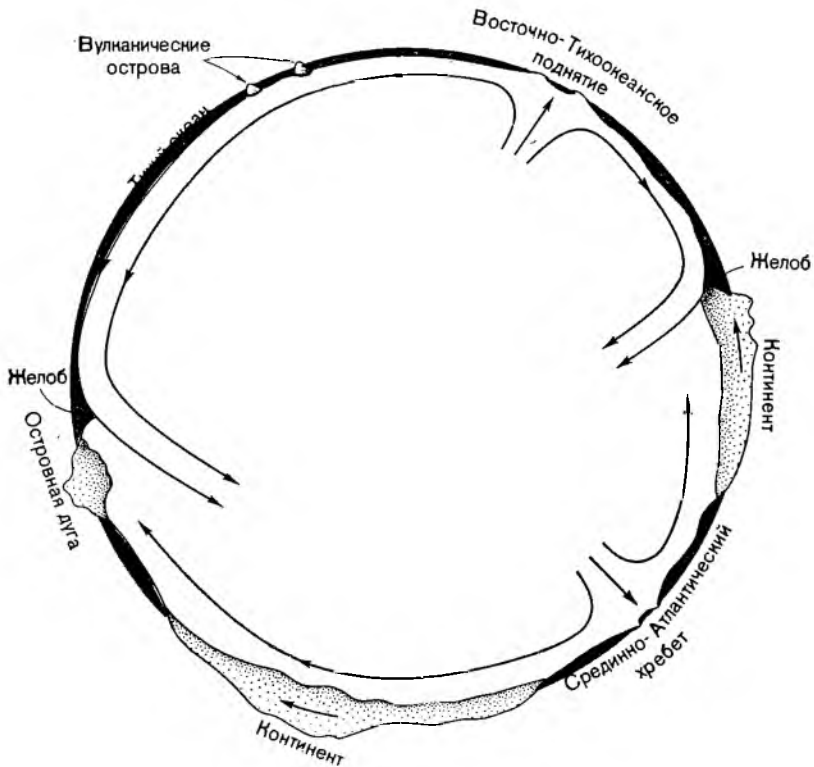


Рис. 3-1. Схематический разрез Земли, построенный на основе гипотезы разрастания морского дна.

му на дне океанов такой тонкий слой осадков? Сам океан существует миллиарды лет, но его дно непрерывно меняется!

В упомянутой статье Хесс подчеркивает одну из своих оригинальных идей, а именно что океаническая кора состоит, вероятно, из серпентинизированного перидотита. Верхняя мантия, как считается, состоит преимущественно из перидотита, содержащего воду. Экспериментально доказано, что при высоких температурах перидотит и вода разделяются, но при температуре ниже 500°C перидотит реагирует с водой и превращается в серпентинит. Хесс утверждал, что перидотит, поднимаясь из глубин мантии, серпентинизируется этим способом близ поверхности и образует в срединно-океанических хребтах новую океаническую кору. Когда кора погружается у океанических желобов в мантию, она снова нагревается выше 500°C , и вода высвобождается. Хесс считал, что эта высвобожденная вода и служит источником воды океанов.

Эта замечательная и многими теперь принятая теория известна как теория «разрастания морского дна», однако в течение не-

которого времени шел спор о том, кто был ее истинным автором. Незадолго до выхода в свет статьи Хесса о геопоззии другой хорошо известный американский ученый Р. Дитц опубликовал сходную гипотезу [14]. Хотя именно Дитц придумал этот емкий и образный термин «разрастание морского дна», вызывало спор, кто же первый выдвинул саму гипотезу, потому что статью Хесса многие читали до ее опубликования. Позднее Дитц сам признал приоритет Хесса. Для меня статья Дитца была таким же озарением, как и работа Хесса; в некоторых отношениях Дитц четче объяснил эту гипотезу, чем Хесс, хотя, возможно, и с меньшей долей геопоззии.

В действительности, оглядываясь на события прошлого, мы видим, что в начале 1960-х годов целый ряд ученых вынашивал сходные идеи. Это обстоятельство делает спор о приоритете не столь важным, и его решение надо, вероятно, оставить профессиональным историкам науки. Лично мне хотелось бы, чтобы с большим почтением относились к Холмсу, который предложил свою гипотезу «ленты конвейера» на тридцать лет раньше.

Дитц в своей статье поддерживал господствовавшее предположение о том, что океаническая кора состоит из габбро-базальтов, но отвергал общепринятый взгляд, что мантия состоит не из перидотита, а из эклогита, который образуется из габбро при очень высоких давлениях. Допущения, подобные этому, делаются в попытке ответить на самые основные вопросы: Что такое кора? Что такое мантия? Какова природа раздела Мохоровичича? По этим вопросам мнения расходятся до сих пор.

Как показано в гл. 1, наиболее распространенный взгляд заключается в том, что раздел Мохо — это граница между слоями различного химического состава: между габбро и перидотитом, причем из габбро сложена нижняя часть коры, а из перидотита — верхняя мантия. Другая теоретическая школа придерживается, однако, иного мнения, а именно что это граница *не* между различными веществами, а между различными *состояниями* одного и того же вещества. Интересно отметить, что хотя модели, разработанные Хессом и Дитцем, были различны, оба они считали раздел Мохо скорее границей между состояниями вещества, чем между веществами. Эта их общая точка зрения была простым совпадением, но она определенно напоминает нам о нашей неспособности ответить на такой основной вопрос: «Что же представляет собой раздел Мохоровичича, который проходит всего лишь в нескольких километрах ниже морского дна?»

В своей гипотезе разрастания морского дна Дитц уделил разделу Мохоровичича мало внимания. Он предпочел называть поверхностный слой нашей планеты, до глубины около 70 км, *литосферой*, выбрав термин, который использовался раньше геологами для обозначения внешней оболочки Земли, состоящей из твердых горных пород. Дитц считал литосферу динамичным блоком, который движется как единое целое. Он заявил также, что под

этим слоем находится несколько более мягкий слой — *астено-сфера*, который позволяет литосфере двигаться. Этот тезис, выдвинутый в 1962 г., был предзнаменованием идеи тектоники плит, которая появилась пятью годами позже.

ИСТОЧНИК ДВИЖЕНИЯ — МОРСКОЕ ДНО

Одним из тех, кто с энтузиазмом поддержал гипотезу разрастания морского дна, был канадец Дж. Т. Уилсон. В прошлом Уилсон не раз присоединял свой голос к различным оригинальным и будоражившим воображение концепциям; одно время он поддерживал теорию сжимающейся Земли, потом — теорию расширяющейся Земли. В начале 1960-х годов он стал утверждать, что теория конвекции в мантии может объяснить многие явления, в том числе и явление дрейфа материков. Специалисты, слишком часто меняющие свое мнение, обычно теряют доверие своих коллег, но Уилсон в силу своей интуиции и оригинальности оказался, по-видимому, исключением. Он, очевидно, действует по принципу: все начинается с гипотезы; приняв однажды какую-либо гипотезу, он так тщательно анализирует все вытекающие из нее следствия, что в конце концов обнаруживаются способы ее проверки. Если гипотеза выдерживает испытание, он развивает ее дальше. Если она опровергается в ходе такого анализа, Уилсон отбрасывает ее. На этой стадии на смену одной гипотезе обычно появляется другая.

Уилсон подошел к проблеме следующим путем. Он предположил, что если принять, что Атлантический океан представляет собой гигантский рифт и что центры вулканической деятельности локализируются в середине рифта или близ нее, то возраст островов, разбросанных по всему океану и имеющих вулканическое происхождение, должен возрастать с расстоянием, на которое они отошли от Срединно-Атлантического хребта. Собрав и изучив все данные, имевшиеся к тому времени (к началу 1960-х годов), Уилсон заключил, что это предположение было действительно правильным. Как показывает рис. 3-2, чем больше расстояние от Срединно-Атлантического хребта до того или иного острова, тем больше его возраст. Например, остров Вознесения, расположенный близко к Срединно-Атлантическому хребту, существует не более 1 млн. лет; находящийся дальше от хребта остров Святой Елены имеет возраст, вероятно, около 20 млн. лет, а возраст островов у западного побережья Африканского континента, таких, как Фернандо-По и Принсипи, составляет 120 млн. лет. Такая картина прекрасно сходится с предположением (основанным на теории континентального дрейфа), что Атлантический океан начал формироваться в юрское время, около 200 млн. лет назад. Изучение цепочек вулканических островов Тихого океана (см. рис. 2-2) также показывает, что и они в своей миграции от мест возникновения подчиняются этой закономерности. Например,

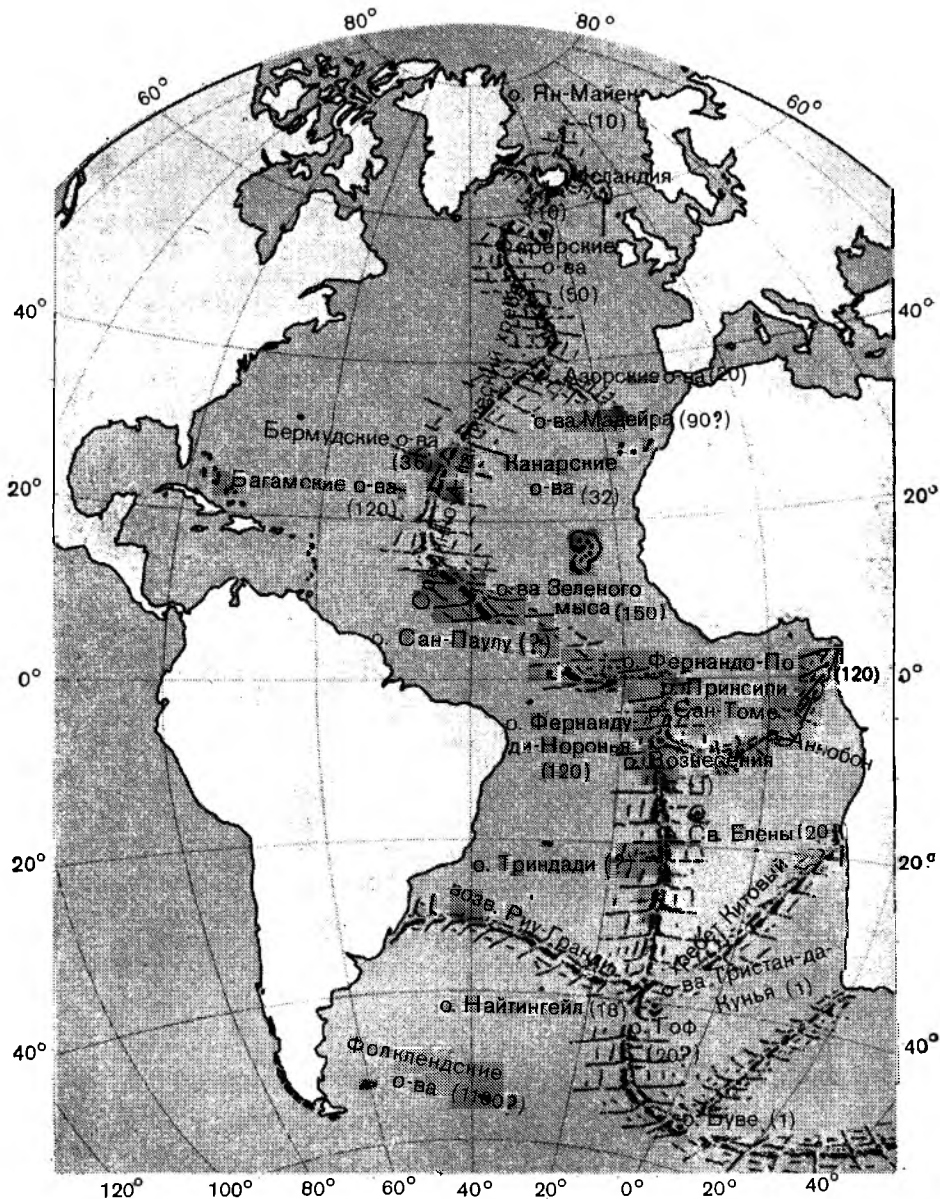


Рис. 3-2. Возраст островов Атлантического океана, определяемый по возрасту древнейших из обнаруженных на них пород (J. T. Wilson, Continental Drift, Scientific American, 1963).

В скобках указан возраст в млн. лет.

было доказано, что возраст островов Гавайского архипелага, которые вытягиваются в линию к северо-западу от острова Гавайи, увеличивается в северо-западном направлении. Полагают, что источник магмы для этого архипелага — не хребет, а то место, где в настоящее время находится остров Гавайи. Это пример одной из «горячих точек», которые будут описаны в гл. 5.

По мере того как накапливались эти и другие отрывочные свидетельства, концепция «подвижного морского дна» постепенно завоевывала общее признание. Уилсон однажды указал, что «если Земля — на свой медлительный лад — ведет себя как очень динамичное тело, а мы раньше считали ее существенно статичной, нам надо отбросить большинство наших старых теорий и книг и начать заново, вырабатывая новую точку зрения и создавая новую науку» (*J. T. Wilson, «A Reply to V. V. Belousov», Geotimes, December 1968, p. 22*).

ЗАГАДКА ПОЛОСАТЫХ КАРТИНОК

Одним из важных событий в морской геофизике конца 1950-х годов было открытие полосовых аномалий магнитного поля на океанах, а также открытие смещений этих полос, упомянутых в гл. 2. Однако не было еще известно происхождение самих этих очень четких полос. Аномалии имеют ширину 20—30 км, длину порядка сотен километров и амплитуду несколько сотен гамм¹. Нам известно, что источником, или причиной, магнитной аномалии может быть либо течение материала в жидком земном ядре, либо присутствие блока магнитных пород, залегающих не глубже 50 км от земной поверхности. Чтобы могли образоваться полосовые аномалии, их источники должны находиться непосредственно под этими узкими зонами и, вероятно, на небольшой глубине; если бы источник находился глубоко, то наблюдаемые на поверхности аномалии не могли быть такими четкими. Из этого был сделан вывод, что источниками полосовых аномалий являются длинные, линейные тела магнитных пород. Можно было бы предположить, что положительные аномалии (где напряженность магнитного поля необычно высока) образованы призмами сильно намагниченных интрузивных или излившихся вулканических пород, тогда как отрицательные аномалии (где магнитное поле слабое) соответствуют глубоким долинам, заполненным осадками, которые намагничены слабо. Однако никто не только не мог объяснить, каково происхождение и каков характер пород, вызывающих полосовые аномалии, но и не мог доказать, что такие источники аномалий действительно существуют.

В 1963 г. двое молодых английских ученых, Ф. Вайн и Д. Мэтьюз, выступили с четким объяснением. Они предположили, что

¹ Гамма — единица, используемая при измерении геомагнитного поля. Напряженность геомагнитного поля в Токио составляет около 46 тыс. гамм, в Нью-Йорке — 57 тыс. гамм.

характер намагниченности коры, вызывающий полосчатую картину аномалий, обусловлен не различной *интенсивностью* намагничения, а различным *направлением* намагничения. Положительным аномалиям соответствуют породы, намагниченные *прямо* («нормально»), т. е. параллельно современному полю. Отрицательные аномалии вызваны присутствием пород, намагниченных *обратно*, т. е. в противоположном направлении. Вайн и Мэтьюз утверждали, что для объяснения этого феномена не требуется никакой новой гипотезы. По их мнению, полосчатый характер магнитных аномалий — это прямое следствие сочетания двух фундаментально важных, но независимо установленных явлений: во-первых, разрастания океанического дна, материал которого поднимается в осевых зонах срединно-океанических хребтов, и, во-вторых, изменения полярности геомагнитного поля, испытывающего инверсию каждые несколько десятков или сотен тысяч лет (см. раздел об инверсиях геомагнитного поля, стр. 36). Эту гипотезу следует рассмотреть несколько подробнее.

Согласно гипотезе разрастания морского дна, магма, поднимаясь из горячей мантии и образуя в подводных хребтах новое океаническое дно, остывает и проходит при этом через точку Кюри. В этот момент новорожденная кора намагничивается в том направлении — прямо или обратно, — которое соответствует преобладающему магнитному полю той эпохи. Когда океаническое дно медленно расходится от срединного хребта, полоса океанического дна, образованного в эпоху нормальной полярности, неизбежно оказывается рядом с полосой, в которой породы имеют обратное намагничивание; все это и создает полосчатую картину магнитных аномалий. Раздвигающееся океаническое дно, уподобленное Холмсом ленте конвейера, можно представить себе и как своего рода магнитофон. Океаническая кора, поднимаясь из мантии, — это магнитная лента, на которой записывается история инверсий геомагнитного поля.

Канадский геофизик Л. Морли опубликовал идентичное, но независимо разработанное объяснение полосчатого характера магнитных аномалий, причем сделал он это почти одновременно с Вайном и Мэтьюзом. Теперь специалистам довольно хорошо известно, что Морли раньше, чем его коллеги, пытался опубликовать свою статью и посылал ее в ведущие английские и американские научные журналы, но она была тогда отвергнута как «слишком умозрительная». Грустная история! Вероятно, эту гипотезу справедливо было бы назвать гипотезой Вайна — Мэтьюза — Морли.

ОКЕАНИЧЕСКОЕ ДНО, УПОДОБЛЯЕМОЕ МАГНИТОФОНУ

Идея разрастающегося океанического дна, в том виде как она была предложена Хессом, Дитцем, Уилсоном и другими, хотя и привлекала многих ученых, но вначале встретила некоторые

сомнения. Причина заключалась, вероятно, в том, что столь простое объяснение такого сложного комплекса природных явлений невольно вызывает скептическое отношение. По-видимому, всегда находятся люди, которые подсознательно убеждены (а может быть, даже надеются), что природа слишком сложна для того, чтобы ей можно было дать простое объяснение. Гипотеза Вайна — Мэтьюза — Морли, объясняющая полосчатый характер магнитных аномалий на основе комбинации двух гипотез, которые сами были спорными, также была встречена многими учеными настороженно. Печальная судьба статьи Морли показывает, сколь широким было противодействие. Однако в 1966 г., когда в короткое время появились сообщения о множестве открытий, подтверждающих новые представления, скептицизм был побежден.

Вайн сообщил, что ему в его совместной работе с Уилсоном удалось провести интерпретацию линейных магнитных аномалий на основе «магнитофонной» модели — не только качественно, что Вайн и Мэтьюз сделали раньше, но и количественно. Вайн допустил, что скорость разрастания океанического дна от каждого данного хребта сохраняется постоянной. При этом условии ширина каждой магнитной полосы на океаническом дне должна быть пропорциональна продолжительности соответствующей эпохи нормальной или обратной полярности. Эта количественная зависимость между известными значениями временной шкалы инверсий магнитного поля и шириной полосовых магнитных аномалий убедила целый ряд ученых в том, что идея разрастания морского дна в какой-то мере правдоподобна.

Как Вайн пришел к своему замечательному выводу? Прежде всего в его руках были очень важные и надежные исходные данные. К 1966 г. А. Кокс, Р. Доуэлл и Б. Далримпл уже разработали историю инверсий геомагнитного поля для последних 4 млн. лет. Используя калий-аргоновый метод¹, они датировали магнитные породы со всего мира и точно определили, сколько миллионов лет назад произошли различные инверсии геомагнитного поля. Все, кто регулярно бывал в те дни в лаборатории А. Кокса и его коллег, могли видеть, как непрерывно распутывалась история магнитного поля Земли, поскольку каждый раз посетителей ожидало что-то новое. На рис. 3-3, а показана хронология инверсий геомагнитного поля, установленная по результатам палеомагнитного изучения вулканических пород, собранных на суше. Центральная часть диаграммы соответствует настоящему вре-

¹ Этот метод определения абсолютного возраста горных пород основан на том, что радиоактивный изотоп калия ^{40}K , содержащийся в породах, превращается при распаде в изотоп аргона ^{40}Ar , период полураспада которого составляет $1,42 \cdot 10^9$ лет. Следовательно, если определить количества ^{40}K и ^{40}Ar , присутствующие в породе, то можно сказать, когда начал накапливаться ^{40}Ar . Это время и считается возрастом породы.

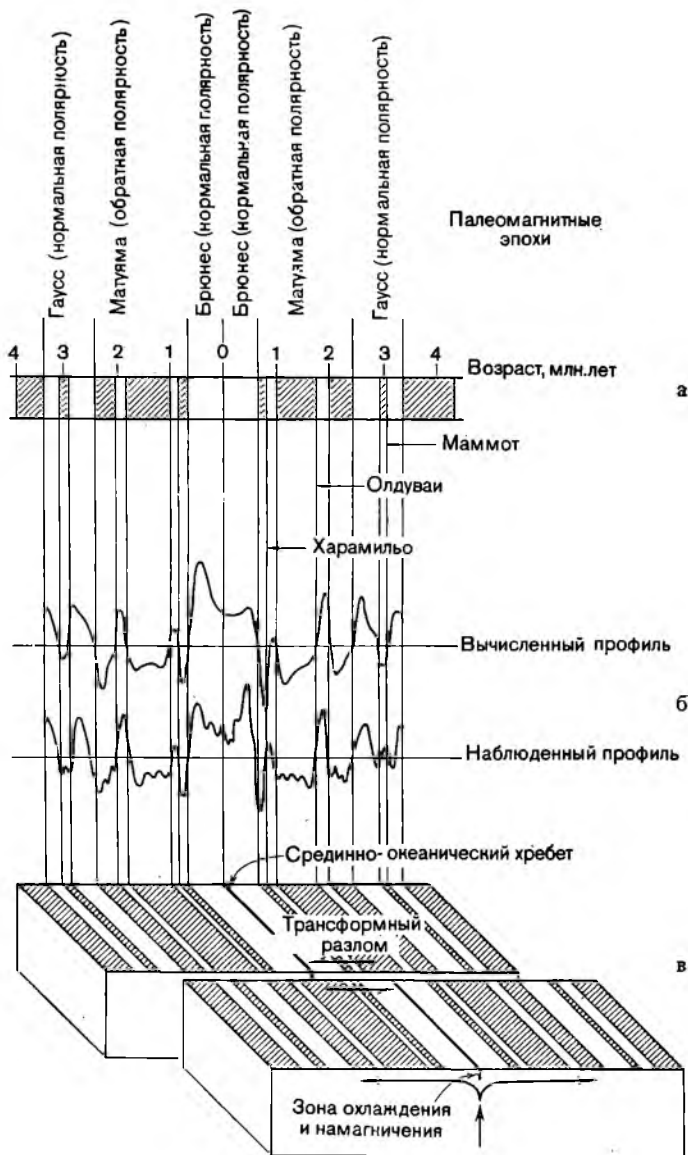


Рис. 3-3.

а. Эпохи и эпизоды различной полярности геомагнитного поля [10]. б. Сравнение наблюдаемых аномалий магнитного поля по профилю «Элтанн-19» (нижняя кривая) с вычисленными значениями (верхняя кривая) для Восточно-Тихоокеанского поднятия [46]. в. Модель морского дна с полосовыми магнитными аномалиями, возникшими в соответствии с гипотезой Вайна — Мэтьюза — Морли. Зона разлома, выделяемая по относительному смещению двух блоков, рассекает хребет и полосовые аномалии, образуя так называемый трансформный разлом (см. стр. 76).

мени, а цифры с обеих сторон от центра показывают возраст (от молодого к древнему) в миллионах лет. Отрезки времени, в течение которого полярность не менялась, Кокс и его коллеги называли палеомагнитными *эпохами*, а каждая эпоха была названа по имени одного из пионеров геомагнитных исследований. Современная эпоха называется «нормальной» эпохой Брюнэс по имени французского ученого, который еще в 1906 г. постулировал возможность инверсии геомагнитного поля в прошлом. Предыдущая эпоха, закончившаяся около 700 тыс. лет назад, названа «обратной» эпохой Матуяма в честь японского ученого М. Матуяма, о котором упоминалось в гл. 1. Кокс и его сотрудники обнаружили также, что на эпохи прямой и обратной полярности накладываются короткие, продолжительностью меньше 100 тыс. лет, интервалы, в течение которых полярность была противоположна полярности данной эпохи. Эти интервалы были названы *эпизодами* и каждому из них было присвоено имя по той местности, где были впервые получены данные о них. Например, один из эпизодов получил название Олдувай по названию ущелья в Африке, хорошо известного как место выдающихся антропологических находок.

Вайн начал сопоставлять наблюдаемые профили полосовых магнитных аномалий с временной шкалой инверсий. Приняв более или менее правдоподобные скорости разрастания океанического дна, он установил превосходное соответствие между фактическими и расчетными данными, что показано двумя кривыми на рис. 3-3, б. Верхняя кривая представляет собой профиль магнитных аномалий, рассчитанных теоретически исходя из модели морского дна, которая изображена на рис. 3-3, в. Эта модель была построена на основе истории инверсий геомагнитного поля, как она была представлена Коксом, Далримплом и Доуэллом [10], и на основе теории разрастания морского дна с разумными допущениями о скорости разрастания. Нижняя кривая — наблюдаемый профиль магнитных аномалий Восточно-Тихоокеанского поднятия. Трудно вообразить, чтобы полное соответствие между рассчитанным и фактическим профилями было случайным. Такое же согласие было доказано и для других океанических хребтов, например для хребта Рейкьянес (к югу от Исландии), Центрально-Индийского хребта и некоторых Антарктических хребтов. Хотя точность совпадения для разных хребтов различна, обычно удается распознать на профилях все наиболее длительные эпохи, что позволяет определить абсолютную скорость разрастания морского дна. По данным Вайна и Уилсона, эта скорость для Восточно-Тихоокеанского поднятия составляет 4—5 см/год, а для хребта Рейкьянес — 1 см/год. В конце 1966 г. Вайн опубликовал весьма убедительную статью, которая оставляла мало места для сомнений относительно происхождения полосовых магнитных аномалий и скорости разрастания морского дна. Впоследствии на одном симпозиуме Вайна спросили, прове-

рял ли он свои результаты статистически. «Я никогда не касаюсь статистики»,— ответил Вайн, демонстрируя полную уверенность в своей работе.— «Я имею дело только с фактами».

К концу 1966 г. Дж. Хейрцлер, У. Питман и их коллеги по Геологической обсерватории Ламонт-Догерти приняли интерпретацию Вайна, Мэтьюза и Уилсона и начали использовать ширину магнитных полос и расстояние между ними для определения скорости разрастания морского дна. Практически ламонтская группа и Вайн работали по одному и тому же профилю магнитных аномалий через Восточно-Тихоокеанское поднятие, полученному на исследовательском судне «Элтанин» Национального научного фонда (этот ставший теперь классическим профиль *Элтанин-19* показан на рис. 3-3, б), и обе группы пришли к одинаковым значениям скорости разрастания морского дна. Использование данных о полосовых аномалиях для измерения скоростей разрастания быстро превратило «умозрительную идею, не заслуживающую опубликования», в укоренившийся метод.

В том же году появилось и другое важное сообщение. Оно касалось исследования остаточной намагниченности образцов осадков, взятых на морском дне. Было установлено, что в осадочных породах океанического дна существует остаточная намагниченность. Тонкие частицы магнитных минералов, представляющие собой мельчайшие магниты, откладываются на океаническом дне таким образом, что направление их намагниченности оказывается параллельным господствующему геомагнитному полю. Однако измерить направление намагниченности океанических осадков трудно, так как она очень слабая. К тому же осадки мягкие и с ними трудно работать. Начиная с 1957 г. такие измерения пытались проводить ученые из Кембриджского университета и Скриппсовского океанографического института, но они не добились больших успехов. Наконец, в 1966 г. Н. Опдайк, Б. Гласс и другие сотрудники Геологической обсерватории Ламонт-Догерти успешно выполнили измерение остаточной намагниченности образцов, взятых в Атлантическом океане и в северной части Тихого океана, и получили выдающиеся результаты. Поскольку осадконакопление на дне океана — процесс чрезвычайно медленный, непрерывная история земного магнетизма за последние несколько миллионов лет может быть выяснена путем измерения намагниченности осадочного материала, залегающего в каких-нибудь десяти метрах под морским дном. Пробы для этих измерений, или, как их называют, образцы керна, получают со дна океана в виде вертикальной колонки с помощью трубки (проботборника), забуриваемой в осадочные породы. Результаты изучения таких проб (схематически показанные на рис. 3-4) отчетливо демонстрируют чередование прямой и обратной намагниченности. По этим измерениям устанавливают крупные эпохи и даже некоторые эпизоды, однако эпизоды отмечаются не все-

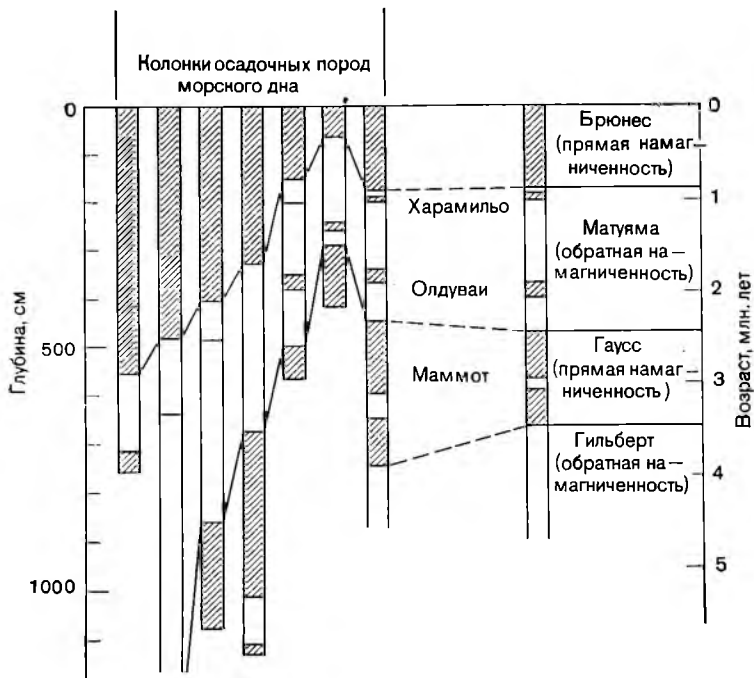


Рис. 3-4. Прямая и обратная намагниченность океанических осадков (N. D. Opdyke, B. Glass, J. D. Hayes, J. Foster, Paleomagnetic study of Antarctic deep sea cores, Science, 154, p. 349, 1966).

Заштрихованные отрезки колонок соответствуют прямой намагниченности, светлые отрезки — обратной намагниченности.

гда, так как отложения иногда нарушены роющими или ползающими организмами.

Эти результаты подтвердили высокий уровень развития новой отрасли геологии, известной как палеомагнитная стратиграфия. Точное определение породы можно теперь дополнить исследованием направления остаточной намагниченности — новым ценным средством для датирования пород. Таким образом, история инверсий геомагнитного поля была установлена количественно посредством изучения трех независимых явлений: остаточного намагничивания вулканических пород со всех континентов, полосовых магнитных аномалий океанического дна (шириной в десятки и длиной в сотни километров) и слабой остаточной намагниченности океанических осадков, образцы которых отбирались из слоистых толщ мощностью 10 м или меньше. Замечательное согласие результатов, полученных при этих трех видах исследований, со всей определенностью подтвердило, что океаническое дно можно уподобить высококачественному магнитофону.

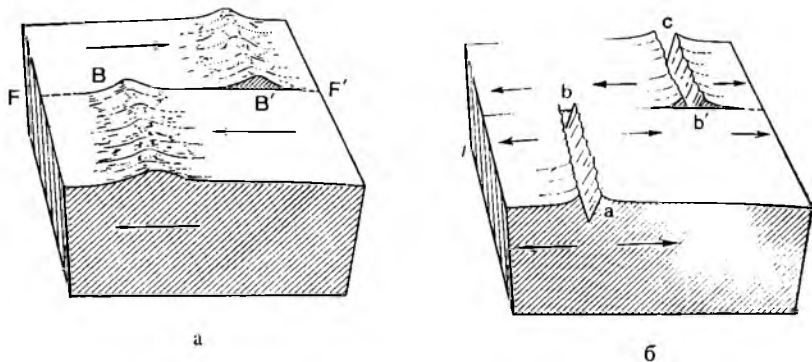


Рис. 3-5. Два типа разрывов.
a — поперечный разрыв; *б* — трансформный разрыв.

ТРАНСФОРМНЫЙ РАЗЛОМ: ИДЕЯ БОЛЬШОЙ НОВИЗНЫ

Как было отмечено в конце гл. 2, Вакье и его сотрудники обнаружили четко выраженное смещение полосовых магнитных аномалий у западного побережья Северной Америки. Эти данные произвели глубокое впечатление на других ученых, так как они, по-видимому, подтвердили, что крупные — местами до 1000 км — относительные смещения смежных сегментов океанического дна действительно имели место. Принимая во внимание происхождение полосовых аномалий, как его объяснили Морли, Вайн и Мэтьюз, рассмотрим теперь причину смещений магнитных полос. Отражают ли эти смещения реальное проскальзывание сегментов океанической коры друг относительно друга?

Дж. Уилсон выступил в 1965 г. со следующей интерпретацией [50]. Он предположил, что эти смещения — не простые «поперечные» разломы, а разломы совершенно нового типа, которые он назвал «трансформными». Различие между поперечными и трансформными разломами показано на рис. 3-5. При поперечном разрыве (рис. 3-5, *a*) блоки по обе стороны разрыва движутся в разных направлениях, показанных стрелками, что приводит к смещению целой структуры (на рисунке — горного хребта), пересеченной разрывом. Такие разрывы широко распространены на материках, и разломами этого типа принято было объяснять наблюдаемое смещение полосовых магнитных аномалий и океанических хребтов. При трансформном разрыве (рис. 3-5, *б*) смещение bb' срединно-океанического хребта (ab и $b'c$) не отличается, по-видимому, от смещения, вызываемого поперечным разрывом. Но по гипотезе разрастания морского дна срединно-океанические хребты считаются динамичными, а не статичными образованиями, так как в них постоянно появляется и растекается (в направлениях, показанных на рисунке стрелками) новое океаническое дно. Если мы принимаем эту идею, то

становится ясно, что трансформные разломы сильно отличаются от обычных поперечных. Прежде всего в поперечном разломе смещение BB' будет с течением времени возрастать, пока разлом будет оставаться активным; однако если мы считаем, что на отрезках срединно-океанического хребта ab и $b'c$ морское дно образует с одинаковой скоростью, то расстояние bb' вовсе не будет меняться. Более того, смещение между блоками по обе стороны разлома будет развиваться только вдоль отрезка bb' ; за пределами этого отрезка никакого относительного смещения блоков по обе стороны разлома не происходит. Это имеет важное значение для сейсмологии. Если землетрясения вызываются движением блоков на противоположных сторонах разлома, то в поперечном разломе они должны происходить по всей длине FF' (рис. 3-5, а), а в трансформном разломе — только по отрезку bb' между хребтами (рис. 3-5, б). Кроме того, хотя кажущееся смещение оси хребта в обоих типах разлома имеет одно и то же направление, действительное направление движения по разломам оказывается различным. Если это поперечный разлом и вы стоите на одном из его бортов, то противоположный борт движется от вас *направо*. Однако, если это трансформный разлом и вы стоите на его борту между хребтами, противоположный борт движется от вас *налево*. Уилсон заключил, что разломы, рассекающие во многих местах срединно-океанические хребты, должны относиться к типу трансформных (см. рис. 3-3, в). На рис. 3-5 разлом изображен между двумя океаническими хребтами, но разломы могут быть и между океаническим хребтом и желобом или между двумя желобами.

Это имеющее важное значение предвидение Уилсона относительно трансформных разломов возникло потому, что он считал маловероятным, чтобы крупный разлом, вызывающий кажущееся смещение на тысячу километров, мог быть обычным поперечным сдвигом. Такое толкование он считал неприемлемым, поскольку оно не объясняло, каким образом исчезают породы коры у концов разлома по обе его стороны. Куда движутся смещенные части океанического дна? Они не могут просто пропасть без нарушения закона сохранения материи. Уилсон понял, что ключ к ответу на эти вопросы дают зоны разлома, давно уже известные океанологам. Между смещенными хребтами зоны разлома отмечают положение все еще активных трансформных разломов. На удалении от смещенных хребтов зоны разлома уже не активны, а представляют собой как бы шрамы, отмечающие след прежних трансформных разломов.

Идея трансформных разломов подсказывала, что знаменитый разлом Сан-Андреас (рис. 3-6), возможно, также относится к этому типу. Скопление очагов землетрясений вдоль Восточно-Тихоокеанского поднятия дало Уилсону основание предполагать, что это поднятие представляет собой срединно-океанический хребет, от которого расходится морское дно. Восточ-

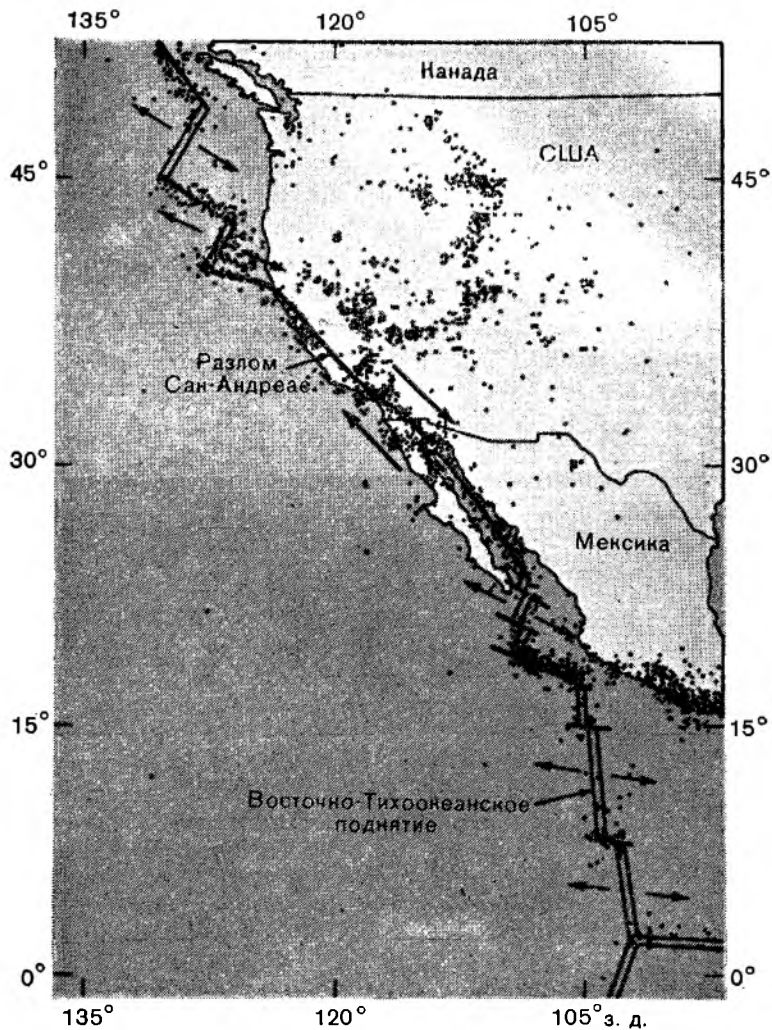


Рис. 3-6. Разлом Сан-Андреас, представленный как трансформный разлом. Двойной линией обозначены раздвигающиеся хребты, сплошной жирной линией — трансформные разломы. Короткими стрелками на противоположных сторонах Восточно-Тихоокеанского поднятия показано движение блоков, расходящихся друг от друга. Длинные стрелки у разлома Сан-Андреас показывают сдвиговый характер движения вдоль этого разлома. Точками обозначены эпицентры землетрясений.

но-Тихоокеанское поднятие протягивается до южного конца Калифорнийского залива, а разлом Сан-Андреас выходит на поверхность у его северного конца. Известно, что по разлому Сан-Андреас происходят в основном сдвиговые смещения в направлении, параллельном разлому, и нет данных о растяжении и движениях типа раздвигания. Почему растяжение, проявляющееся

в пределах Восточно-Тихоокеанского поднятия, должно было вдруг превратиться в горизонтальные скалывающие напряжения по разлому Сан-Андреас? Этот вопрос долго оставался загадкой для ученых. Если же считать разлом Сан-Андреас трансформным, то, как показал Уилсон, эта загадка может быть легко разрешена. Объяснение этому дано на рис. 3-6. Чтобы подтвердить такое объяснение, Уилсон должен был найти другой срединно-океанический хребет у северного конца трансформного разлома Сан-Андреас. Для доказательства действительного существования такого разлома Вайн и Уилсон начали подробное изучение карты магнитных аномалий у острова Ванкувер. Можно себе представить, как они были горды, обнаружив симметрию полосовых магнитных аномалий между двумя осевыми линиями, показанными на рис. 2-8. Профили магнитных аномалий поперек этих осей показали почти полное согласие с историей инверсий геомагнитного поля при допущении, что скорость разрастания морского дна составляет здесь 2,9 см/год. Возвышенность, простирающаяся вдоль линии *BC* (рис. 2-8), была названа хребтом Хуан-де-Фука, а такая же возвышенность вдоль линии *DE* — хребтом Горда.

Уилсон однажды сказал мне, что он натолкнулся на идею трансформного разлома, когда вырезал из листа бумаги модель разрастающегося срединно-океанического хребта. Следует отметить, что эта идея возникла только после того, как Уилсон тщательно изучил огромное количество данных, уже накопленных к тому времени. Таким образом, хотя именно благодаря его интуиции нашли свое логическое завершение громадные усилия других ученых, нельзя упускать из виду достижения Вакье и его сотрудников, которые собрали точные данные о магнитных аномалиях. Эти данные оказались исключительно ценными для проверки правильности многих теоретических предположений.

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ ТРАНСФОРМНЫХ РАЗЛОМОВ

Направление подвижек по разломам можно оценить исходя из анализа первых вступлений сейсмических волн, возбужденных этими подвижками. Землетрясения происходят тогда, когда в недрах Земли образуется разрыв, который и порождает упругие волны. Определяя направление первого смещения, вызванного приходом такой волны, с помощью сейсмографов, размещенных вокруг эпицентра, сейсмологи могут оценить направление действия сил вдоль данного разлома, которые были причиной землетрясения. Эта процедура называется изучением механизма очага землетрясения; в 1910—1920 гг. ее разрабатывали в Японии Дз. Сидо и Х. Накано, а в США — П. Байерли; в 1930-х годах ею занимался японец Х. Хонда.

Если подвижка по разлому происходит в направлении, показанном на рис. 3-7, *a*, первое вступление продольной волны, излу-

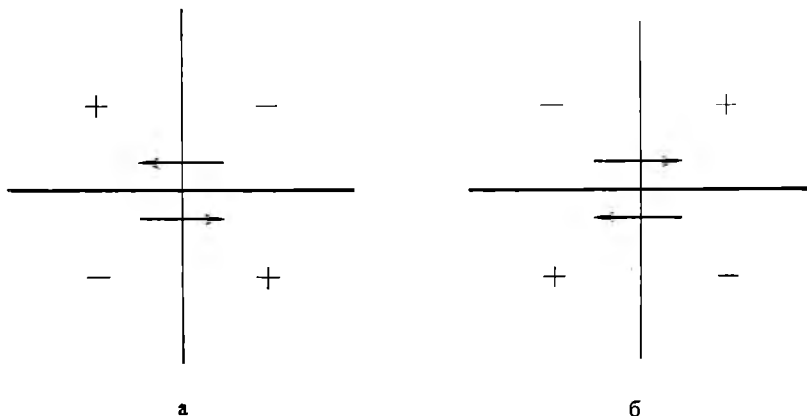


Рис. 3-7. Характер первых вступлений продольных волн.

Жирными линиями обозначены разломы, стрелками показано направление подвижек по ним. В областях, отмеченных знаком плюс, начальное движение (первое вступление упругой волны) направлено от очага; в областях, отмеченных знаком минус, — к очагу.

чаемой от разлома, толкает материал от очага землетрясения в областях, отмеченных знаком плюс, и притягивает его к очагу в областях, отмеченных знаком минус. Если направление подвижки по разлому противоположное, как это показано на рис. 3-7, б, то и картина излучения, естественно, получается обратная. Исследуя механизм очага землетрясения и определяя по нему направление подвижки по разлому, можно установить, представляет ли зона разлома, смещающая океанический хребет, трансформный разлом или нет. Иными словами, надо только решить, в каком направлении происходит подвижка, возникающая при землетрясении в зоне разлома, — в направлении, показанном на рис. 3-5, а или на рис. 3-5, б.

Успехи, достигнутые в этой области исследований, связаны большей частью с материалами, собранными Всемирной стандартной сетью сейсмологических наблюдений (WWSSN), которую США разместили по всему миру. После второй мировой войны как СССР, так и США провели огромную работу по улучшению своей сейсмологической сети с целью обнаружения подземных ядерных взрывов. В результате сейсмология в обеих странах сделала большой шаг вперед. Фактически такие системы наблюдений служат теперь главным образом целям чисто сейсмологических исследований, а не целям обнаружения ядерных взрывов. Сейсмологические данные об океанических хребтах всего земного шара, полученные прежде всего благодаря такой стандартизированной системе наблюдений, составили богатый материал, использованный Л. Сайксом (Геологическая обсерватория Ламонт-Догерти) для изучения механизма очагов землетрясений.

Было уже известно, что землетрясения в зонах разлома происходят только на участке смещения, показанном на рис. 3-5, б отрезком bb' . Этот факт сам по себе является хорошим подтверждением концепции трансформного разлома. Сайкс стремился выяснить механизм очагов этих землетрясений. В 1966 г. был опубликован результат его исследований. Он полностью подтвердил предвидение Уилсона. Для землетрясений, возникающих вдоль зон разломов между океаническими хребтами, все без исключения направления подвижек согласовались с теми, которые предсказывал Уилсон. Землетрясения, происходящие у гребней хребтов, генерируют, согласно Сайксу, волны, которые должны возникать в случае действия сил растяжения при отодвигании обоих склонов хребта от его оси. Трудно себе представить более прямое и убедительное доказательство теории Уилсона о трансформном разломе.

«ГОДОВЫЕ КОЛЬЦА» НА ОКЕАНИЧЕСКОМ ДНЕ: ЗАДАЧА ДЛЯ ГЕОЛОГОВ

Поддержанная гипотезой Вайна — Мэтьюза — Морли, объяснившей полосовые магнитные аномалии океанического дна, и многими другими данными, теория разрастания морского дна в середине 1960-х годов прочно обосновалась в науке. Значительный вклад в ее развитие внесла Геологическая обсерватория Ламонт-Догерти, где в ожидании анализа и интерпретации скапливались результаты магнитных съемок, в течение десятилетий проводившихся на всех океанах мира. Дж. Хейрцлер, У. Питман и другие сотрудники обсерватории выполнили трудоемкий анализ этих данных с помощью вычислительных машин. Вскоре профили магнитных аномалий по всем океанам мира были четко систематизированы и могли дать ясное хронологическое описание морского дна.

Хронология инверсий геомагнитного поля, которую можно проследить по палеомагнитным данным для горных пород материков, охватывает около 4 млн. лет и содержит только несколько эпох инверсий магнитного поля Земли. Однако океаническое дно пересекают десятки полосовых аномалий. Как же нам представить хронологию магнитных полос во времена, предшествовавшие последним 4 млн. лет? Хейрцлер и его коллеги решили провести такую оценку исходя из предположения, что скорость разрастания морского дна была в южной части Атлантического океана постоянной. Как показано на рис. 3-8, типичные профили магнитных аномалий для трех океанов дают сходное чередование максимумов и минимумов. Многие такие пики и понижения оказались общими для всех океанов. Некоторые пики, из тех, что достаточно четко выражены и могут распознаваться почти везде, были впоследствии пронумерованы, чтобы облегчить сравнение различных профилей. Ученые из обсерватории Ла-

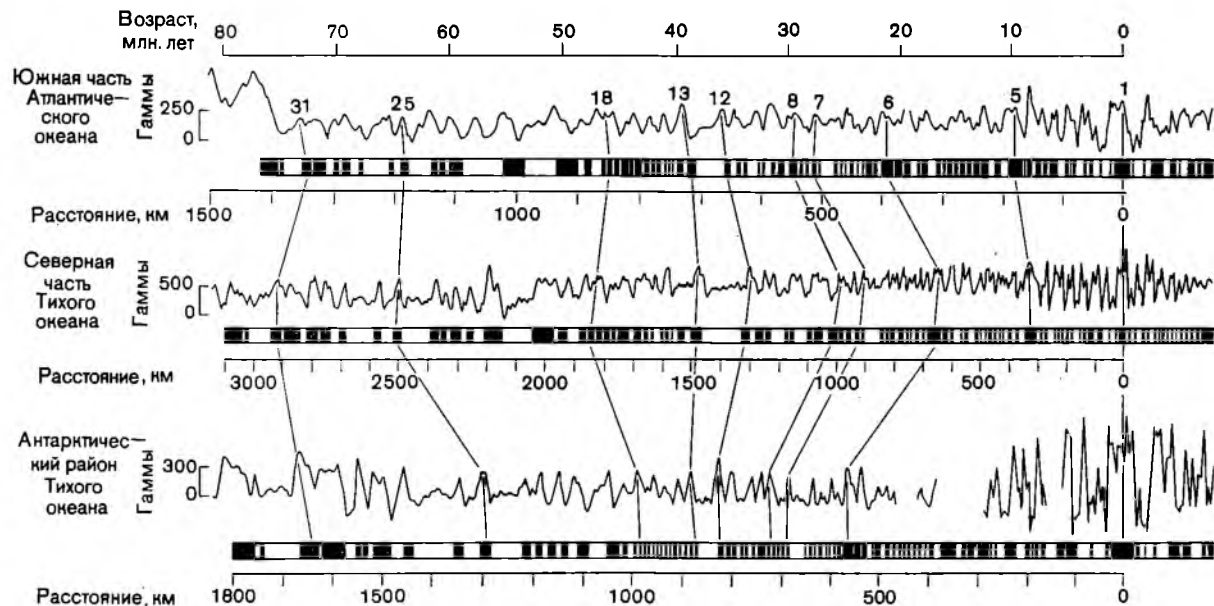


Рис. 3-8. Профили магнитных аномалий, измеренных в трех океанах на исследовательских судах, осуществлявших рейсы перпендикулярно к срединно-океаническим хребтам [22].

Обратите внимание на сходство профилей, особенно на сходство пронумерованных пиков, имеющих легко распознаваемую форму (каждый номер закреплен за определенной линией корреляции аномалий). Светлые и темные полосы на горизонтальных шкалах под профилями показывают чередование прямо и обратно намагниченных блоков вулканических пород, протягивающихся параллельно хребту. Расстояние между одинаково намагниченными блоками в разных океанах различно вследствие различия скоростей разрастания (считается, что в южной части Атлантического океана эта скорость наиболее постоянна, но всюду прослеживается одна и та же последовательность из 171 инверсии, охватывающая 76 млн. лет, т. е. всю кайнозойскую эру).

монт-Догерти смогли проследить на этих профилях магнитные аномалии вплоть до возраста 76 млн. лет (рис. 3-9). Они обнаружили, что в течение этого времени инверсия геомагнитного поля происходила 171 раз. Поскольку этот метод оценки времени по геомагнитной шкале оказался практически пригодным, возраст океанического дна в любом районе, где выяснено распределение полосовых магнитных аномалий, может быть прослежен сколь угодно далеко в глубь геологической истории. Иными словами, полосовые аномалии образуют как бы «годовые кольца» океанического дна. (Понятно, что в отношении океанического дна каждая полоса отражает рост, происходивший не в течение одного года, а в течение периода, продолжительность которого варьирует от 20 тыс. до нескольких миллионов лет.) Предположение Хейрцлера о том, что скорость разрастания морского дна в южной Атлантике была постоянной, подтвердилось в дальнейшем материалами, полученными по Проекту глубоководного бурения, о чем речь пойдет в следующем разделе этой главы.

Установив время возникновения полосовых аномалий на всей обширной площади разрастания океанического дна, можно в принципе построить контуры одинакового времени образования магнитных аномалий, или *изохроны* — линии, соединяющие точки, в которых земная кора имеет один и тот же возраст. В результате получится геологическая карта океанического дна. Геологическая карта суши может быть более детальной в описании, скажем,

характера горных пород, но наземная съемка проводится в основном с помощью геологического молотка и другого ручного снаряжения и требует длительной работы большого числа геологов, посвятивших себя последовательному — шаг за ша-

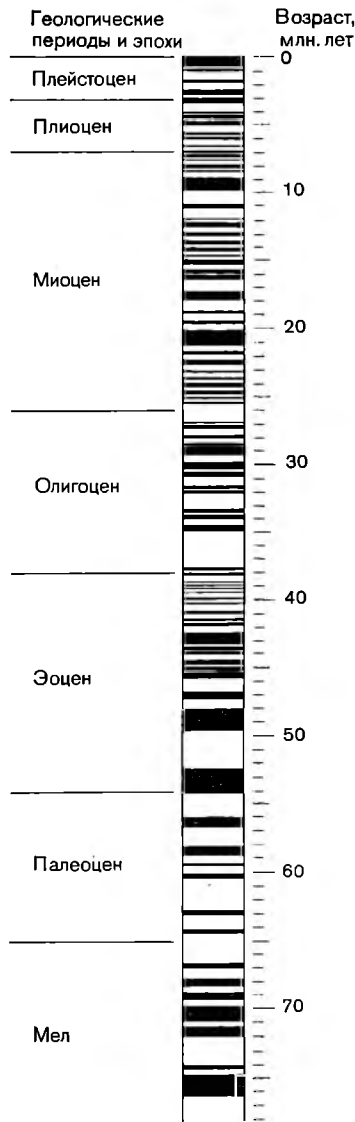


Рис. 3-9. Хронология инверсий геомагнитного поля для последних 76 млн. лет [22].

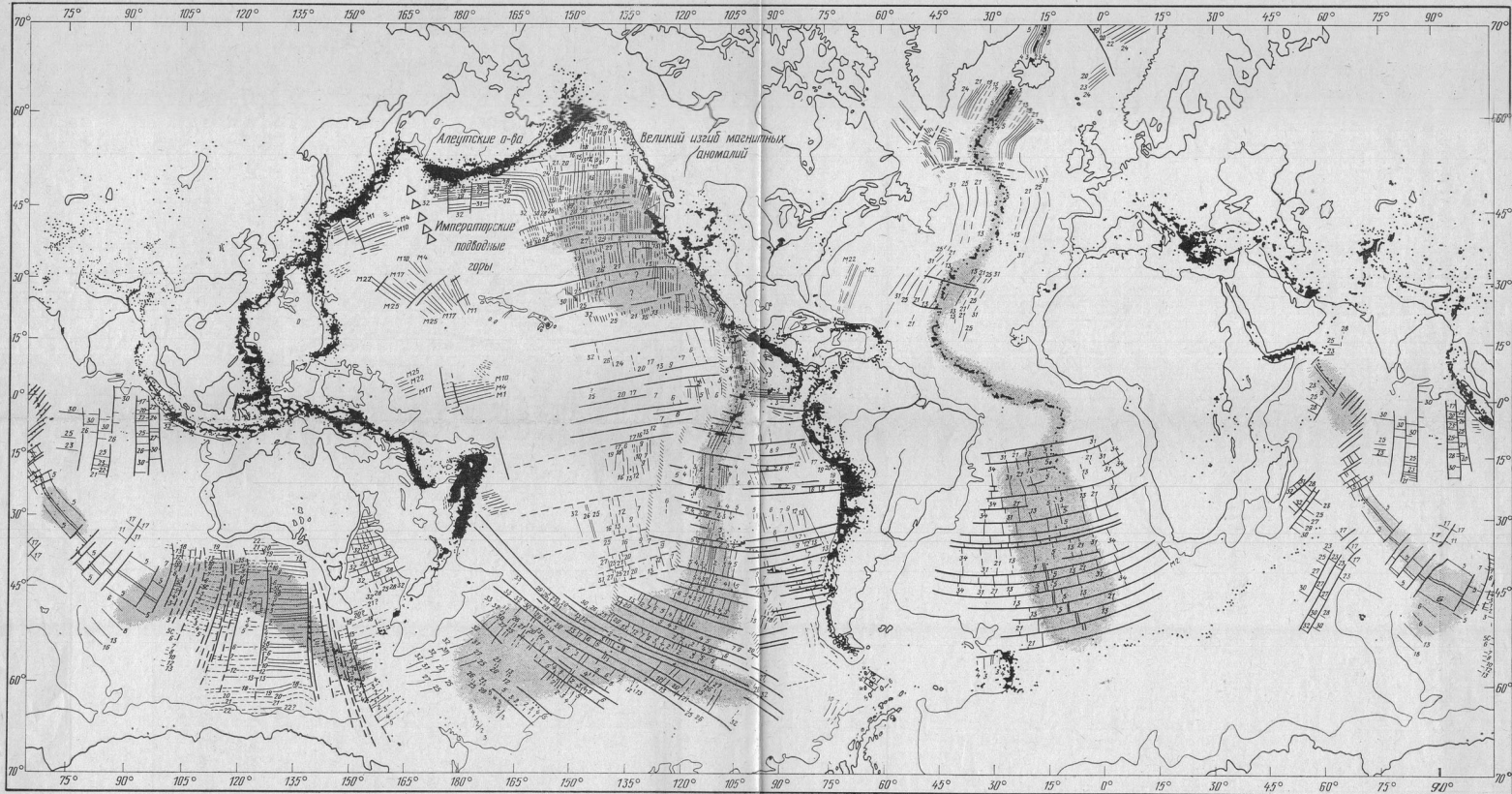


Рис. 3-10. Карта изохрон для океанического дна (составили В. У. Питман III, Р. Ларсон и Е. Херрон, Американское геологическое общество, 1974 г.). Цифрами обозначены номера магнитных аномалий (см. текст). Серым показаны области, по которым материалы были собраны в 1968 г. Дж. Хейрлером и его коллегами. Показаны также срединно-океанические хребты, трансформные разломы и размещение эпицентров землетрясений на всем земном шаре.

гом — исследованию Земли. Напротив, геологическое картирование оксанического дна может быть выполнено быстро с помощью исследовательских судов с буксируемыми магнитометрами. Результаты таких съемок показаны на рис. 3-10 в виде сводки данных морских магнитометрических наблюдений, имеющихся на сегодняшний день. Темно-серым цветом обозначены области, для которых подобное картирование уже в 1968 г. было проведено Хейрцлером и его сотрудниками. Объяснение контуров, проведенных вне этих областей, будет дано в гл. 4.

Хотя изохроны проведены уже на довольно большой площади океанического дна, все же остались еще крупные «белые пятна», например на значительных участках в центре и на западе Тихого океана и в северных районах Атлантического океана, удаленных от океанических хребтов. Изохрон там нет либо потому, что детальная магнитная съемка еще не проведена, либо потому, что магнитная съемка показала отсутствие полосовых аномалий. Те области, где аномалий нет, названы «спокойными» зонами; вопрос, почему там нет аномалий, имеет несколько возможных ответов. Может быть, скорость разрастания в то время была чрезвычайно большой, и крупные области морского дна образовались тогда, когда направление магнитного поля не менялось. Или же возможно, что в течение длительного времени действительно не было инверсий геомагнитного поля; палеомагнитные исследования на континентах показали, что периоды без инверсий магнитного поля имели место в конце палеозоя, в юрское и меловое время. Другие возможные причины образования «спокойных» зон заключаются в том, что океаническое дно могло и не «записать» инверсии поля или потерять свою остаточную намагниченность в результате действия вторичных факторов, а может быть и в том, что океаническое дно в таких зонах образовалось совершенно иным путем, чем это объясняет в настоящее время теория разрастания морского дна. Эта проблема оставалась одной из важнейших вплоть до конца 1960-х годов; ее решение было найдено только спустя несколько лет. Об этом пойдет речь в гл. 4, где будет показано, как шла разгадка контуров магнитных аномалий в районах мирового океана, не закрашенных на рис. 3-10 темно-серым цветом.

ПРОЕКТ ГЛУБОКОВОДНОГО БУРЕНИЯ

Даже очевидный успех гипотезы разрастания морского дна не остановил настойчивое стремление исследователей к сбору новых фактов. Поскольку ученые были не вполне удовлетворены магнитным методом определения возраста океанического дна (этот метод, хотя и очень логичный, основан на ряде гипотез, построенных одна на другой), они старались разработать для этой цели метод прямого отбора проб. *Проект глубоководного бурения*, работы по которому начаты Соединенными Штатами в

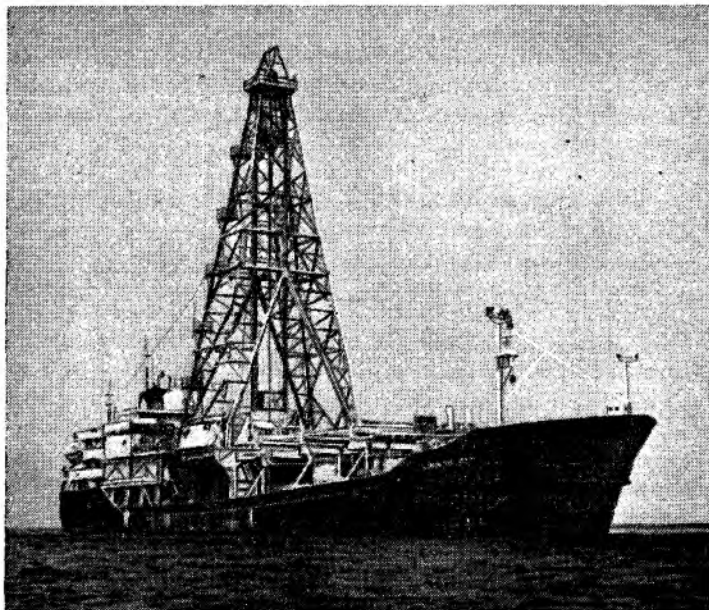


Рис. 3-11. Исследовательское судно «Гломар-Челленджер» (водоизмещением 10 500 т), выполняющее работы по Проекту глубоководного бурения.

1968 г., выполнил эту задачу. Работы были направлены на получение непосредственных данных о строении и истории океанического дна путем бурения скважин до пород фундамента и отбора образцов из всех слоев осадочных пород, покрывающих дно океана. Поскольку это требовало огромных затрат, которые были слишком велики для любой одной научной организации, был создан Консорциум (объединение) ведущих океанологических организаций. Это объединение, в которое вошли Скриппсовский океанографический институт, Геологическая обсерватория Ламонт-Догерти, Университет штата Вашингтон, Университет города Майами и Океанографический институт в городе Вудс-Хол, получило название JOIDES (Joint Oceanographic Institutions Deep Earth Sampling — Объединенное океанологическое предприятие по опробованию глубин Земли). Для того чтобы выполнить трудную задачу бурения скважин в морском дне, находящемся в нескольких тысячах метров от поверхности океана, ученые усовершенствовали методы бурения, использовавшиеся при нефтяной разведке шельфа, и построили новое судно для целей такого бурения — «Гломар-Челленджер»¹ (рис. 3-11). Это судно

¹ Название этого судна часто фигурирует в работах зарубежных и советских специалистов. Слово «челленджер» (challenger) означает «тот, кто бросает вызов», а слово «гломар» образовано из двух слов global и marine (всемирный и морской). — *Прим. перев.*

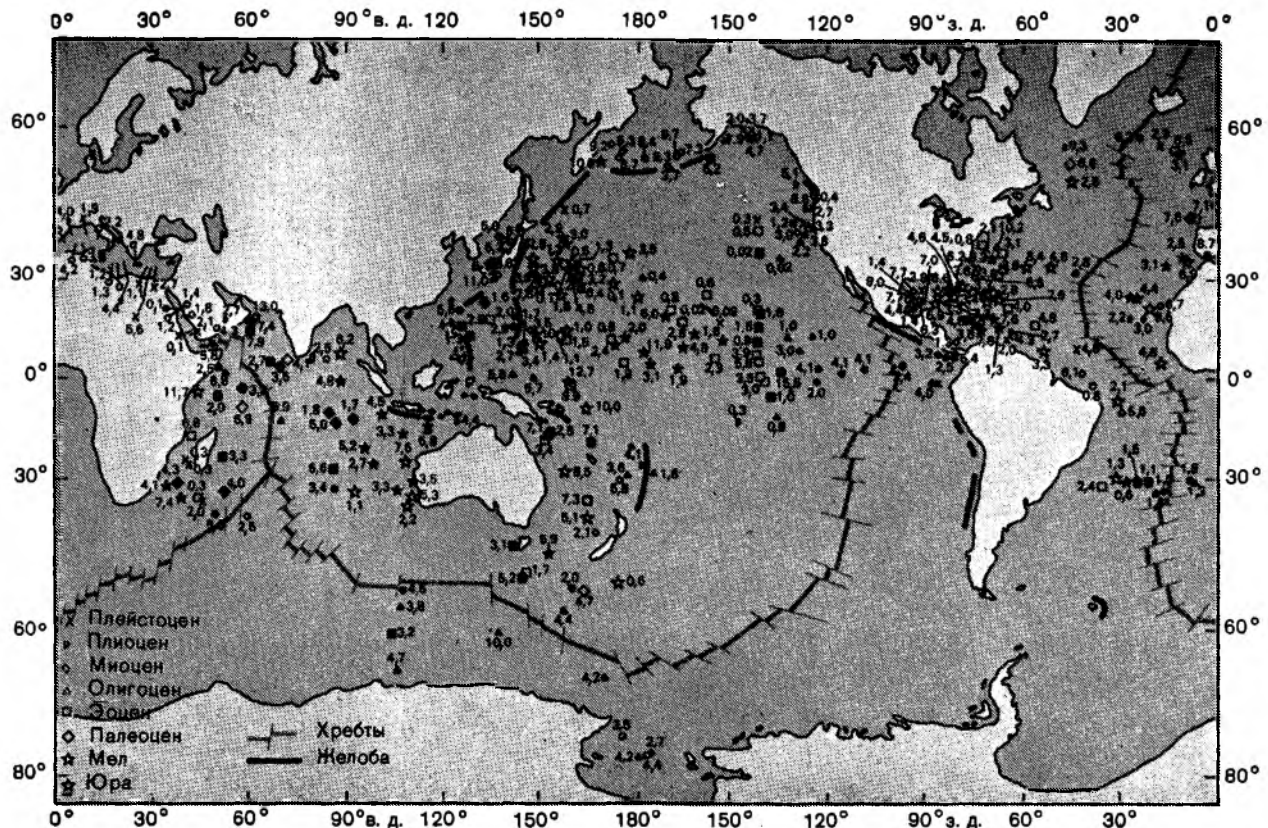


Рис. 3-12. Скважины, пробуренные по Проекту глубоководного бурения, профили I—XXXII (К. Koizumi, S. Uyeda, Earth science and Deep Sea Drilling Project, Kagaku, 44, 4, p. 203, 1974).

Указаны глубины скважин в сотнях метров. Условными значками показан возраст осадочных пород: эпоха или период; зачерненные значки обозначают скважины, достигшие базальтов.

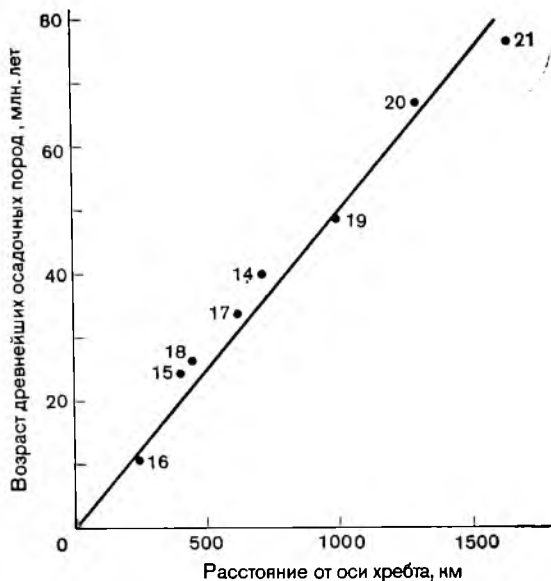


Рис. 3-13. Результаты работ по Проекту глубоководного бурения, профиль III, станции 14 — 21 (A. E. Maxwell, R. von Herzen, The Glomar Challenger completes Atlantic track — highlights of Leg III, Ocean Industry, 4, 5, p. 64, 1969). Профиль пройден через Срединно-Атлантический хребет приблизительно у 30° ю. ш. Для каждой станции указан возраст древнейших осадочных пород и расстояние от оси хребта; четко видна линейная зависимость между этими параметрами. По этой зависимости можно оценить постоянную скорость разрастания морского дна в 2 см/год для всего кайнозоя.

начиная с августа 1968 г. проводит буровые работы в Атлантическом, Тихом, Индийском океанах и вблизи Антарктиды. На рис. 3-12 показаны те места, где бурение было выполнено по состоянию на октябрь 1973 г. Каждый двухмесячный рейс этого судна включает один буровой профиль. Ко времени завершения Проекта глубоководного бурения в 1975 г. было выполнено 44 профиля.

Самым крупным успехом проекта в его начальной стадии были материалы, полученные с помощью судна «Гломар-Челленджер» по профилю III. Были пройдены скважины до базальтов, слагающих, как полагают, первоначальное вулканическое дно океана. Считается, что осадки, которые залегают непосредственно на базальтах, только немного моложе этих базальтов, причем возраст осадочных пород определялся по содержащимся в них окаменелостям. Оказалось, что этот возраст полностью соответствует тому, который был рассчитан по расстоянию от Срединно-Атлантического хребта (в соответствии с гипотезой разрастания морского дна), что показано на рис. 3-13. Возраст дна Тихого океана, определяемый по полосовым аномалиям, также

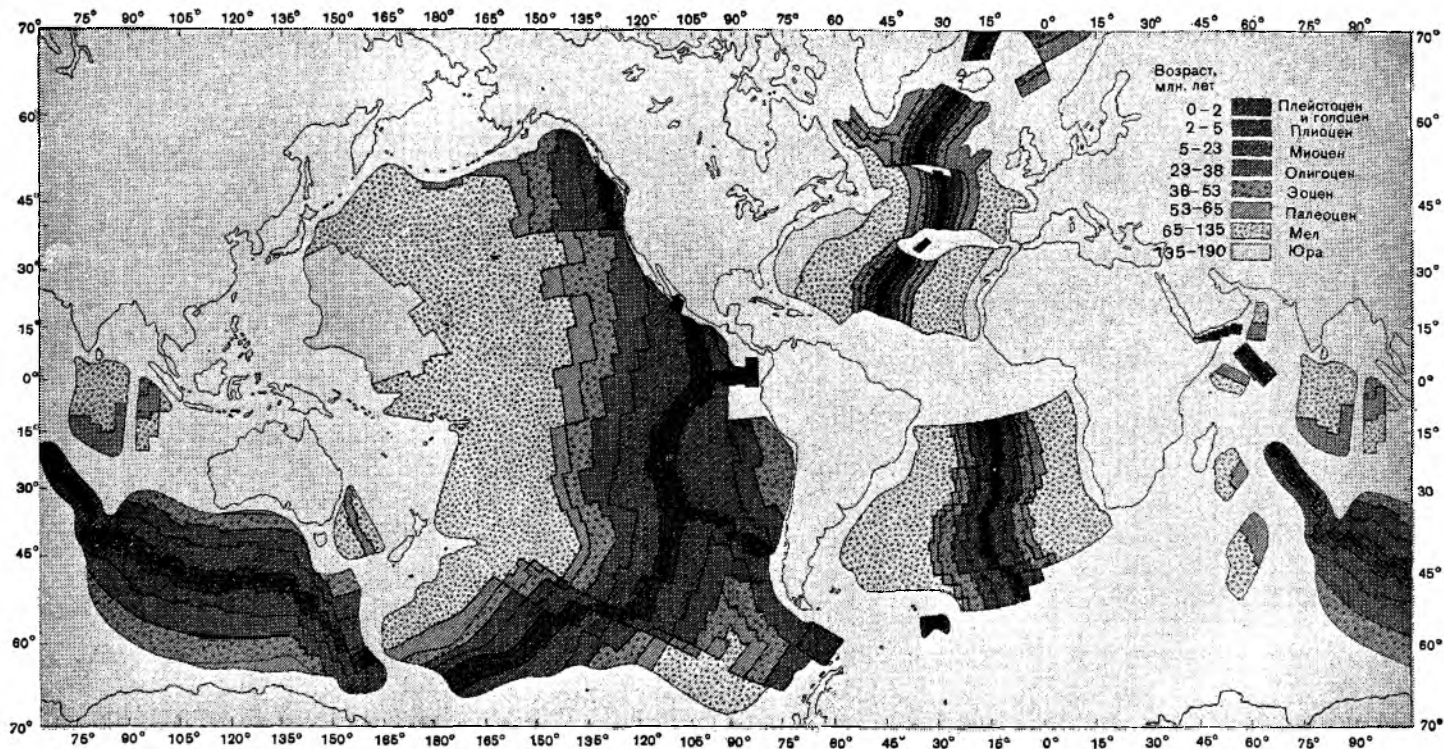


Рис. 3-14. Возраст океанов (W. C. Pitman III, R. L. Larson, E. M. Herron, Geological Society of America, 1974).

совпадает с данными, полученными в результате глубоководного бурения. Там, где возраст магнитных аномалий был неизвестен, необходимую информацию дали скважины, пробуренные в ключевых местах. Было подтверждено, что самое молодое дно Тихого океана — в его восточной части и, как показано на рис. 3-14, возраст в целом увеличивается к западу.

Не вдаваясь здесь в детали, отметим все же, что Проект глубоководного бурения дал огромное количество ценнейших сведений об истории океанов. Особенно важным с геофизической точки зрения было подтверждение того, что *второй* слой океанической коры, подстилающий осадочный слой, действительно сложен базальтами, по крайней мере в верхней части. Каков же состав более глубоких горизонтов второго слоя и каков состав *третьего* слоя? Хотя Проект глубоководного бурения прекратил свое существование в 1975 г., научный интерес к этим работам остался столь же сильным, и работы по океанскому бурению в настоящее время продолжают на международном уровне под названием IPOD (International Phase of Ocean Drilling — Международный этап океанского бурения). Таким образом, буровые работы ведутся по-прежнему очень активно; их цель — изучить происхождение и развитие океанического дна. Объединение JOIDES включает теперь научные организации СССР, ФРГ, Франции, Японии и Великобритании, а также несколько американских институтов. Человеческое стремление к знаниям безгранично.

ТАЙНЫ ДНА ТИХОГО ОКЕАНА

Рис. 3-15 представляет собой часть карты магнитных аномалий для акватории, окружающей Японские острова; наша группа подготовила эту карту в 1966 г. Отчетливый полосчатый рисунок легко распознается на площадях к востоку от островной дуги; полосы протягиваются там с северо-востока на юго-запад. Вначале мы считали, что эти полосовые аномалии древнейшие в Тихом океане: зародившись в пределах Восточно-Тихоокеанского поднятия, они прошли через весь огромный океан и должны будут погрузиться под Курильский желоб. Из такого рассуждения следовало, что возраст полос должен неуклонно увеличиваться к северу.

Такое простое предположение натолкнулось, однако, на противоречащие факты, когда американские ученые расширили площадь магнитных съемок в восточной части Тихого океана к северу, в район, примыкающий к побережью Канады, заливу Аляска и к Алеутским островам. Полосовые аномалии, которые в южных районах восточной части Тихого океана протягиваются почти меридионально, в районе Аляски поворачивают почти под прямым углом и становятся широтными (рис. 3-10). В северо-восточной части Тихого океана возраст магнитных аномалий умень-

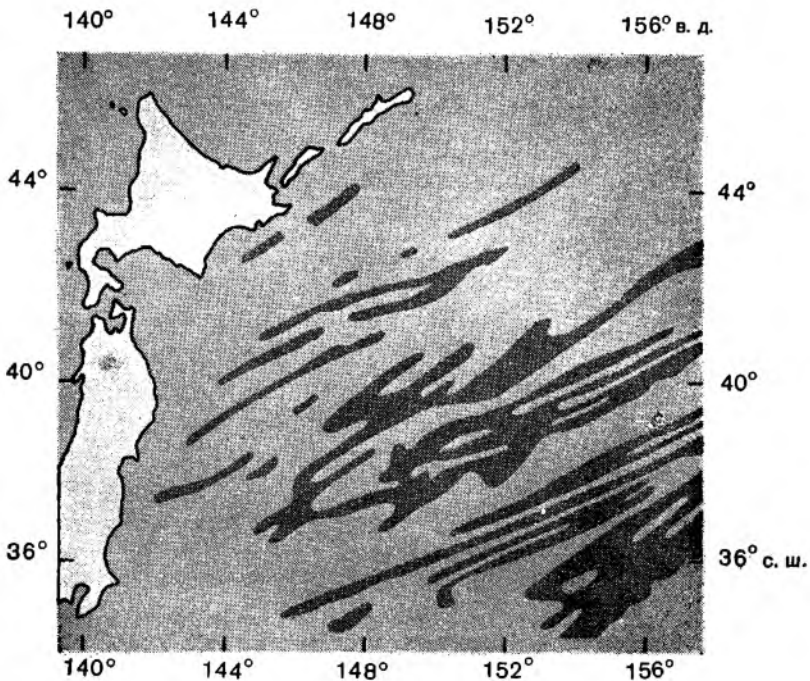


Рис. 3-15. Аномалии полного вектора напряженности магнитного поля в северо-западной части Тихого океана (S. Uyeda et al., Results of geomagnetic survey during the cruise of R/V Argo in Western Pacific 1966 and the compilation of magnetic charts of the same area, Bull. Earthquake Res. Inst., 45, p. 799, 1967).

Темно-серым показаны области положительных аномалий, светлым — области отрицательных аномалий.

шается в восточном направлении; это доказывает, что на данной площади, к востоку от магнитных полос, когда-то существовал хребет, формировавший океаническое дно. Если мы проследим эти полосовые аномалии на север и дальше, после их изгиба, в район, где они простираются с востока на запад (у побережья Аляски и вблизи Алеутских островов), то не вызовет удивления то обстоятельство, что возраст аномалий будет увеличиваться к югу и уменьшаться к северу.

Однако такой вывод принять трудно, так как к северу лежит Алеутский желоб, в котором, как полагают, морское дно погружается. Согласно гипотезе разрастания морского дна, чем ближе дно океана оказывается к желобу, тем оно должно быть древнее, а не моложе. Следовательно, не должны ли быть магнитные полосы моложе к югу и древнее к северу, где находится Алеутский желоб? Магнитные полосы широтного простираения, отмечаемые южнее Алеутских островов, продолжают на запад и почти соединяются с полосовыми аномалиями западной части

Тихого океана, прослеженными у берегов Японии. Если линейная система Японских и Алеутских островов непрерывна, то проблема, касающаяся Алеутского района, относится и к району Японии. Однако невероятным казалось и то, что магнитные аномалии, образующие такую непрерывную картину на всей остальной площади океанического дна, могут вдруг резко оборваться между Алеутами и Японией (рис. 3-10). Таким образом, не одна тайна полосовых аномалий северной части Тихого океана еще ждала своей разгадки.

Северный район Тихого океана был, однако, не единственным районом, где возникали вопросы, на которые не было ответа: «белые пятна» на рис. 3-10 свидетельствуют о том, что к 1968 г. не была еще изучена также западная часть Тихого океана и не был известен ее возраст. Запад Тихого океана характерен изобилием плосковерхих подводных гор (называемых *гайотами*) и коралловых рифов (см. рис. 2-2). Поэтому данный район сильно отличается по физико-географическим особенностям морского дна от восточной части Тихого океана. В связи с этим возникает вопрос, могли ли образоваться эти две части океана в результате одного и того же процесса разрастания морского дна в районе Восточно-Тихоокеанского поднятия? Некоторые ученые утверждают, что на западе Тихого океана, в том районе, где теперь находятся подводные горы, когда-то существовало обширное океаническое поднятие. Хесс и Менард, например, назвали эту гипотетическую структуру поднятием Дарвина. Если же такое поднятие раньше существовало, оно должно было в дальнейшем испытать крупное опускание на этой площади. Однако работы по Проекту глубоководного бурения породили серьезные сомнения на этот счет.

Таким образом, гипотеза разрастания морского дна была подтверждена в 1960-х годах наблюдениями, проводившимися в центрах такого разрастания — в районах океанических хребтов. Но морское дно в удаленных от хребтов районах, вблизи желобов, например на западе Тихого океана, содержало еще ряд загадок. В следующих главах, после ознакомления с концепцией тектоники плит, мы вернемся к этим вопросам.

ТЕКТОНИКА ПЛИТ

ПЛИТА: НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ

Как только гипотеза разрастания морского дна начала доказывать свою жизнеспособность, она привлекла к себе почти всеобщее внимание. Геофизики стали встречать друг друга вопросом: «Вы верите в разрастание морского дна?» И, не задумываясь, отвечали: «Да». В 1967—1968 гг. эта гипотеза обсуждалась на геофизических конференциях, проводившихся во всем мире. Были написаны сотни статей и докладов, в большинстве которых авторы пытались показать, как хорошо гипотеза разрастания морского дна объясняет явление, изучавшееся тем или иным специалистом. Среди стран, активно занимающихся науками о твердой Земле, только СССР и Япония, по-видимому, сохраняли в целом скептическое отношение к этой гипотезе. В большинстве других стран она приобрела исключительную популярность. Когда же была с энтузиазмом принята гипотеза трансформных разломов, многим ученым не терпелось скорее исследовать все другие логические следствия гипотезы разрастания морского дна.

Давайте вновь проанализируем картину размещения эпицентров землетрясений, показанную на рис. 2-4 и 3-10. Ясно, что землетрясения происходят главным образом вдоль океанических хребтов, трансформных разломов и островных дуг, а также в орогенических поясах, таких, как Анды или Альпийско-Гималайская зона. В противоположность этому на обширных площадях между сейсмическими поясами очаги землетрясений встречаются редко. Считается, что землетрясения возникают по разрывам, подвижки по которым происходят в результате накопления напряжений, поэтому в тех областях, где землетрясений нет, либо напряжения не накапливаются, либо разломы там не возникают даже при наличии напряжений. Известно, что горные породы при высоких температурах и давлениях обычно теряют хрупкость и размягчаются, однако едва ли концентрация землетрясений в узких поясах связана с тем, что эти пояса холодные и хрупкие, тогда как остальная часть коры теплая и податливая. Более правдоподобно другое объяснение: зоны эпицентров делят поверхность

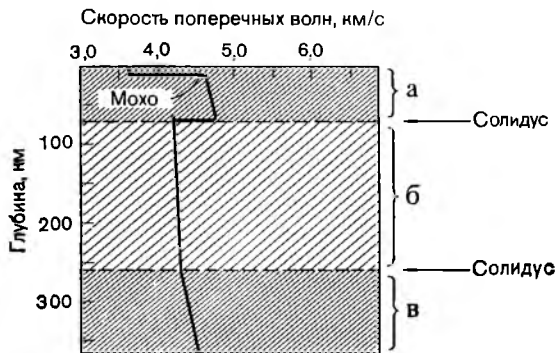


Рис. 4-1. Современный взгляд на строение внешней оболочки Земли, выраженный зависимостью скорости поперечных волн от глубины [41].

Обратите внимание на изменение скорости на глубине 70 км — на границе между литосферой и частично расплавленной астеносферой.

а — литосферная плита: твердая, прочная, высокоскоростная; *б* — астеносфера: частично (на 1—10%) расплавленная, мягкая, низкоскоростная, источник базальтовой магмы; *в* — твердое вещество.

Земли на прочные и довольно жесткие блоки, которые движутся друг относительно друга, что вызывает землетрясения на их краях; в то же время внутреннее строение этих блоков остается нетронутым.

Было выдвинуто предположение, что поверхностная оболочка Земли обладает большой жесткостью до глубины около 70 км, а ниже залегает более мягкий слой. Этот вывод был результатом чрезвычайно сложного исследования по распространению сейсмических волн, проведенного в 1960-х годах. Ф. Пресс на пути к своему открытию обобщил всю имевшуюся информацию об изменениях скорости поперечных сейсмических волн, отмечаемых на различных глубинах. Эти изменения скорости показаны на рис. 4-1. Для разработки своей модели Земли (на рис. 4-1 показана только самая верхняя ее часть) Пресс использовал метод, называемый методом Монте-Карло, в котором с помощью быстродействующих электронно-вычислительных машин подбираются — путем случайных испытаний — модели, удовлетворяющие различным геофизическим наблюдениям. В модели, показанной на рис. 4-1, скорость поперечных волн на очень небольшой глубине, соответствующей разделу Мохоровичича, подскакивает от 3,6 до 4,6 км/с. Затем скорость непрерывно растет до глубины около 70 км, где она внезапно падает примерно до 4,2 км/с. Дальше, по мере углубления в мантию, скорость опять постепенно возрастает. При нормальных условиях скорость волн с повышением давления должна увеличиваться; следовательно, на глубине 70 км, вероятно, происходит что-то необычное. Д. Андерсон и другие исследователи убедительно объяснили уменьшение скорости на этой глубине частичным плавлением вещества мантии.

Мантийный материал — это смесь различных силикатов, обладающих исключительно сложными свойствами плавления — настолько сложными, что петрологи только теперь, после огромного объема исследований, начинают понимать их. Мы хорошо знаем, однако, что мантия не плавится полностью при какой-то одной температуре, как это происходит, допустим, со льдом. Плавление мантии происходит в определенном интервале температур. В начале этого процесса плавится только малая доля материала. Это явление частичного плавления приводит к снижению скорости сейсмических волн, особенно поперечных. Температура, при которой начинается плавление, называется *температурой солидуса*. Из сейсмических данных легко устанавливается, что частичное плавление размягчает мантию на глубинах от 70 до 260 км. Кровля размягченного слоя, называемого *астеносферой*, находится на глубине около 70 км, под жестким внешним слоем *литосферы*.

Обобщив эти сведения, можно описать внешнюю оболочку Земли как жесткую литосферу, которая состоит из нескольких пластин, или плит, и покрывает лежащую ниже мягкую астеносферу. Дрейф материков и разрастание морского дна затем можно представить себе как движение этих жестких плит. Кроме того, взаимодействие этих плит служит, возможно, причиной не только землетрясений, но и многих других важных явлений на поверхности Земли, таких, как вулканическая деятельность, образование глубоководных желобов и океанических хребтов.

Эта концепция, ставшая известной как теория *тектоники плит*, была выдвинута в 1967 г. Д. Мак-Кензи и Р. Паркером [34] и независимо от них в 1968 г. У. Дж. Морганом [37]. Одним из первых ученых, понявших важность этой теории, был Кс. Ле Пшон — французский океанолог, сотрудник Геологической обсерватории Ламонт-Догерти. Он немедленно решил применить эту теорию к изучению относительных движений большинства крупных плит. Рассмотрим теперь те замечательно простые, но тем не менее глубокие идеи, которые были развиты этими молодыми учеными.

ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗЫ

Плиты внешней оболочки Земли разделяются границами трех главных типов, как это ясно видно на рис. 4-2. Один тип представляет собой границу, которая образуется, когда две плиты расходятся одна от другой. Обычно такая граница проходит вдоль срединно-океанического хребта, где образуются новые плиты. Эту границу называют *границей нарастания* (аккреции) или *границей раздвижения* (дивергенции). Другой тип возникает, когда две плиты движутся навстречу друг другу. Такую границу называют *границей схождения* (конвергенции). Вдоль границ этого типа проходят океанические желоба и некоторые

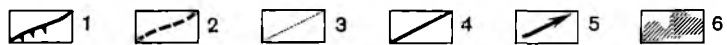
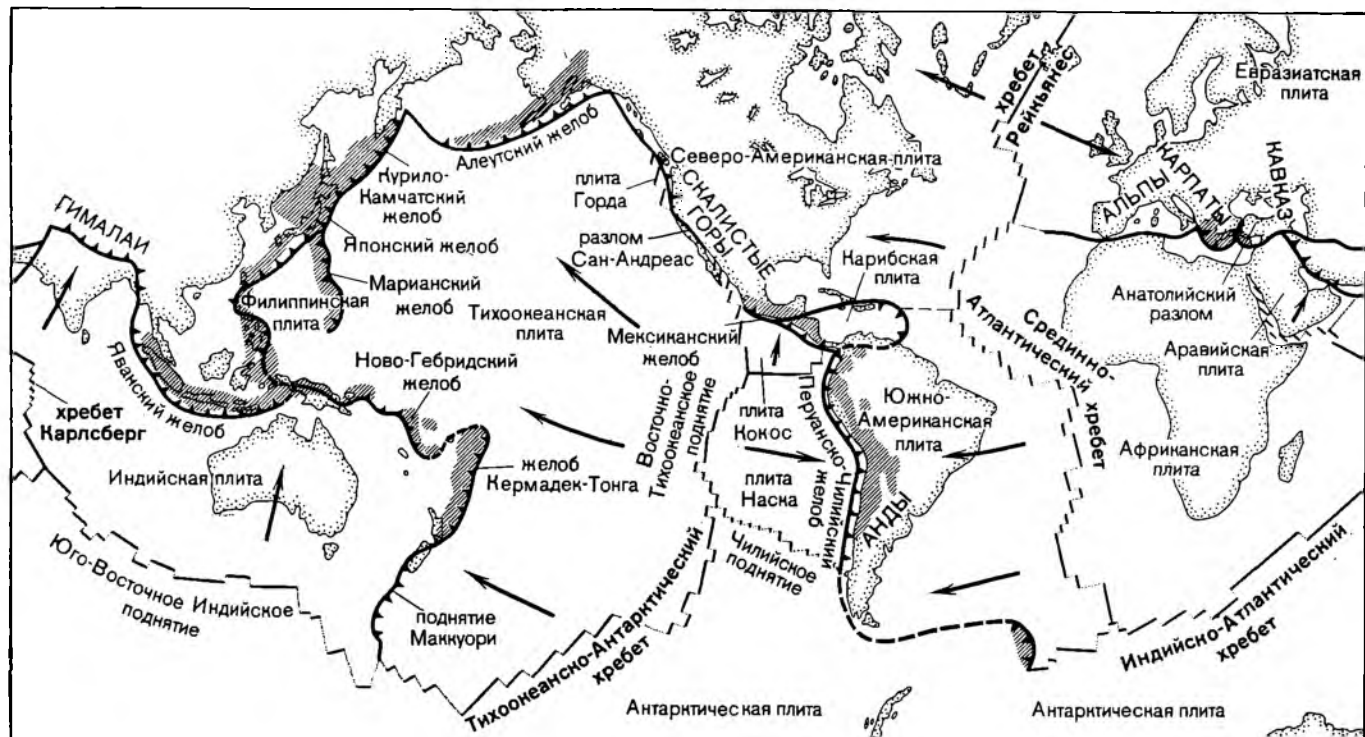


Рис. 4-2. Литосфера Земли разбита на крупные жесткие плиты, каждая из которых движется как единое целое [12]. Движение плит в предположении, что Африканская плита неподвижна, показано стрелками. Границы плит выделяются поясами землетрясений. Плиты расходятся от осей срединно-океанических хребтов, проскальзывают одна около другой вдоль трансформных разломов и сталкиваются между собой в зонах субдукции.

1 — зоны субдукции; 2 — границы плит, проводимые неуверенно; 3 — трансформные разломы; 4 — оси хребтов; 5 — направление движения плит; 6 — области глубокофокусных землетрясений.

горные хребты, например Гималаи. Предполагается, что в районах желобов океанические плиты погружаются (испытывают *субдукцию*), уходят внутрь Земли, тогда как в Гималаях происходит столкновение двух континентальных плит. Границы, вдоль которых располагаются желоба, называются также *границами поглощения*. Границы третьего типа проходят вдоль трансформных разломов; относительное движение плит в этом случае параллельно границам.

Рассмотрим теперь две жесткие плиты A и B , покрывающие всю поверхность земного шара, как это показано на рис. 4-3, a ; с одной стороны они разделены океаническими хребтами и трансформными разломами, а с другой — океаническими желобами и также трансформными разломами. Единственное геометрически возможное направление движения жестких плит — параллельно трансформным разломам. Такое движение можно описать как вращение вокруг некоторого полюса $A P_B$. Трансформные разломы, показывающие направление относительного движения плит (в нашем примере плит A и B), лежат на параллелях, которые можно провести вокруг полюса $A P_B$. Хребты, обычно идущие под прямым углом к трансформным разломам, лежат, таким образом, на кругах-меридианах, проведенных через этот полюс. Поскольку большинство желобов простираются не перпендикулярно трансформным разломам, они не совпадают с меридианами. Если теперь мы построим карту в проекции Меркатора относительно полюса $A P_B$, то на этой карте все трансформные разломы, идущие между плитами A и B , займут широтное положение, а хребты — меридиональное, как показано на фиг. 4-3, b . Направление относительного движения двух плит можно установить и по первым вступлениям сейсмических волн от землетрясений, возникающих на границе между плитами. Направление подвижки в очаге землетрясения должно быть параллельно линиям широты (по той же причине, что и в случае трансформных разломов), как это показано на фиг. 4-3, b стрелками.

Д. Мак-Кензи и Р. Паркер [34] исследовали механизмы очагов землетрясений, возникающих на границе Тихоокеанской плиты, имея в виду следующее: если землетрясения действительно вызываются взаимодействием жестких плит, то анализ механизмов землетрясений, которые возникают вдоль желобов, трансформных разломов и хребтов, обрамляющих Тихоокеанскую плиту, должен во всех случаях показывать одно и то же направление движения этой плиты по отношению к соседним. Они установили, что это действительно так и что полюс, характеризующий движение Тихоокеанской плиты относительно Северо-Американской, находится в точке с координатами 50° с. ш., 85° з. д. (рис. 4-4). Положение этого полюса вращения плит Мак-Кензи и Паркер определили исходя из направления разлома Сан-Андреас (трансформного разлома) и среднего направления подвижек при афтершоках в районе острова Кадьяк после сильнейшего Аляскин-

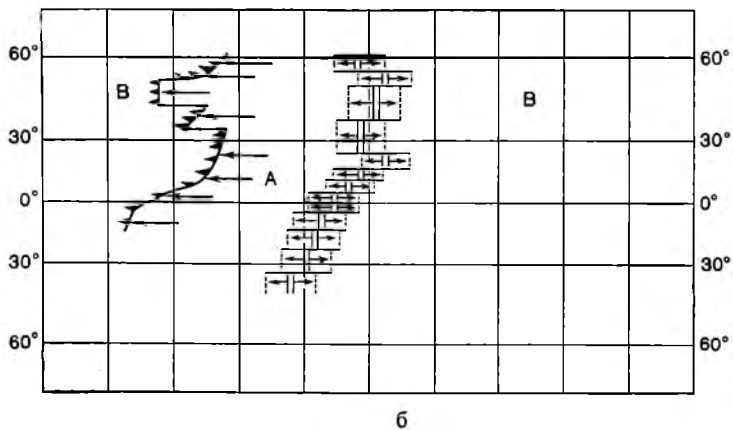
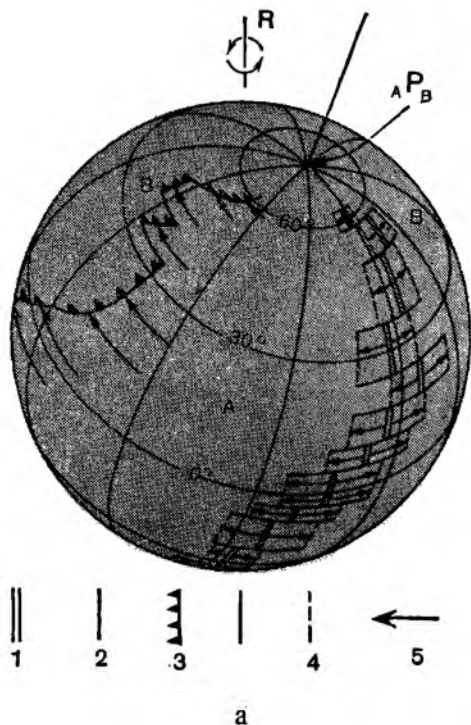


Рис. 4-3.

а. Вращение жестких плит на поверхности сферы. В правой части диаграммы показан раздвигающийся хребет с трансформными разломами; в левой части — граница плит, образованная желобами и трансформными разломами. Полус относительного вращения плит A и B , обозначенный символом $A P_B$, не следует путать с полюсом вращения Земли R . Стрелки показывают как направление, так и величину скорости относительного движения. Видно, что скорость разрастания, обозначенная длиной стрелок, больше в низких широтах, а направление относительного движения параллельно трансформным разломам.

б. Та же карта мира, что и на диаграмме *а*, в проекции Меркатора относительно полюса $A P_B$. Видно, что все трансформные разломы и векторы относительного движения параллельны на такой карте линиям широт, а хребты и оси магнитных аномалий параллельны меридианам. Ширина магнитных аномалий и длина стрелок в этой проекции не зависят от широты.

1 — хребты; 2 — трансформные разломы; 3 — желоба; 4 — оси магнитных аномалий; 5 — векторы относительного движения.

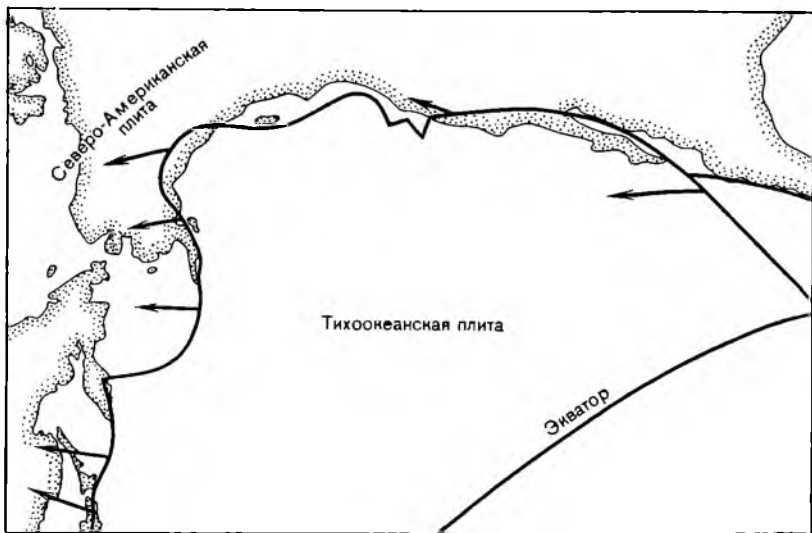


Рис. 4-4. Карта в проекции Меркатора для Тихого океана относительно полюса, находящегося в точке 50° с. ш., 85° з. д. [34].

Стрелки показывают направление движения Тихоокеанской плиты относительно Северо-Американской. Если обе плиты жесткие, то все векторы относительного движения должны быть параллельны друг другу и верхней и нижней рамкам диаграммы (которые параллельны линиям широт).

ского землетрясения 1964 г. (Если гипотеза о плитах верна, то полюс должен располагаться на пересечении больших кругов, проведенных перпендикулярно этим двум направлениям.)

В это же время У. Дж. Морган детально проанализировал данные о ширине полосовых магнитных аномалий и о направлении трансформных разломов. Давайте снова обратимся к рис. 4-3, а. Если гипотеза о жестких плитах верна, то легко видеть (приняв условие, что единственное возможное направление движения плит — это направление, параллельное трансформным разломам), что скорость относительного движения двух плит, или, иными словами, скорость разрастания и субдукции морского дна, показанная длиной стрелок на рис. 4-3, а, должна возрастать с удалением от полюса AP_B . Можно показать, что в этом случае скорость движения должна быть пропорциональна косинусу угла широты. Следовательно, относительное движение плит у полюса AP_B будет равно нулю, а максимальная скорость разрастания будет на расстоянии 90° от этого полюса. Согласно представлениям о разрастании морского дна и гипотезе Вайна — Мэтьюза — Морли, скорость разрастания можно определить по ширине полосовых магнитных аномалий. Таким образом, положение полюса вращения двух плит теоретически можно установить по изменению ширины магнитных полос. Другими словами,

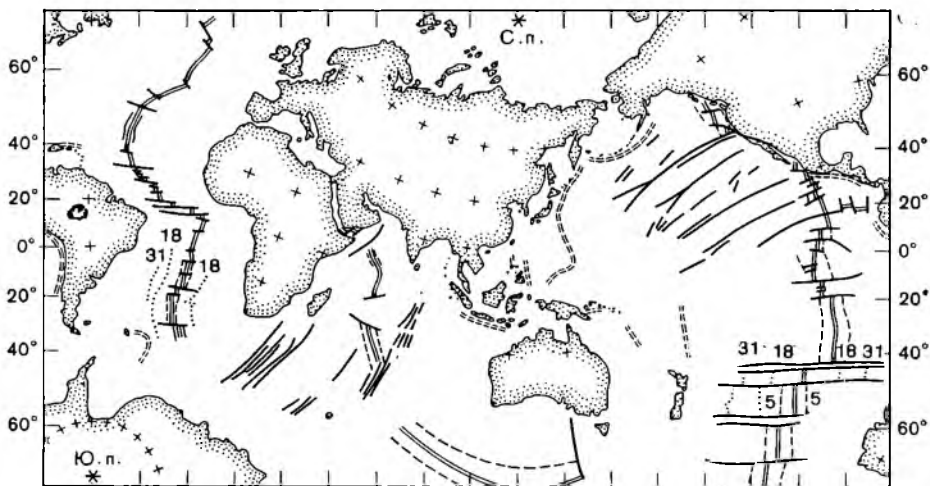


Рис. 4-5. Карта мира в проекции Меркатора, построенная относительно полюса вращения плит в юго-восточной части Тихого океана [31].

Цифрами обозначены номера магнитных аномалий. Аномалии 5, 18 и 31 соответствуют возрасту 10, 45 и 70 млн. лет. С. и. — Северный полюс; Ю. п. — Южный полюс.

положение полюса оценивается двумя независимыми способами: по данным о направлениях трансформных разломов или о первых вступлениях сейсмических волн и по изменению ширины полосовых магнитных аномалий. Если полюс вращения определен правильно, то полосовые аномалии должны выглядеть так, как это показано штриховыми линиями на рис. 4-3, а. Они параллельны линиям меридианов и сужаются по направлению к полюсу APB , поскольку скорость разрастания (обозначенная длиной стрелок) уменьшается к этому полюсу. Если же все эти магнитные полосы изобразить, как это сделано на рис. 4-3, б, в проекции Меркатора, то они становятся параллельными между собой и будут иметь постоянную ширину, поскольку в этом случае круги меридианов (пересекающиеся на рис. 4-3, а в точке APB) превращаются в параллельные линии, идущие с севера на юг (рис. 4-3, б). Длина стрелок также становится всюду одинаковой.

Эти соотношения, свойственные проекции Меркатора, можно использовать для того, чтобы проверить истинность представлений тектоники плит графически, как это сделано на рис. 4-5, где показана карта мира в проекции Меркатора, построенная относительно одного из полюсов вращения плит. Положение этого полюса было определено по распределению скоростей разрастания морского дна (т. е. по ширине полосовых магнитных аномалий) в районе Восточно-Тихоокеанского поднятия. На рис. 4-5 все трансформные разломы Восточно-Тихоокеанского поднятия действительно лежат на параллелях. Это показывает, что если бы

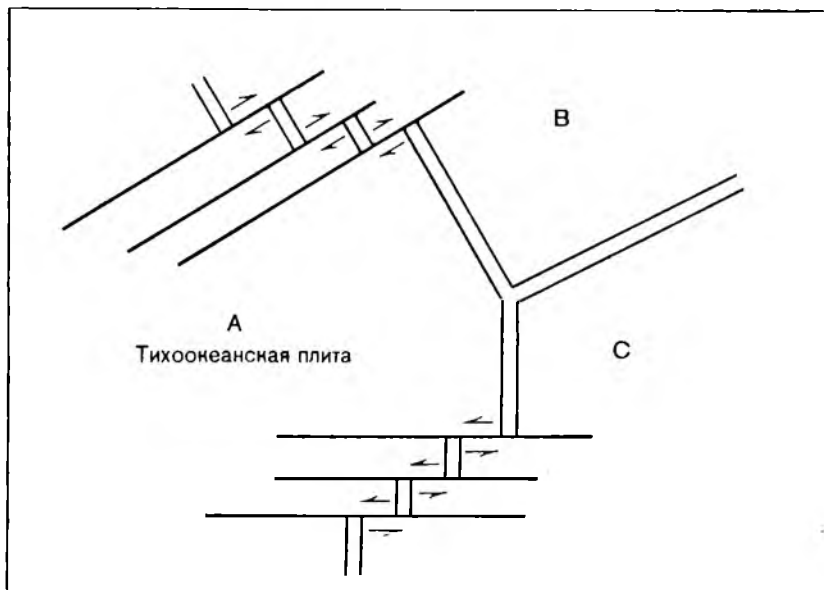


Рис. 4-6. Схема, объясняющая существование непараллельных трансформных разломов в случае, когда одна плита (А) граничит с двумя (В и С) или несколькими плитами.

полюс был определен по данным о направлениях трансформных разломов, он совпал бы с полюсом, определенным по скоростям разрастания морского дна. Таким образом, теперь можно почти с полной уверенностью считать, что Тихоокеанская плита и плита, расположенная к востоку от Восточно-Тихоокеанского поднятия (Антарктическая), испытывали относительное вращение вокруг этого полюса по меньшей мере с того времени (70 млн. лет назад), когда образовались полосы магнитных аномалий, использованные для анализа. Эти открытия еще до их опубликования (около 1967 г.) стали широко известны ученым, занимающимися науками о Земле, и явились предметом оживленных дебатов. Теперь ученые встречали друг друга вопросом: «Верите ли вы в тектонику плит?».

Любопытно отметить, что на рис. 4-5 многие из разломов в северной части карты (Менард называет их «окаменевшими разломами») проходят не в широтном направлении, а под углом около 30° . Не значит ли это, что в давние времена относительное вращательное движение северо-восточной части Тихого океана, запечатленное в этих разломах, было не таким, как для плит на юге Тихого океана? Некоторых ученых это ставило в тупик. Однако такое расхождение не кажется столь загадочным, если мы вспомним, что движения, определяемые с помощью изложенных

методов, — это только относительные смещения двух соседних плит. Например, рассуждая о движениях по разлому Сан-Андреас, правильнее было бы говорить: «Тихоокеанская плита движется на северо-запад относительно Северо-Американской плиты» либо «Северо-Американская плита движется на юго-восток относительно Тихоокеанской». По направлению разлома можно судить, в какую сторону плиты движутся друг относительно друга, но нельзя сказать, что одна плита движется, а другая стоит неподвижно. Следовательно, плита может оставаться жесткой, но иметь при этом непараллельные системы трансформных разломов, когда она граничит с разными плитами (рис. 4-6). Раньше северная и южная части Тихоокеанской плиты действительно контактировали с различными плитами, и трансформные разломы, проходившие вдоль двух ее границ, имели различное направление. Плита, отделяемая северной частью Восточно-Тихоокеанского поднятия, совсем не та же, что на юге; северная плита была поглощена в процессе субдукции и исчезла около 30 млн. лет назад, когда соответствующая часть Восточно-Тихоокеанского поднятия столкнулась с Северо-Американской плитой. Эта интересная история будет рассказана в следующих разделах данной главы.

МИГРАЦИЯ ОКЕАНИЧЕСКИХ ХРЕБТОВ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА

Вспомним, как резко изменяют направление в заливе Аляска полосовые магнитные аномалии восточной части Тихого океана (рис. 3-10). Этот изгиб был обнаружен американским ученым Г. Питером и его сотрудниками в 1966—1967 гг. и назван «Великим изгибом магнитных аномалий». Они расширили площадь съемки на запад и проследили оси аномалий, идущих в широтном направлении вплоть до Императорских подводных гор (у западного окончания Алеутских островов). Поскольку широтные магнитные аномалии, проходящие южнее Алеутских островов, являются продолжением аномалий юго-восточной части Тихого океана, они должны становиться моложе по мере приближения к Алеутскому желобу. Как мы подчеркивали в конце предыдущей главы, эта картина, казалось бы, способна поколебать самую основу теории разрастания морского дна — постулат о том, что новое морское дно образуется в хребтах и расползается по направлению к желобам.

Частично эта дилемма была разрешена в 1966 г. Вайном, который провел анализ полосовых аномалий у берегов штатов Калифорния, Орегон и Вашингтон. Там полосы оказались моложе в восточном направлении, опять же по мере приближения к какому-то древнему желобу, который уже прекратил свое развитие. Вайн рассудил, что когда-то у берегов Калифорнии существовал океанический хребет, родственник Восточно-Тихоокеанско-

му поднятию, и он отделялся от континента желобом. Хребет постепенно приближался к желобу, пока они наконец не встретились и взаимно не уничтожились. Литосфера, сформировавшаяся на восточной стороне поднятия, погрузилась под Северную Америку. На том участке литосферы, который находится к западу от древнего хребта, возраст магнитных полос уменьшается в восточном направлении. Причина этого, по объяснению Вайна, состоит в том, что первоначально магнитные аномалии становились моложе в направлении к хребту в соответствии с теорией разрастания морского дна; теперь, однако, этот хребет исчез в древнем желобе.

Следуя за Вайном, У. Питман и Д. Хейс предложили на первый взгляд странное, но правдоподобное объяснение загадки полосовых аномалий к югу от Алеутских островов (рис. 4-7). Они утверждали, что в конце мелового периода (около 75 млн. лет назад) в северо-восточной части Тихого океана существовали три активных океанических хребта, расходившихся из одной точки (рис. 4-7, а). Разрастание морского дна происходило от гребня каждого из этих хребтов. (На рис. 4-7 желоба показаны только для целей сравнения: точное их положение неизвестно). Чтобы понять, какой процесс развивался при одновременном формировании трех плит в трех океанических хребтах, предположим, что плита I, соответствующая впадине Тихого океана, неподвижна. Это вполне законно, и в этом случае все движения рассматриваются относительно плиты I. Поскольку каждая плита росла от гребня хребта, а плиту I мы считаем неподвижной, плиты II и IV должны были отодвигаться от плиты I соответственно на север и на восток. Одновременно хребет, разделявший плиты I и II смещался к северу, а хребет между плитами I и IV — к востоку, при этом к плите I прибавлялся новый участок океанического дна (рис. 4-7, б). В конце концов хребет, разделявший плиты I и II, исчез в Алеутском желобе (рис. 4-7, в), а хребет между плитами I и IV погрузился под Американский континент, оставив позади себя магнитные полосы, которые оказываются моложе в северном и восточном направлениях (рис. 4-7, г) в согласии с интерпретацией, данной Вайном для южного района. Такое объяснение, изящное и остроумное с точки зрения геометрии, но требующее, чтобы океанические хребты погружались в желоба, казалось несколько натянутым. Может ли восходящая ветвь конвекционной ячейки потонуть в нисходящей ветви? Этот тезис подвергался неустойчивой критике со стороны противников гипотезы разрастания морского дна. Мы вернемся к этому вопросу позже.

Сама идея о том, что океанический хребет может перемещаться, привлекает острый интерес. Предположение об этом, возникшее на основании некоторых наблюдений, высказывалось уже давно. Как показано на рис. 4-2, Африканский материк с трех сторон окружен океаническими хребтами. Материк Антарктиды находится в еще более полном кольце раздвигающихся

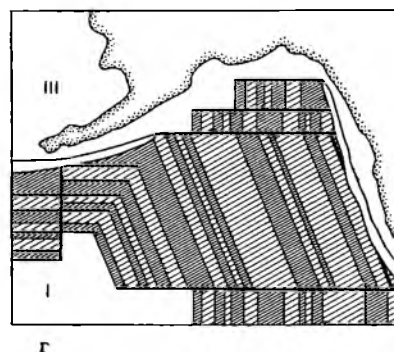
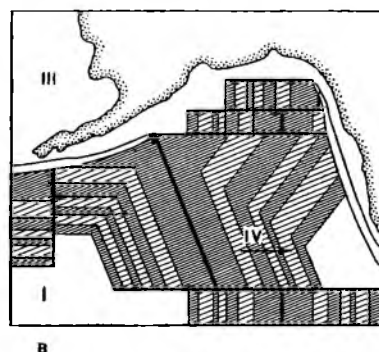
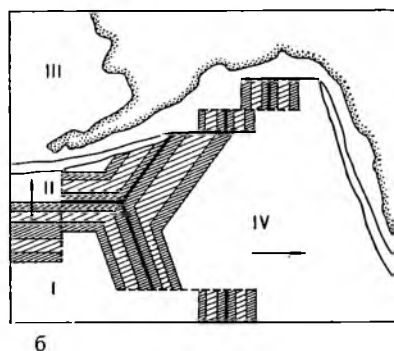
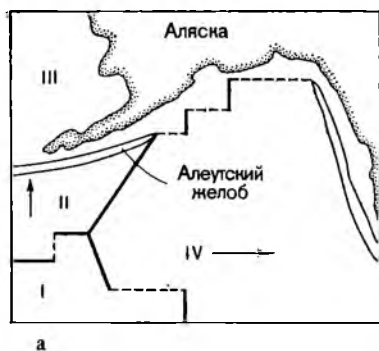


Рис. 4-7. Схемы четырех стадий развития полосовых магнитных аномалий северо-восточного района Тихого океана (W. C. Pitman, D. E. Hayes, Sea-floor spreading in the Gulf of Alaska, J. Geophys. Res., 73, p. 6571, 1968). Стрелками показано направление движения плит относительно плиты I (Тихоокеанской). а — поздний мел (около 75 млн. лет назад); б — поздний мел (около 70 млн. лет назад); в — ранний палеоцено (около 60 млн. лет назад); г — ранний плиоцен (около 6 млн. лет назад).

хребтов. При таких условиях геометрически невозможно, чтобы новое морское дно образовывалось во всех этих хребтах и разрасталось по направлению к континентам, если, конечно, вдоль их побережья нет желобов, в которых происходит поглощение океанического дна по мере его разрастания. Никаких желобов по краям этих материков *нет*. Следовательно, океанические хребты, окружающие Африку и Антарктиду, *должны* отодвигаться дальше от этих материков, так как хребты производят новые и новые полосы морского дна.

Интересным следствием тектоники плит является то, что геометрически необходимо, чтобы существовали точки, в которых сходятся три плиты. Такие точки были названы Д. Мак-Кензи и

У. Морганом [35] *тройными сочленениями*. В зависимости от характера сходящихся границ эти сочленения могут быть различного типа. Примером схождения трех хребтов служит тройное сочленение в заливе Аляска (рис. 4-7). Этот тип сочленения можно обозначить как Х-Х-Х (Х — хребет). Различные сочетания хребтов (Х), желобов (Ж) и трансформных разломов (Р) могут дать такие тройные сочленения, как, например, Ж-Ж-Ж, Р-Р-Р, Х-Ж-Р и т. д.

В своей важной статье о теории тройных сочленений [35], опубликованной в 1969 г., Мак-Кензи и Морган показали, что путем простых геометрических построений можно установить, что одни типы тройного сочленения устойчивы, а другие — нет; тройное сочленение устойчиво, когда одна и та же конфигурация плит может сохраняться длительное время. Кроме того, Мак-Кензи и Морган определили, при каких условиях скорости всех плит сочетаются так, что образуется устойчивое тройное сочленение. Они указали, что даже при неизменном характере движения каждой плиты эволюция тройного сочленения может привести к изменению природы (типа) границ между плитами. Такое изменение, по их предположению, может с течением времени стать одной из важных причин тектонической перестройки. Ярким примером воплощения этой гипотезы служит, как будет показано в следующем разделе, тектоническая история западных районов Северной Америки.

ОКЕАНИЧЕСКИЙ ХРЕБЕТ, СТОЛКНУВШИЙСЯ С МАТЕРИКОМ СЕВЕРНОЙ АМЕРИКИ

Рассмотрим рис. 4-8. Самые активные на Земле зоны землетрясений и вулканической деятельности находятся в области, известной как *Кольцевой тихоокеанский (Циркумтихоокеанский) орогенический пояс*. В числе этих зон: Алеутские острова на севере, затем Курилы, Японские острова, Идзу-Бонинские (Нампо) и Марианские острова, далее Рюкю, Филиппины, Новая Гвинея, а на юге острова Тонга и Кермадек и Новая Зеландия; они включают также западное побережье Центральной и Южной Америки. Хотя слово «кольцевой» («циркум») подразумевает существование единого пояса, окружающего Тихий океан, в действительности этот пояс прерывается на западном побережье Северо-Американского континента и между Австралией и Антарктидой. Эти два района выделяются на рис. 4-8 также отсутствием глубоководных и промежуточных землетрясений.

Англичанин Гердлер в 1964 г. указал, что термин «циркумтихоокеанский» неудачен, так как «кольцо» разорвано. Этот разрыв он объяснял тем, что дно Тихого океана по обим его краям погружается, тогда как у западного побережья Северо-Американского материка и в области между Австралией и Антарктидой существуют срединно-океанические хребты. Этот факт был извс-



○ 1 ● 2 ▼ 3

Рис. 4-8. Кольцевой тихоокеанский пояс, разорванный Восточно-Тихоокеанским поднятием (R. W. Girdler, Research note — How genuine is the Circum-Pacific belt?, *Geophys. J.*, 8, p. 537, 1964).

1 — мелкофокусные землетрясения; 2 — промежуточные землетрясения; 3 — глубокофокусные землетрясения.

стен и раньше, но благодаря настойчивости Гердлера он вновь привлек к себе внимание. Вспомним, что у западного побережья Северной Америки нет желоба, как нет и очагов глубоких землетрясений. Единственная выдающаяся структура здесь — разлом Сан-Андреас, вдоль которого происходят мелкофокусные землетрясения. По сути дела, это трансформный разлом, который соединяет Восточно-Тихоокеанское поднятие с хребтами Хуан-де-Фука и Горда (рис. 3-6). Этот район представляет собой отрезок орогенического пояса, в настоящее время неактивный. Вместе с тем в области Береговых хребтов имеются и обширные зоны развития осадочных пород, указывающие на то, что раньше здесь существовал желоб, похожий на тот, который протягивается теперь вдоль западного побережья Южной Америки.

И снова мы должны здесь отметить, что сами океанические хребты испытали перемещение, так как область линейных маг-

нитных аномалий у берегов Северной Америки представляет только одну сторону Восточно-Тихоокеанского поднятия. Напомним, что, по мнению Вайна, это поднятие раньше продолжалось в северо-восточные районы Тихого океана и что там формировалось новое океаническое дно, как это происходит в настоящее время в юго-восточной части Тихого океана. Разрастание океанического дна привело к тому, что поднятие сместилось на восток и погрузилось под желоб, существовавший тогда у берегов Северной Америки. Это объяснение оказалось определенно полезным для понимания геологического строения западного побережья Северной Америки. Американский геолог У. Гамильтон в числе других исследователей выдвинул сходную идею, предположив, что погруженная часть Восточно-Тихоокеанского поднятия располагается теперь под *Провинцией бассейнов и хребтов*, что и обусловило хорошо известные особенности структуры этого района. В Провинции бассейнов и хребтов, занимающей большую площадь в штатах Невада, Аризона и Юта, обнаружены высокий тепловой поток и проявления растягивающих тектонических сил, т. е. именно то, что следует ожидать на территории, под которой находится активный рифт.

Здесь мы вновь сталкиваемся с идеей Мак-Кензи и Моргана о развитии тройных сочленений. Их остроумное предположение вскоре было развито и уточнено Т. Этуотер [3], в то время (в 1970 г.) аспиранткой Скриппсовского океанографического института. Этуотер провела тщательный анализ картины полосовых магнитных аномалий у побережья Северной Америки и проследила историю того, как столкнулся с Американским материком и исчез океанический хребет. Как явствует из рис. 3-10, оба склона этого океанического хребта (т. е. Восточно-Тихоокеанского поднятия) открыты взору южнее Калифорнийского залива, а к северу от залива виден только западный склон. Если в соответствии с гипотезой разрастания морского дна это разрастание идет симметрично по обе стороны хребта, то восточный его склон должен находиться под Американским континентом. Согласно модели, разработанной Вайном, Мак-Кензи, Морганом и Этуотер, вдоль западного побережья территории Соединенных Штатов раньше существовал непрерывный желоб, исчезнувший около 30 млн. лет назад. Новое морское дно, формировавшееся в Восточно-Тихоокеанском поднятии, постоянно опускалось в этот желоб, вызывая вулканическую деятельность и глубоководные землетрясения. Однако в настоящее время это погружение прекратилось, а с ним прекратились и вулканизм, и глубокие землетрясения, остались только «следы» этого процесса в виде вулканических пород.

На рис. 4-9 показана одна из возможных моделей истории взаимодействия между Восточно-Тихоокеанским поднятием и материком Северной Америки; модель получена в результате анализа полосовых магнитных аномалий. Те, кому эта модель покажется слишком сложной, смогут, вероятно, легче понять ее,

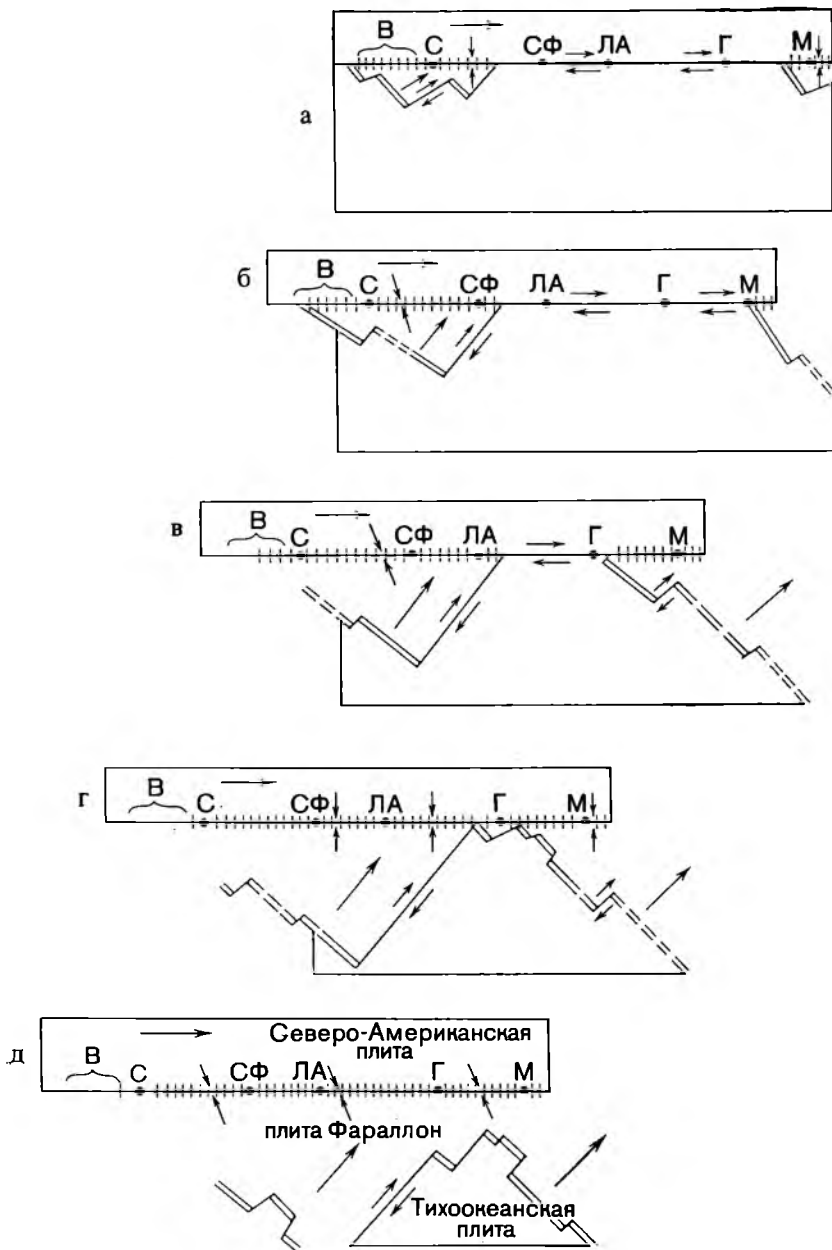


Рис. 4-9. Схематическая модель взаимодействия плит [3].

Модель основана на предположении, что Северо-Американская и Тихоокеанская плиты движутся относительно друг друга в направлении, параллельном разлому Сан-Андреас, с постоянной скоростью 6 см/год. Береговая линия континента считается приближенно параллельной разлому Сан-Андреас. Показанный на схеме характер движения плит Фараллон и Тихоокеанской отражает в общих чертах реальную картину магнитных аномалий.

a — в настоящее время; *б* — 10 млн. лет назад; *в* — 20 млн. лет назад; *г* — 30 млн. лет назад; *д* — 40 млн. лет назад; В — о. Ванкувер; С — Сиэтл; СФ — Сан-Франциско; ЛА — Лос-Анджелес; Г — Гуаймас; М — Масатлан. Длинными стрелками показано движение плит по отношению к Тихоокеанской плите, короткими стрелками — относительные движения вдоль границ плит.

вернувшись к рис. 3-6, где иллюстрируется сходная гипотеза. (В рис. 3-6 проще разобраться, если повернуть его так, чтобы разлом Сан-Андреас шел горизонтально.) Диаграмма *a* на рис. 4-9 соответствует нынешнему времени. Диаграммы *б*, *в*, *г* и *д* последовательно показывают более древние эпохи. Плита Фараллон представляет собой образование на восточном склоне Восточно-Тихоокеанского поднятия, симметричной главной части Тихоокеанской плиты. Она исчезла под Северо-Американским континентом: остался только небольшой участок на восточной стороне хребтов Хуан-де-Фука и Горда. Поглощение плиты Фараллон прекратилось, как показано на рис. 4-9, когда Восточно-Тихоокеанское поднятие столкнулось с Северо-Американским континентом. После этого начались движения по разлому Сан-Андреас — трансформному разлому, проходящему по западному побережью Северной Америки. Предполагается, что первое соприкосновение Восточно-Тихоокеанского поднятия с Северо-Американским материком произошло 30 млн. лет назад (рис. 4-9, *г*). Начиная с этого времени два тройных сочленения (типа Ж-Р-Р на севере и Р-Х-Ж на юге) расходились в разные стороны, удлиняя тем самым разлом Сан-Андреас, и относительное движение двух главных плит (Тихоокеанской и Северо-Американской), теперь уже непосредственно граничивших между собой, происходило параллельно этому разлому. Эта модель дает замечательно четкое, прямо-таки революционное объяснение геологической истории западной части Северной Америки и одновременно еще прочнее утверждает представление о столкновении хребта и желоба. Доказательства этой концепции, хотя ее и трудно принять, чрезвычайно убедительны. И здесь мы подходим к вопросу: что же представляют собой океанические хребты?

ОКЕАНИЧЕСКИЕ ХРЕБТЫ

Когда была выдвинута гипотеза разрастания морского дна, мало кто оспаривал постулат о том, что океанический хребет — это, по сути дела, часть конвекционного потока, поднимающегося из мантии. Но этот период блаженного неведения был недолгим. Как только выяснилось, что океанические хребты могут мигрировать с места на место и что они либо погружаются в глубины Земли, либо каким-то образом уничтожаются, стало очевидно, что их природа должна быть полностью переосмыслена в понятиях теории тектоники плит.

Одна из идей, возникших в результате такого переосмысления, сводилась к тому, что океанические хребты — это просто трещины или «окна» в плитах, которые образуются благодаря их движению и впоследствии заполняются поднимающейся из мантии магмой. В таком случае океанические хребты могут мигрировать и в конце концов сталкиваться с океаническими желобами

и уничтожаться. Несколько иначе истолкованная, эта идея означает, что океанические хребты и восходящие ветви конвекционных потоков в мантии — не обязательно одно и то же. Тем не менее горячий материал неизбежно должен подниматься из астеносферы в океанических хребтах, поскольку именно там литосфера разбита трещиной и растягивается в разные стороны. Когда мантийный материал приближается к этой трещине, давление падает и частичное плавление ускоряется, в результате чего выделяется базальтовая магма, которая затем застывает, образуя новую океаническую кору. Одновременно происходит дальнейшее раздвижение плит. Новый участок морского дна, находящийся на гребне океанического хребта, наиболее сильно нагрет и поэтому имеет наименьшую механическую прочность, так что дальнейшее растрескивание литосферы происходит именно здесь. Потому-то новый материал всплывает как раз в осевых зонах океанических хребтов. И именно поэтому разрастание морского дна постоянно идет от океанических хребтов. Океаническая кора образуется главным образом путем внедрения даек базальтовой магмы, заполняющей вертикальные трещины, но, как установлено драгированием в районах океанических хребтов, происходит и непосредственное излияние магмы на морское дно. Следы подводных извержений обнаруживаются по присутствию лав своеобразного облика — так называемых *шаровых лав*, образующихся при быстром затвердевании магмы, когда она соприкасается с водой океана. Базальтовая магма, прошедшая такую «закалку», приобретает сильную термоостаточную намагниченность, что и приводит, возможно, к возникновению магнитных аномалий, наблюдаемых над морским дном.

По мере того как новое океаническое дно расплзается по обоим склонам хребта, материал постепенно охлаждается сверху вниз, и толщина новой коры увеличивается. Поверхности, вдоль которых температура внутри литосферной плиты одинакова, можно изобразить, как это сделано на рис. 4-10, в виде изотерм. Особенно важное значение имеет изотерма для температуры солидуса T_s (при которой начинается плавление), так как над уровнем этой изотермы породы полностью твердые и образуют литосферу, а ниже этого уровня они частично расплавлены и образуют астеносферу. Конкретная величина T_s зависит от минерального состава верхней мантии и от того, присутствует ли в ней вода или нет. Предполагается, что эта величина составляет 1000°C для «влажной» и 1200°C для «сухой» мантии.

Как указывалось выше, тепловой поток от морского дна имеет наибольшую величину у гребней хребтов и постепенно уменьшается с удалением от осевых частей хребтов. Раньше ученые связывали это явление с мантийной конвекцией, но плитовая модель, рассматриваемая нами в этом разделе, может, по-видимому, дать более правильное объяснение: уменьшение теплового потока вызывается постепенным остыванием плиты.

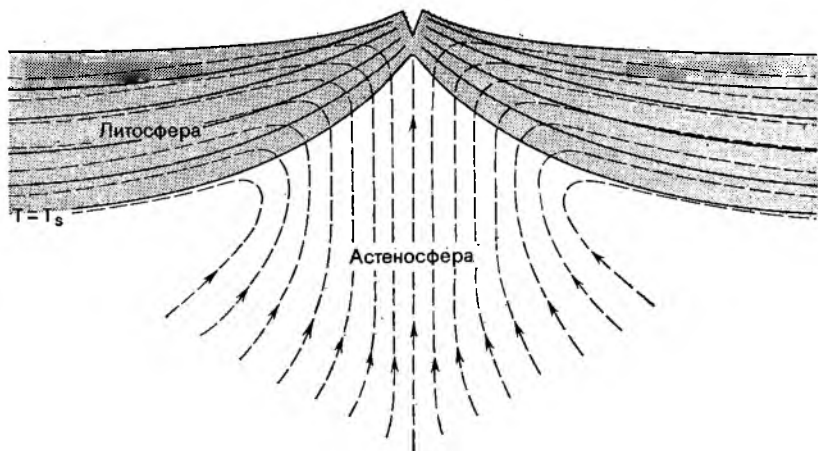


Рис. 4-10. Схема течения материала (штриховые линии со стрелками) и изотермы (сплошные линии), иллюстрирующие утолщение плиты при ее остывании сверху.

Изотерма T_s обозначает температуру солидуса; она отделяет более холодную и твердую литосферу от находящейся ниже более горячей астеносферы.

На рис. 4-11 показано, как уменьшается тепловой поток через дно Тихого океана с увеличением расстояния от хребта и, следовательно, с увеличением возраста. Согласно между теоретической кривой, построенной в соответствии с плитовой моделью, и наблюдаемыми значениями вполне удовлетворительно, за исключением гребневой зоны хребта. Многие наблюдения показывают, что вдоль гребней хребтов бывают как высокие значения теплового потока, так и чрезвычайно низкие, а в среднем тепловой поток оказывается значительно ниже, чем он должен быть по теории (см. стр. 58). К. Листер считает это расхождение результатом существования в верхних горизонтах коры вблизи гребней хребтов гигантской системы гидротермальных источников. В пределах этой системы тепло уходит в океан не только через твердое вещество горных пород путем обычной теплопроводности, но и путем циркуляции воды через трещины в горных породах. Для выяснения природы гидротермальной деятельности в оксанической коре проводятся крупные исследования.

Наблюдения иного рода, выполненные Дж. Склейтемом и Ж. Франшто, дали важный материал, в основном подтверждающий плитовую модель. Исследователи заметили, что наблюдаемое уменьшение теплового потока в стороны от хребтов означает, что изотермы с удалением от хребта опускаются, в результате чего плита становится толще (рис. 4-10). Затвердевшая часть плиты постепенно остывает и делается плотнее; температурное сжатие приводит к соответствующему уменьшению объема.

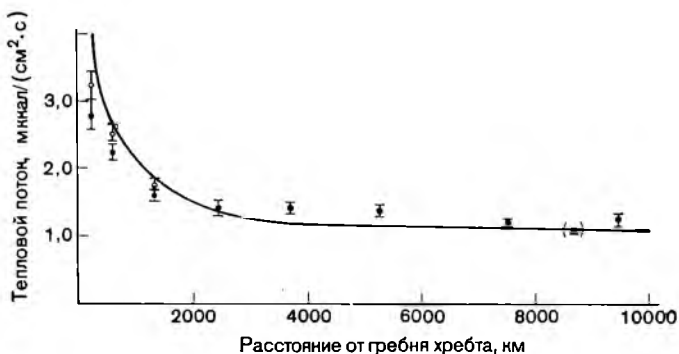


Рис. 4-11. Сопоставление наблюдаемых средних значений теплового потока (зачерненные кружки) в северной части Тихого океана с теоретической кривой, рассчитанной для литосферы толщиной 75 км [43].

Светлые кружки обозначают наблюдаемые значения, повышенные на 15% для учета возможного эффекта рассеяния тепла вблизи хребта (см. текст). Можно видеть, что наблюдаемые средние значения уменьшаются с удалением от хребта.

Вследствие этого литосфера погружается на несколько километров в глубь мантии, и над более холодными и древними участками морского дна глубина океана возрастает. Склейтер и другие исследовали зависимость между глубиной океанов и возрастом морского дна, и полученные ими результаты подтвердили это рассуждение. На рис. 4-12 проведено сопоставление теоретической модели и наблюдаемых отметок рельефа дна Тихого океана. Совпадение поистине замечательное! Хотя, например, в океанографии хорошо известно, что восточный район Тихого океана имеет меньшие глубины, чем западный, все же становится как-то не по себе, когда подумаешь, что плитовая модель может объяснить это как всеобщее и неизбежное следствие такого обычного явления, как тепловое сжатие.

Приведенные здесь соображения показывают современное состояние тектонической модели формирования плит в океанических хребтах. Важные детали такой модели, на которых зиждется вся концепция, нуждаются в дальнейшем изучении. Например, А. Миясири и его коллеги собрали на морском дне большое количество образцов метаморфических пород. Стало быть, базальты, образующие твердую кору, должны были каким-то образом оказаться погруженными на большую глубину и подвергнуться там метаморфизму, а затем снова обнажиться на морском дне в результате каких-то процессов, вроде подвижек по разломам. Возникает другая столь же, а может быть, еще более важная проблема: какие именно геологические, тектонические и петрологические процессы, создающие океаническую кору, происходят под гребнями срединно-океанических хребтов. Чтобы решить такую проблему, необходимо использовать методику с гораздо большей разрешающей способностью, нежели та, которая до-

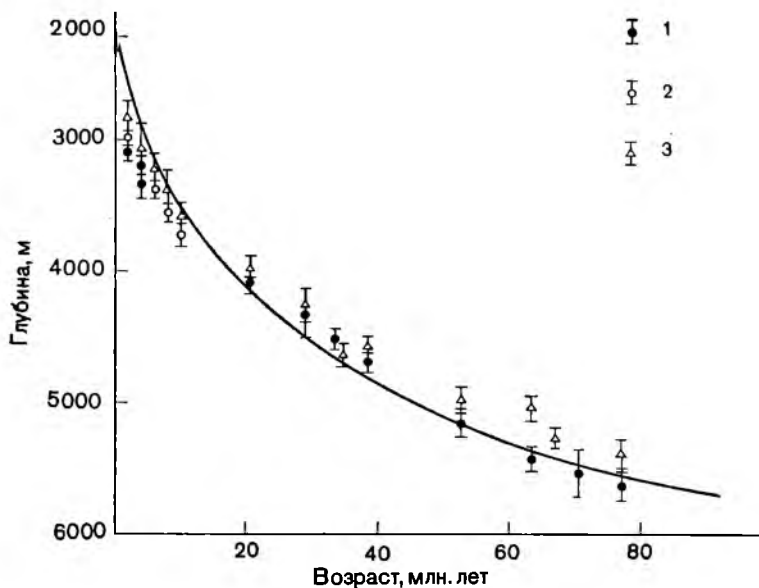


Рис. 4-12. Зависимость средней глубины в северном и южном районах Тихого океана от возраста океанической коры (*J. G. Sclater et al.*, Elevation of ridges and elevation of the Central Eastern Pacific, *J. Geophys. Res.*, **76**, p. 7888, 1971).

Теоретическая кривая (построенная Склейтером и Франшто) рассчитана для литосферы толщиной 100 км. Условными знаками показаны различные скорости разрастания морского дна: 1 — север Тихого океана, примерно 5 см/год; 2 — юг Тихого океана, более 3 см/год; 3 — юг Тихого океана, менее 3 см/год.

ступна при наблюдениях с обычных морских судов. В последнее время в гребневой зоне северной части Срединно-Атлантического хребта производились исследования по совместному проекту ученых США и Франции FAMOUS (French American Mid-Ocean Undersea Study — Франко-американское срединно-океаническое подводное исследование). Множество научных судов и погружаемых аппаратов было использовано для решения комплексной задачи: узнать, что фактически происходит на гребне океанического хребта. Как на самом гребне, так и на прилегающих участках зон разлома были получены подробные результаты тепловых и магнитных измерений, взяты образцы горных пород, сделаны четкие фотографии. Все эти материалы показали, что процесс разрастания гораздо сложнее, чем это казалось после предшествующих наблюдений с морских судов. Обнаружилось, что во многих местах хребет растет в одну сторону значительно быстрее, чем в другую, и даже под большими углами к его оси.

ПОЛОСОВЫЕ МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ МЕЗОЗОЙСКОГО ВОЗРАСТА В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА

После того как в северо-западной части Тихого океана, у берегов Японии и Курильских островов, были обнаружены четкие линейные магнитные аномалии (рис. 3-15), я не прекратил попытки коррелировать их с такими же аномалиями в восточной части Тихого океана. Вначале казалось, что аномалии в районе Японии, наиболее удаленном от Восточно-Тихоокеанского поднятия, соответствуют самой древней коре, которая образовалась в этом поднятии, переместилась через весь Тихий океан и в будущем должна быть поглощена в Японо-Курильских желобах. Но тем временем в заливе Аляска был открыт «Великий магнитный изгиб» (рис. 3-10), и ученые проследили легко датируемые кайнозойские аномалии далеко на запад, вплоть до восточных склонов Императорских подводных гор. Теперь уже считалось, что возраст аномалий этого района уменьшается на север, в направлении, противоположном тому, которое можно было бы ожидать в случае, если аномалии японского района возникли в Восточно-Тихоокеанском поднятии. Однако профили магнитных аномалий в районе Японии не коррелировались и с профилями, полученными к востоку от Императорских гор. Это расхождение оставалось загадкой.

В начале 1972 г., когда я посетил Геологическую обсерваторию Ламонт-Догерти, я встретился с Р. Ларсоном, который в то время был близок к тому, чтобы разрешить эту загадку. Эта перспектива сильно меня взволновала, потому что я занимался этой проблемой уже несколько лет. К тому моменту Ларсон и Чейз собрали данные, указывающие на существование в Тихом океане трех систем магнитных аномалий неизвестного возраста: в районе Японии, Гавайев и островов Феникс (рис. 4-13). Кора Тихоокеанской впадины имела магнитные датировки по так называемым кайнозойским магнитным изохронам для последних 76 млн. лет (см. заштрихованные области на рис. 3-10). Но за пределами этих изохрон магнитных аномалий не было! Обширную область без признаков намагничения назвали зоной спокойного магнитного поля. То же самое наблюдалось и в Атлантическом океане.

Как отмечено в гл. 3, для зоны спокойного магнитного поля было предложено несколько объяснений. Понятно, что при отсутствии важнейших данных теоретические представления бывают весьма разнообразными в зависимости от мировоззрения ученого. Некоторые ученые предполагали, что отсутствие магнитных аномалий указывает на то, что морское дно здесь образовалось не путем разрастания, а каким-то иным способом и что сама гипотеза разрастания морского дна неприменима к ранним периодам геологической истории. Другие считали, что древнее морское дно образовалось под действием того же механизма раз-

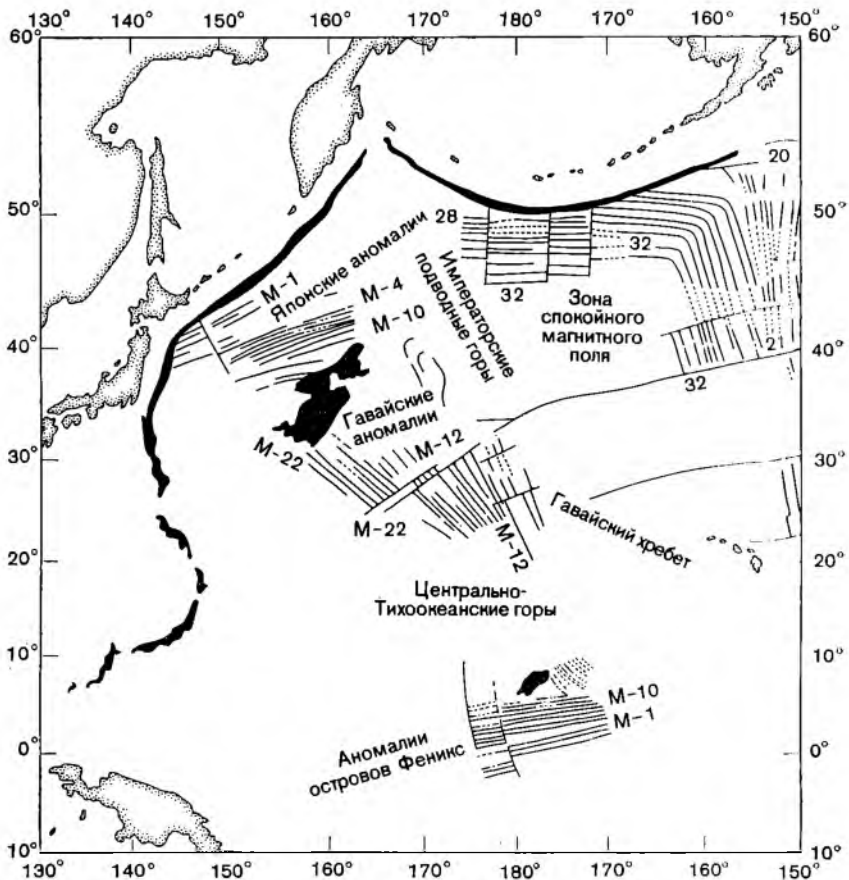


Рис. 4-13. Мезозойские и кайнозойские магнитные аномалии на северо-западе Тихого океана [29].

Мезозойские аномалии отмечены буквой М, причем обозначение М-1 соответствует наиболее молодой из этих аномалий. Цифрами без буквы М обозначены номера кайнозойских аномалий (как на рис. 3-8).

растания, но магнитные аномалии на нем впоследствии были «стерты». Согласно самой простой теории, в течение некоторых отрезков времени, когда образовывались определенные участки морского дна, никаких инверсий геомагнитного поля не было. Пока продолжались эти умозрительные рассуждения, начала проявляться детальная картина трех систем аномалий неизвестного возраста, находящихся еще дальше от хребта, чем зона спокойного поля.

Ларсон и Чейз [29] доказали, что эти три группы аномалий в западной части Тихого океана образовались синхронно и в тот же самый период, когда возникла система аномалий в запад-

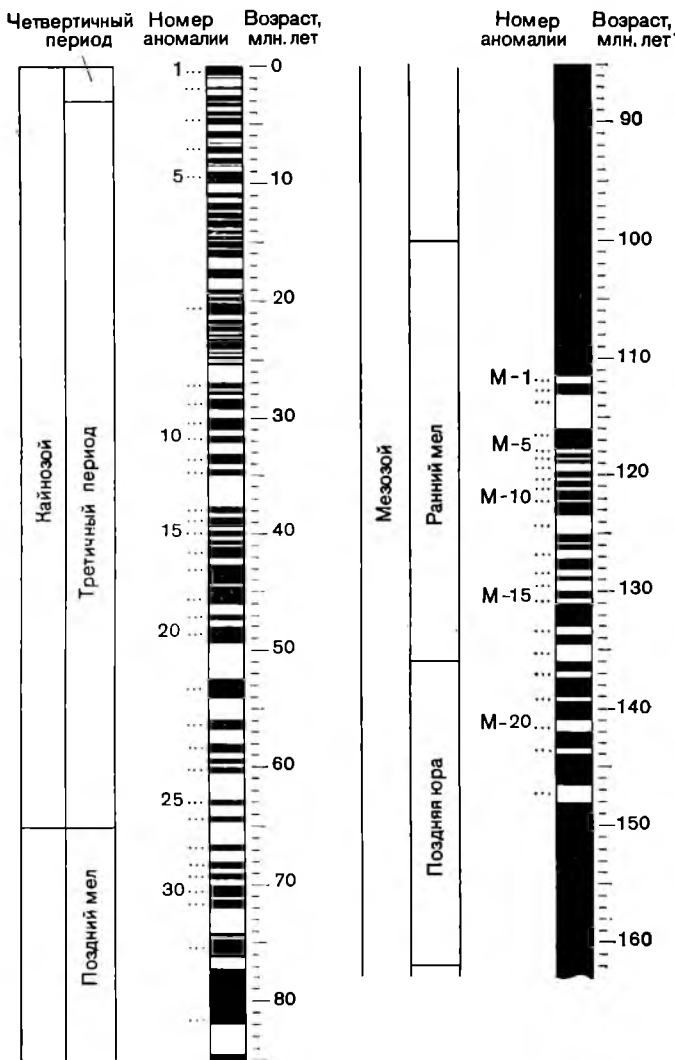


Рис. 4-14. Шкала инверсий геомагнитного поля от современной эпохи до начала поздней юры (162 млн. лет назад) [30].

ной части Атлантики — за пределами зоны спокойного магнитного поля. Эти атлантические аномалии, открытые Фогтом, называются системой аномалий Китли. Еще интереснее то, что Ларсон и Чейз, используя материалы Проекта глубоководного бурения, смогли установить, что возраст этих аномалий составляет 110—150 млн. лет, т. е. что они возникли в далекие времена мезозойской эры. Оси магнитных аномалий получили номера М-1, М-2,

М-3 и т. д. (рис. 4-13). Эта работа Ларсона и Чейза была важным шагом вперед, и их выводы были полностью включены в сводки, характеризующие возраст океанических впадин (рис. 3-10 и 3-14).

Таким образом, история разрастания морского дна была прослежена в глубь мезозойской эры и ключ к разгадке тайн северной части Тихого океана был найден, хотя некоторые мелкие подробности пока еще не изучены. В то же время длительность известной нам истории инверсий магнитного поля Земли увеличилась с 76 млн. лет до 150 млн. лет — почти вдвое. Сравните теперь рис. 4-14 с рис. 3-9. Рис. 4-14 показывает длинную эпоху нормальной полярности (от 85 до 110 млн. лет назад), в течение которой образовалась меловая зона спокойного магнитного поля. Можно заметить, что имеется и другая длинная эпоха неизменной полярности, древнее 148 млн. лет в поздней юре. Эта эпоха соответствует наиболее древним частям океана, которые относятся к юрской зоне спокойного поля. Отсутствие инверсий геомагнитного поля для этих периодов было известно и из результатов выполненных раньше палеомагнитных измерений пород континентов, так что обе линии палеомагнитных исследований прекрасно сходятся между собой.

ДВИЖЕНИЕ ТИХООКЕАНСКОЙ ПЛИТЫ НА СЕВЕР

Обобщая все изложенные выше данные, мы приходим к выводу, что разрастание морского дна развивалось по меньшей мере со времени образования древнейших из существующих ныне участков дна океана; раньше всех образовалась юрская зона спокойного магнитного поля, затем последовательно возникли серия мезозойских аномалий, меловая спокойная зона и так называемый кайнозойский ряд магнитных аномалий, начинающийся с «аномалии 32» (рис. 4-13 и 3-10).

В методе, который использовали Ларсон и Чейз для корреляции удаленных друг от друга магнитных аномалий, применялась сложнейшая техническая процедура, разработанная голландским ученым Схаутеном. Этот метод позволяет оценивать даже магнитную широту, которую имела та или иная часть океанического дна или хребта в момент своего образования. Можно предполагать, что анализ характера магнитных аномалий позволит нам изучать палеомагнетизм морского дна. Если принять постулат о том, что положение геомагнитного полюса, осредненное для отрезка времени продолжительностью, допустим, 10 тыс. лет, совпадает с полюсом вращения Земли, то в принципе возможно использовать палеомагнетизм для установления дрейфа океанических плит — точно так же, как это было сделано для доказательства континентального дрейфа и измерения его характеристик. На рис. 4-15 показано, каким было, по Ларсону и Питману [30], вероятное состояние Тихого океана приблизительно 110 млн.

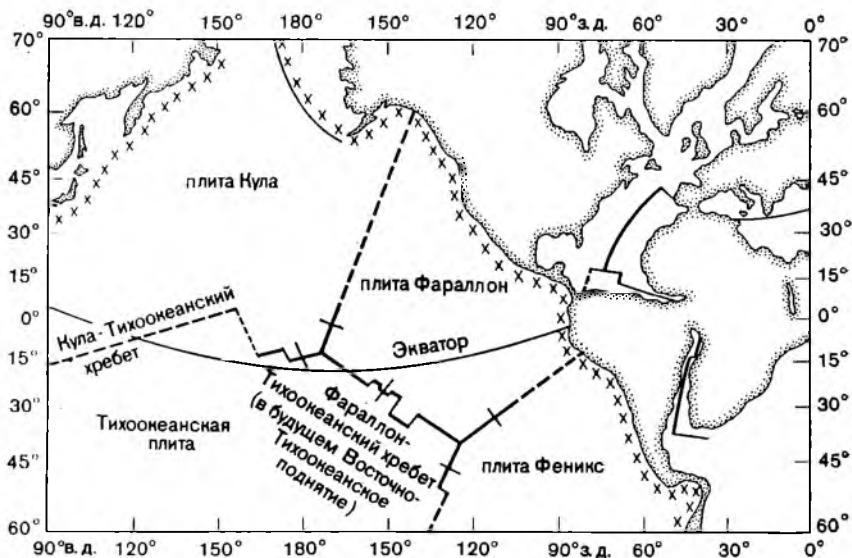


Рис. 4-15. Возможная конфигурация плит Тихого океана около 110 млн. лет назад [30].
Крестиками показаны зоны субдукции.

лет назад. Согласно их представлениям, тогда в Тихом океане существовали по меньшей мере четыре плиты, пять океанических хребтов и два тройных сочленения типа Х-Х-Х. Тихоокеанская плита с тех пор постоянно смещалась на север и к настоящему времени прошла не менее 6 тыс. км, увлекая за собой океанические хребты, в которых продолжался процесс разрастания морского дна. Плита Фараллон погружалась под западное побережье Северной Америки, а плита Кула¹ — под Алеутские острова и одновременно под Японский и Курильский желоба. В настоящее время как плита Кула, так и Кула-Тихоокеанский хребт уже исчезли, а в процессе поддвига находится Тихоокеанская плита, занимавшая раньше положение к югу от Кула-Тихоокеанского хребта.

Долгое время В. Вакье, я и другие исследователи изучали палеомагнетизм морского дна с иных позиций. Многие из бесчисленных подводных гор, существующих на дне океана, возникли как подводные вулканы, и их породы сильно намагничены. Если удастся определить направление и интенсивность этого намагничения, то такие данные можно использовать точно так же, как и палеомагнитные наблюдения, проводимые на суше. Однако из-за того, что подводные горы находятся на глубинах,

¹ Название «Кула» было предложено в 1970 г. Дж. Гроу и Т. Этуотер в их статье об Алеутской дуге [19]. На языке атабаскских индейцев это слово означает «вся ушла».

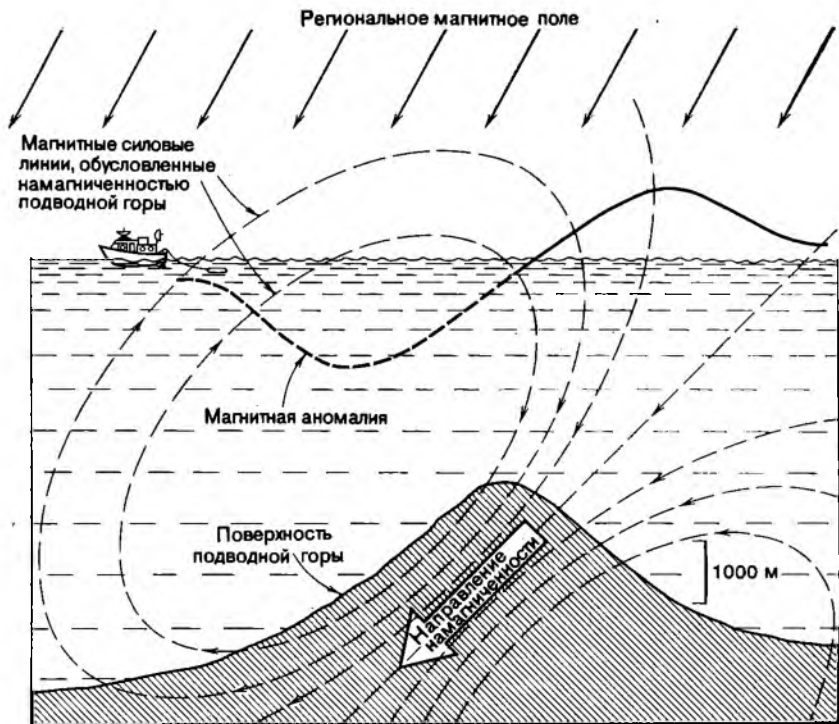


Рис. 4-16. Схематический профиль магнитных аномалий над подводной горой. Магнитная аномалия, обусловленная намагничением пород подводной горы, показана в виде магнитных силовых линий. Аномальное магнитное поле имеет положительные значения (сплошная линия) там, где эти силовые линии совпадают на поверхности океана с региональным полем, и отрицательные значения (штриховая линия) там, где они ослабляют региональное поле. Хотя на схеме показан только один профиль, для вычислений использовалась серия таких профилей.

измеряемых тысячами метров, отобрать там ориентированные образцы горных пород практически невозможно. Поэтому мы бороздили море над подводными горами во всех направлениях, детально изучая рельеф дна и измеряя магнитные аномалии, связанные с этими подводными горами. Результаты такой съемки позволили нам определить (с помощью вычислительной техники) направление и интенсивность намагничения подводных гор (рис. 4-16). К 1964 г. на основе этого исследования мы уже установили, что подводные горы, рассеянные у берегов Японии по дну Тихого океана и считающиеся по возрасту меловыми, после своего возникновения переместились на север, пройдя расстояние более 6 тыс. км. Этот вывод был полностью подтвержден в 1972 г. работой Ларсона и Чейза, которые использовали совершенно иные методы. Мы поздравили друг друга с полным совпадением наших результатов.

Начиная с мезозоя, под Японию опустилось, по-видимому, около 10 тыс. км океанической плиты вместе с океаническими хребтами. Как мы увидим в следующей главе, это — важный фактор в истории Японской островной дуги.

ВОЗМОЖНАЯ ПРИЧИНА МОРСКИХ ТРАНСГРЕССИЙ

Мы уже обсуждали, как можно вывести скорость разрастания морского дна из ширины и возраста полосовых магнитных аномалий. Следовательно, если считать меловую зону спокойного магнитного поля просто очень широкой полосой, то среднюю скорость разрастания морского дна можно оценить и для времени образования этой зоны. Ларсон и Питман так и сделали; они пришли к выводу, что в этот период — от 110 до 85 млн. лет назад — скорость разрастания была второе больше, чем в другое время. Они назвали это *импульсом* ускоренного разрастания морского дна и заявили, что как разрастание океанических плит, так и их субдукция в желоба были в этот период особенно интенсивными. Далее они предположили, что это могло быть причиной активного горообразования, которое, как полагают, распространялось здесь в то время на большой площади.

Развивая эту идею еще дальше, англичанин О. Хэллам выдвинул в 1971 г. теорию, согласно которой крупные трансгрессии моря также могут быть приписаны импульсам быстрого разрастания морского дна. В течение всего геологического времени бывали периоды, когда большие массивы суши подвергались вторжению морских вод. Такое явление называется *трансгрессией*. Обратный процесс (когда море отступает) называется *регрессией*. Эти явления были хорошо известны в геологии, но их причина оставалась тайной. Мы рассмотрели те условия, при которых происходит рождение новой плиты при разрастании морского дна: горячая и поднятая на высокий уровень, она постепенно остывает и сжимается, а глубина воды над ней увеличивается. Однако, если во время импульса образование новой коры происходит в несколько раз быстрее обычного, морское дно в целом будет высоко поднято вследствие существования более обширных областей молодой горячей коры, еще не остывшей и не сократившейся в объеме. Это приводит к значительному уменьшению глубины мирового океана. Как вода переливается через край резервуара, когда поднимается его дно, так и море выходит из берегов и затопляет сушу на большую глубину, вызывая трансгрессию. Когда период интенсивного разрастания кончается, морская вода отступает и происходит регрессия. В 1973 г. Дж. Хейс и У. Питман хитроумнейшим способом использовали идею Хэллама: они сопоставили хорошо известную трансгрессию, происходившую в меловом периоде, с резким импульсом разрастания морского дна, предположение о котором выведено из анализа полосовых магнитных аномалий.

Поистине волнующее зрелище — наблюдать такие дерзкие попытки разгадать труднейшие геологические головоломки; однако не все ученые с доверием относятся к таким идеям, как идея об импульсах разрастания морского дна. Скептики оспаривают достоверность скоростей разрастания, выведенных из ширины магнитных полос, особенно в спокойной зоне. Ширину полосы можно измерить довольно точно, но время, когда началось намагничивание и когда оно закончилось, надежно пока не установлено. Эта тема будет одной из наиболее интересных в самых ближайших исследованиях по тектонике плит.

ТЕКТОНИКА ПЛИТ И ОРОГЕНЕЗ

К 1969 г. сторонники тектоники плит заявили о своей готовности приступить к решению самой основной проблемы геологии — проблемы орогенеза. Признание тектоники плит было бы гораздо более широким, если бы она применялась только к объяснению тех процессов, которые происходят на Земле в настоящее время, или к геометрическому описанию процесса разрастания морского дна на протяжении последних 80 или даже 150 млн. лет — периода, в котором проследить геологическую историю сравнительно легко. Однако приложение этой теории к геологическому развитию в более ранний, домезозойский период кажется многим геологам в лучшем случае пустой забавой. Известными защитниками идеи использования концепции тектоники плит для ранних периодов являются два молодых геолога — Дж. Дьюи и Дж. Берд. Они стремятся исследовать самые крайние пределы применимости тектоники плит и утверждают, что соответствующие тектонические процессы развивались на протяжении по меньшей мере последнего миллиарда лет истории Земли. Согласно теории континентального дрейфа, когда-то Атлантического океана не было. Дьюи и Берд в 1970 г. продолжили эту возможную последовательность событий дальше в глубь истории и предположили [13], что еще раньше существовал другой океан, который можно было бы назвать Прото-Атлантическим. В сущности, такая идея еще до Дьюи и Берда высказывалась Дж. Т. Уилсоном и др.

Если мы согласимся, что «заталкивание» океанической плиты в желоб является причиной орогенического процесса, и попытаемся затем объяснить происхождение всех палеозойских орогенических зон, таких, как Аппалачи в Северной Америке и Каледонские горы (перессекающие территорию Шотландии и Скандинавии) в Европе, то нам не обойтись без поддвижения океанического дна! Таким образом, орогенические зоны, вдоль которых происходило поддвижение, интерпретируются как свидетельства существования древних океанов. В поисках доказательств, подобных этому, Дьюи, Берд и их предшественники тщательно изучили результаты большого количества детальных геологических иссле-

дований, проведенных в районе северной Атлантики, в том числе в Ньюфаундленде, Гренландии и Канаде, — материалы, представляющие итог многих лет научных усилий. Они сделали вывод, что на месте Атлантического океана раньше, по-видимому, существовал другой океан, затем он стал закрываться, и в желобах этой Прото-Атлантики происходила субдукция океанического дна. Эта субдукция была подобна тому, что происходит в настоящее время на окраине Тихого океана и вызывает там глубокие землетрясения, вулканизм, метаморфизм и т. д. В результате процессов, связанных с развитием Прото-Атлантического океана, возник Каледонско-Аппалачский горный пояс. Продолжавшееся поглощение океанической плиты Прото-Атлантики вызвало в конце концов закрытие океана и образование на его месте соответствующей части Пангеи. Кульминацией столкновения континентов и было, возможно, воздымание горных поясов. Впоследствии, когда Пангея снова начала распадаться, возник современный Атлантический океан. Однако при новом открытии океана его берега оказались не идентичны береговой линии первоначальной Прото-Атлантики: древний орогенический пояс на обеих сторонах Прото-Атлантики разбился на ряд обломков сложной формы. Затем Дьюи представил простую, но весьма смелую модель орогенических циклов, аргументируя ее тем, что, поскольку размеры земной поверхности постоянны, расширение одного океана, например Тихого, приводит к сокращению другого, Атлантического. Если же станет расширяться Атлантический океан, как это происходит в настоящее время, то размеры Тихого океана будут уменьшаться. На основании этой гипотезы была сделана попытка объяснить долгую историю многократных орогенических циклов по той схеме, которая показана на рис. 4-17.

Согласно этой идее, существуют три типа развития океанов: атлантический, тихоокеанский и средиземноморский. Как для атлантического, так и для тихоокеанского типов характерно разрастание морского дна на хребтах, но в первом случае океан расширяется, а во втором — сокращается. Различие между ними состоит в том, что при тихоокеанском типе развития на континентальной окраине происходит субдукция океанической плиты, тогда как при атлантическом типе никакой субдукции нет. При средиземноморском типе развития ширина океана сокращается, а разрастания не происходит (рис. 4-17, *в* и *е*); имеются только границы поддвигаания, хребты же отсутствуют.

Континентальные окраины в этой модели разбиты на два типа — атлантический и тихоокеанский — в зависимости от того, происходит на них субдукция или нет. Процессы, протекающие на континентальных окраинах разного типа, во многом различны. Вдоль континентальных окраин атлантического типа глубина океана медленно увеличивается по мере того, как плита остывает; на ней накапливается осадочный материал, приносимый с материка. На окраинах же тихоокеанского типа возникают все виды

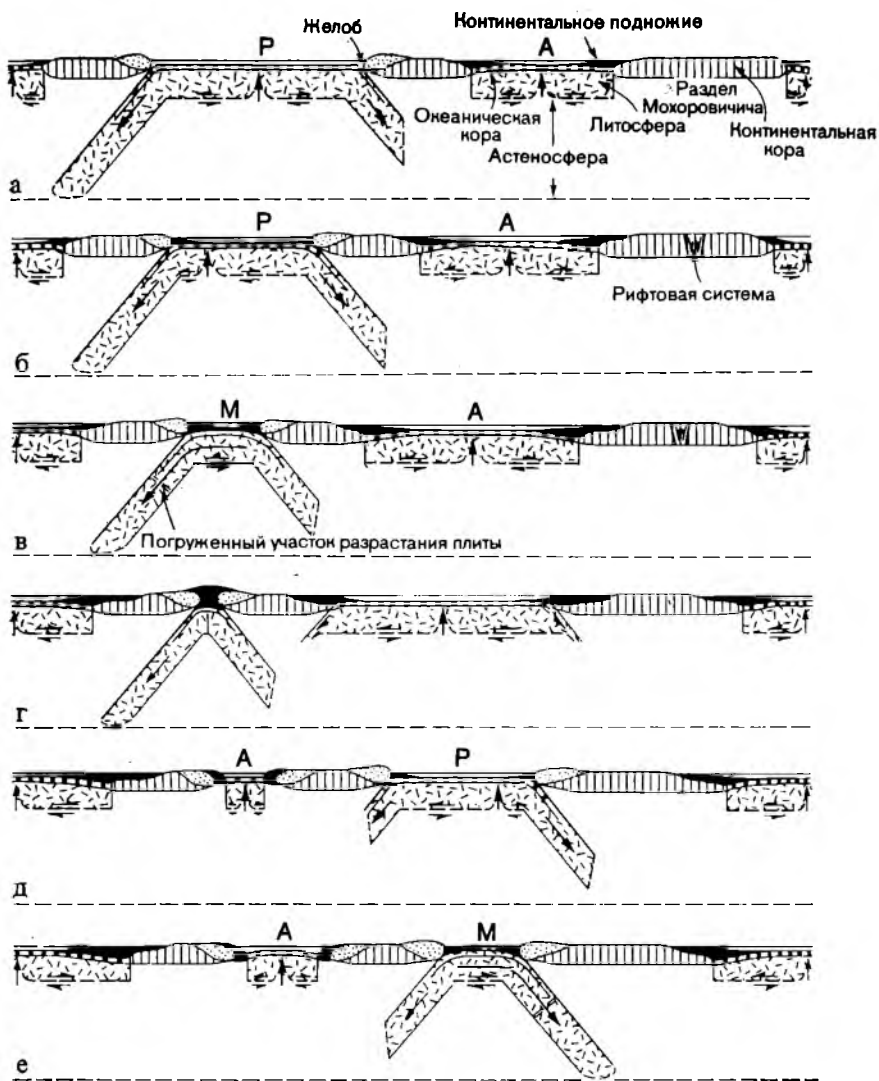


Рис. 4-17. Схематические разрезы по большому кругу земного шара, показывающие последовательное развитие трех главных типов (фаз) эволюции океана: тихоокеанского типа (P), атлантического типа (A), средиземноморского типа (M) [11].

Разрезы а, б и в показывают процесс разрастания — расширения, в результате которого формируется океан типа А (в первой части разрезов). Одновременно в левой части океан претерпевает процесс разрастания — сокращения по типу P (разрез б) или сокращения без разрастания по типу M (разрез в). На разрезе г левый океан уже закрылся, так что расширение правого океана по атлантическому типу должно остановиться. На разрезе д справа начинается развитие по типу P, а слева — по типу A. Если хребет в процессе субдукции погружается (разрез е), то развитие правого океана идет по типу M.

активных орогенических событий, такие, как землетрясения и вулканические извержения. По этим причинам континентальные окраины указанных двух типов называются также *пассивными* или *активными*.

Дьюи утверждал, что когда процесс развития океана проходит все стадии, обозначенные на рис. 4-17 буквами *a—e*, цикл начинается снова. Таким образом, в каждом орогеническом цикле океаны переходят от атлантического типа развития к тихоокеанскому (возможно, через средиземноморский тип).

Хотя сами Дьюи и Берд — геологи, их гипотезы резко противоречат традиционным геологическим представлениям. Часто геологи инстинктивно стремятся избегать упрощенной генерализации, так как они знают свою область исследований настолько детально, что для них не составляет труда найти примеры, которые не сможет объяснить никакая идеализированная теория. Потому-то идея Дьюи и Берда и не была принята некоторыми геологами. Хотя она до сих пор не признана как научный факт, геологам стоило бы, наверное, попытаться узнать, не намечает ли предложенная генерализация верное направление работ. Геофизикам же, таким, как я, эта идея кажется великолепной. Однако достоверность такой рабочей гипотезы можно проверить с точки зрения физики или химии только после того, как сама эта гипотеза будет четко сформулирована. Трудно исследовать гипотезу теоретически, если она выражена туманным, путаным или чрезмерно сложным языком. Но как только причины и следствия явлений оказываются логично и ясно сформулированными, появляется возможность изучить их механизм с физической или математической точки зрения. Дьюи и Берд использовали свои геологические наблюдения, чтобы высказать предположение о том, как события *могли бы* развиваться. Однако вопрос, *почему* они так развивались, до сих пор требует, по-видимому, дальнейших фундаментальных исследований. Почему, например, всегда, когда холодная океаническая кора испытывает в зонах субдукции погружение, там активизируется магматическая деятельность и происходит метаморфизм?

ОСТРОВНЫЕ ДУГИ

КОНЕЦ ПУТЕШЕСТВИЯ

Вдоль северной и западной окраин Тихого океана располагается серия изогнутых цепочек островов: Алеутские острова, Курилы, Япония, острова Рюкю, Филиппины. К югу от Японии отвляется Идзу-Бонинская — Марианская дуга. Еще дальше на юг протягиваются Индонезия, Соломоновы острова, Новые Гебриды, острова Тонга и, наконец, острова Кермадек. Это островные дуги. Однако дугообразная форма — не единственная их общая черта. Все они сопряжены с желобами, имеющими глубину более 6 тыс. м, причем большинство желобов расположено на океанской стороне каждой дуги (рис. 5-1). Западное побережье Южно-Американского континента, хотя оно не представляет собой цепи островов, также можно включить в этот перечень островных дуг или по крайней мере в число дуг, имеющих активные окраины тихоокеанского типа, как они были определены в предыдущей главе.

Эти системы островных дуг и желобов имеют очень важное значение для новой теории тектоники плит. Если мантия поднимается к земной поверхности, образуя срединно-океанические хребты, и если океанические плиты, рождающиеся на гребнях таких хребтов, разрастаются горизонтально, то должны существовать зоны, в которых растущая океаническая плита опускается обратно в глубины мантии. Иначе поверхность Земли должна со временем увеличиваться. И в самом деле, некоторые ученые, например С. У. Кэри (Австралия) и Б. Хейзен, предлагали такие модели расширяющейся Земли. Но имеется множество данных, категорически противоречащих этой гипотезе. Земля не «раздувается». Как показывает анализ карты мира, вероятнее всего, что системы островных дуг и глубоководных желобов как раз и являются теми зонами, где происходит субдукция. Тщательное изучение этих систем имеет поэтому важнейшее значение для понимания мобилистского взгляда на развитие Земли.

Мысль о том, что системы островных дуг и желобов — это те «станции», где заканчивается путешествие океанического дна, не нова. Хотя теория тектоники плит существует всего несколько

рений силы тяжести в различных районах океана. В свою очередь японские ученые, хотя они по традиции не склонны выдвигать чересчур радикальные гипотезы, накопили в процессе своих пионерских работ множество важных материалов; их результаты были существенным вкладом в развитие смелой идеи, которая приобрела затем поистине грандиозный размах.

ЯПОНСКИЕ ОСТРОВА¹

Японские острова — типичный для земного шара пример островных дуг. Они достаточно хорошо изучены, и поэтому (а также потому, что я сам лучше всего знаком именно с этой островной дугой) Японская островная дуга и будет главной темой обсуждения в данной главе. Однако многие из ее особенностей характерны и для других дуг.

Начнем с самого важного фактора — с топографии. Как хорошо видно на рис. 5-2, Японские острова имеют дугообразную форму. Если судить по расположению островов, их можно объединить в четыре дуги: Курильскую, Хонсю, Рюкю и Идзу-Бонинскую — Марианскую (рис. 5-1). Если же учесть при этом контуры подводного рельефа, становится ясно, что такое группирование не вполне верно. Названия «море» и «суша» относятся просто к площадям, которые располагаются в настоящее время ниже или выше уровня океана. Гораздо лучшую возможность постичь значение существования островных дуг дает нам подводный рельеф. Хороший пример этого — Японский глубоководный желоб. Как показывают изолинии рельефа на рис. 5-2, самые высокие в Японии горы достигают только 2 тыс. м над уровнем моря, тогда как рельеф Курильского и Японского желобов, а также Идзу-Бонинского — Марианского желоба выражен значительно сильнее: глубина всех этих трех желобов превышает 6 тыс. м. Анализ рельефа суши и морского дна показывает, что в действительности Японские острова включают две островодужные системы: одна из них объединяет Курильскую дугу, дугу северо-восточного Хонсю и Идзу-Бонинскую — Марианскую дугу (мы будем называть их *Восточными Японскими дугами*), а другая — дуги Рюкю, Кюсю, Сикоку и западного Хонсю (*Западные Японские дуги*). Таким образом, хотя остров Хонсю выглядит как единая дуга, в настоящее время он считается местом, где встречаются две системы крупных дуг.

Первым, кто высказал идею о том, что Японские острова группируются в две системы, был А. Сугимура из Токийского университета. Эта идея может показаться искусственной, но, рассмотрев все существующие здесь геологические и геофизические условия, мы ясно увидим, что она вполне обоснованна.

¹ Материал этого раздела рассматривается более подробно в опубликованной в 1973 г. книге А. Сугимура и С. Уэда [44].

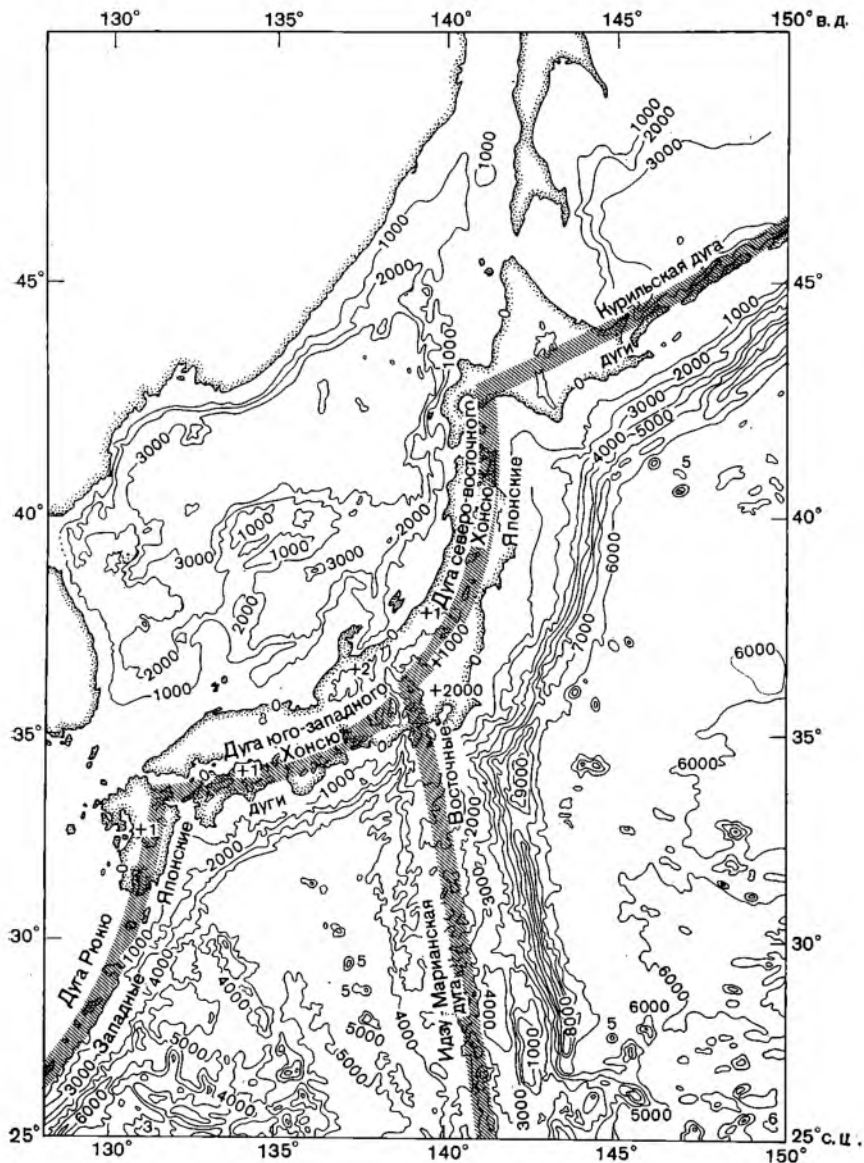


Рис. 5-2. Топография Японских островов и окружающих районов (изолинии проведены через 1000 м) и группирование островов в островодужные системы [44].

Одна из важных отличительных черт каждой островной дуги — море, находящееся между цепочкой островов и континентом; таковы, например, Японское, Охотское и Филиппинское моря (рис. 5-1). Эти небольшие морские бассейны называются *окраинными морями*, или, более точно, их можно было бы назвать *тыловыми островодужными морями*, так как их происхождение теснейшим образом связано с происхождением и развитием островных дуг.

АНОМАЛИИ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Как отмечалось раньше, измерения силы тяжести, выполненные Венинг-Мейнесом, раскрыли значение островных дуг. Сила тяжести — это та сила, которая притягивает предметы к центру Земли в результате всемирного тяготения. (Чтобы упростить обсуждение этого вопроса, пренебрежем здесь небольшой центробежной силой, создаваемой вращением Земли.) Если бы Земля была совершенно однородным сферическим телом, то сила тяжести была бы одинаковой во всех точках на ее поверхности. Однако фактические измерения показывают, что эта сила изменчива: она больше в одних местах и меньше — в других. Разность между *фактической* измеренной величиной силы тяжести и теоретически *ожидаемой* величиной называется *аномалией силы тяжести*, или *гравитационной аномалией*; эта разность свидетельствует о неоднородном распределении масс в недрах Земли. Горные породы, слагающие материки, гораздо тяжелее морской воды и поэтому создают большее гравитационное притяжение. Следовательно, если топография суши и морского дна известна, можно подсчитать, на какую величину над океаном сила тяжести меньше, чем над сушей. Но величина гравитационного притяжения зависит также от расстояния между массой и точкой, где производится измерение. Хорошо известно, что сила тяжести уменьшается с удалением от центра Земли. Таким образом, сила тяжести, измеренная, допустим, на вершине горы, представляет собой результат совместного действия двух противоположных факторов: усиления притяжения, обусловленного тем, что гора состоит из камня, а не из воздуха, и ослабления притяжения вследствие большего расстояния от вершины горы до центра Земли. Указанные факторы меняют знак, если измерения проводятся на поверхности океана. Это означает, что, перед тем как пытаться использовать аномалии силы тяжести для получения сведений о недрах Земли, надо провести некоторую обработку «сырых» материалов измерений.

Прежде всего учитывается высота того места, где измеряется сила тяжести, и результаты измерения приводятся к какому-то стандартному уровню, обычно к уровню моря. Эта процедура называется введением высотной поправки, или поправкой в *свободном воздухе*. Затем из полученного результата вычитается

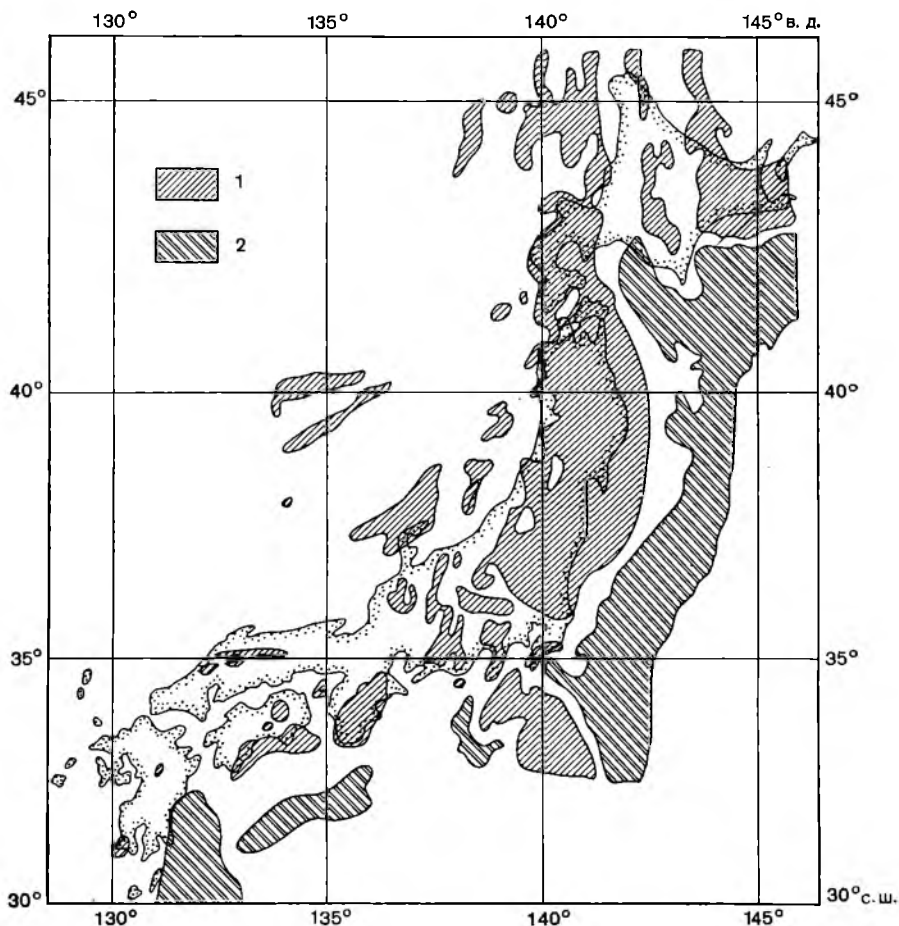


Рис. 5-3. Аномалии силы тяжести в свободном воздухе для Японии и окружающих районов (Y. Tomoda, Gravity anomalies in the Pacific Ocean, в кн. P. J. Coleman, ed., "The Western Pacific: Island Arcs. Marginal Seas, in Geochemistry", University of Western Australia Press, 1973).

1 — положительные гравитационные аномалии величиной выше +50 мгал; 2 — отрицательные аномалии ниже -50 мгал. Миллигал (мгал) — наиболее подходящая единица для измерения аномалий силы тяжести. Средняя величина гравитационного поля Земли составляет около 980 гал.

теоретическое значение силы тяжести — значение, которое могло бы быть получено в случае совершенно однородного строения Земли. Разность называется *гравитационной аномалией в свободном воздухе* (или аномалией в редукции Фая. — Прим. перев.). На рис. 5-3 показано распределение аномалий в свободном воздухе в Японии и в окружающих ее районах. Обратите внимание на широкий пояс отрицательных гравитационных анома-

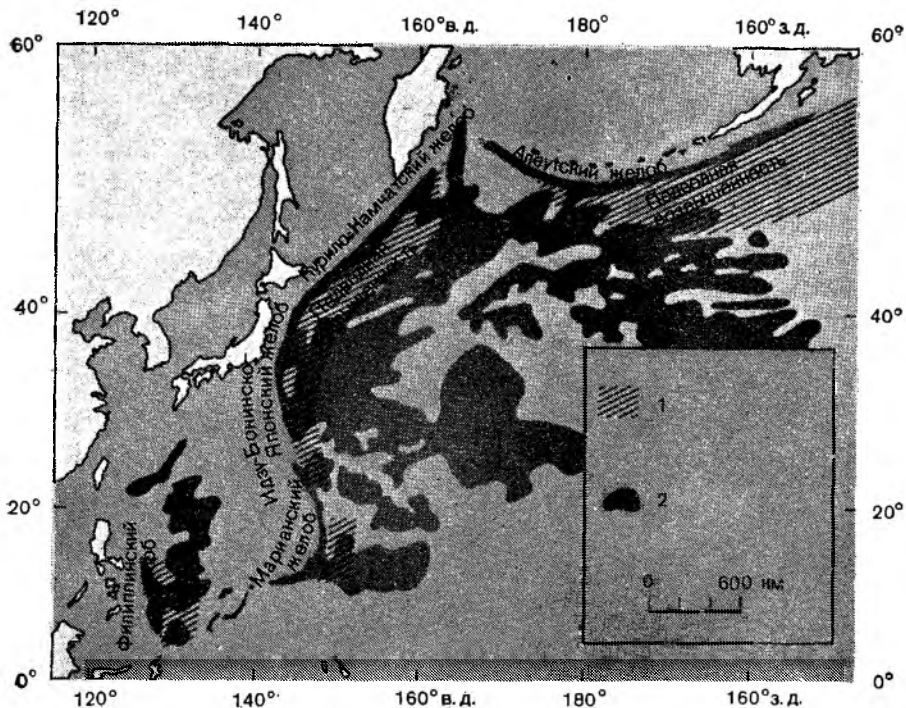


Рис. 5-4. Пояса положительных аномалий силы тяжести на площадях, прилегающих к желобам со стороны океана, и общая батиметрия северо-западного района Тихого океана (A. B. Watts, M. Talwani, Gravity anomalies seaward of deep-sea trenches and their tectonic implications, Geophys. J., 36, p. 57, 1974). Заметим, что положительные аномалии имеют наибольшую ширину на площадях, прилегающих со стороны океана к центральной и восточной частям Алеутского желоба, и наименьшую ширину — у Марианского желоба.
 1 — зоны положительных гравитационных аномалий, прилегающие к желобам со стороны океана; 2 — глубина более 5500 м.

лий в районе Японского желоба. Ось пояса слегка смещена от оси желоба к континенту. Частично эта аномалия связана с тем, что желоб заполнен водой, а не горными породами. Однако величина отрицательных аномалий здесь больше той, которую можно было бы объяснить этими условиями. Следовательно, материал с низкой плотностью присутствует в данном районе и *ниже* морского дна.

Такой результат вызывает изумление, поскольку это явное нарушение закона изостазии, который, как мы видели в гл. 1, выведен из того факта, что почти везде на земном шаре океаническая и континентальная кора «плавает» в мантии подобно тому, как айсберги плавают в воде. Отрицательные аномалии означают, что в желобах гравитационного равновесия не существует. Если бы здесь не действовала какая-то направленная вниз сила,

дно глубоководных желобов должно было подняться, и тогда бы равновесие восстановилось. Необходимость присутствия такой силы проще понять, если мы мысленно попробуем утопить бревно: мы должны бы были либо заталкивать его в воду сверху, либо тянуть снизу. Поскольку очевидно, что нет никакой силы, которая действовала бы на желоба сверху, остается только одна возможность — на океаническое дно действует какая-то тянущая вниз сила, источник которой находится внутри Земли. Согласно теории конвекционного течения в мантии, этой силой является сила волочения, создаваемая нисходящим потоком мантийного материала. Зоны отрицательных гравитационных аномалий, таких же, как в районе Японского желоба, характерны для всех глубоководных желобов земного шара.

В 1974 г. А. Уоттс и М. Тальвани опубликовали интересные результаты изучения гравитационных аномалий, которые обнаружены в районах, прилегающих к желобам со стороны океана. В таких районах в рельефе дна часто видны протяженные возвышенности, выступающие над средним уровнем дна на несколько сот метров. Уоттс и Тальвани установили, что аномалии силы тяжести здесь также связаны с нарушением изостатического равновесия. Опять же, как и по отношению к желобам, мы должны заключить, что эти поднятия поддерживаются действием какой-то силы — только в данном случае силы, направленной вверх. Существующие здесь положительные изостатические аномалии Уоттс и Тальвани приписали изгибу океанической плиты, которая при приближении к желобам испытывает сильное сжатие. Такая интерпретация кажется правдоподобной, по крайней мере качественно, если принять во внимание, что в желобах океанические плиты должны с силой заталкиваться в мантию (рис. 5-4).

ПОЧЕМУ ВОЗНИКАЮТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ?

Другое свойство островных дуг — сейсмичность. Как видно на рис. 2-4, эпицентры землетрясений распределены не хаотично, а сосредоточены в островных дугах, окружающих Тихий океан, в Альпийско-Гималайских орогенических поясах и в системах срединно-океанических хребтов. Если не касаться подробного анализа их механизма, то можно сказать, что землетрясения возникают в том случае, когда в коре или верхней мантии в результате действия каких-то внутренних сил происходит резкое смещение. Следовательно, распределение эпицентров землетрясений, показанное на рис. 2-4, означает, что этот процесс развивается главным образом в системах срединно-океанических хребтов, в островных дугах и в орогенических поясах.

Имеются, однако, большие различия между землетрясениями, возникающими в островодужных системах и в срединно-океанических хребтах; одно из этих различий — глубина очагов.

Глубокофокусные землетрясения. Эти землетрясения происходят только в районах островных дуг¹, как это хорошо видно, если сравнить рис. 5-5 (где показано размещение эпицентров глубокофокусных землетрясений) и рис. 2-4 (где показаны эпицентры всех землетрясений). Рассмотрим теперь более внимательно размещение глубокофокусных землетрясений на примере района Японии. На рис. 5-6, *а* показано распределение эпицентров землетрясений этого района. За некоторыми исключениями, относящимися к площади Японского моря, почти все землетрясения имели глубину очагов меньше 60 км (сейсмологи часто называют такие землетрясения *нормальными*. — *Прим. перев.*). На рис. 5-6, *б* показаны эпицентры промежуточных и глубокофокусных землетрясений². Как явствует из обеих карт, приведенных на рис. 5-6, даже в районах островных дуг главная часть сейсмической активности связана с возникновением очагов землетрясений на малых глубинах.

В этом разделе мы рассмотрим вначале землетрясения с глубокими очагами. Следует обратить внимание на то, что глубина очагов (рис. 5-6) увеличивается в направлении к континенту. Наибольшая глубина их (вблизи Тихоокеанского побережья Сибири) — около 500 км. Такое изменение глубины очагов землетрясений — замечательная особенность островодужных землетрясений; для сравнения заметим, что в пределах срединно-океанических хребтов все землетрясения относятся к категории нормальных, мелкофокусных.

Как следует из рис. 5-6, *б*, гипоцентры глубоких землетрясений располагаются на некоторой уходящей вниз плоскости, наклоненной в сторону континента. Существование глубокофокусных землетрясений и характер их размещения были открыты в 1930-х годах японским ученым К. Вадати и его сотрудниками. Позднее американец Х. Беньоф продолжил изучение этого вопроса и подчеркнул большое значение наклонных плоскостей, вдоль которых размещаются очаги землетрясений, так что эти плоскости стали известны как *зоны Беньофа*. Лично я предпочитаю называть их *зонами Вадати — Беньофа*, воздавая должное моему соотечественнику.

В чем же заключается значение наклонной зоны глубокофокусных землетрясений? Прежде всего для возникновения сейсмических волн необходимо, чтобы разрыв произошел достаточно резко, а значит, материал должен быть хрупким. Экспериментальные данные показывают, что при высоких температурах и

¹ Важным исключением является Испанское глубокофокусное землетрясение 29 марта 1954 г. (глубина очага 630 км.).

² Землетрясения, возникающие на глубинах более 60 км, делятся на две категории: промежуточные, с глубиной очага 60 — 300 км, и глубокофокусные, возникающие на глубинах более 300 км. В некоторых случаях, когда это различие не имеет существенного значения, мы будем для простоты называть землетрясения обоих типов глубокофокусными.

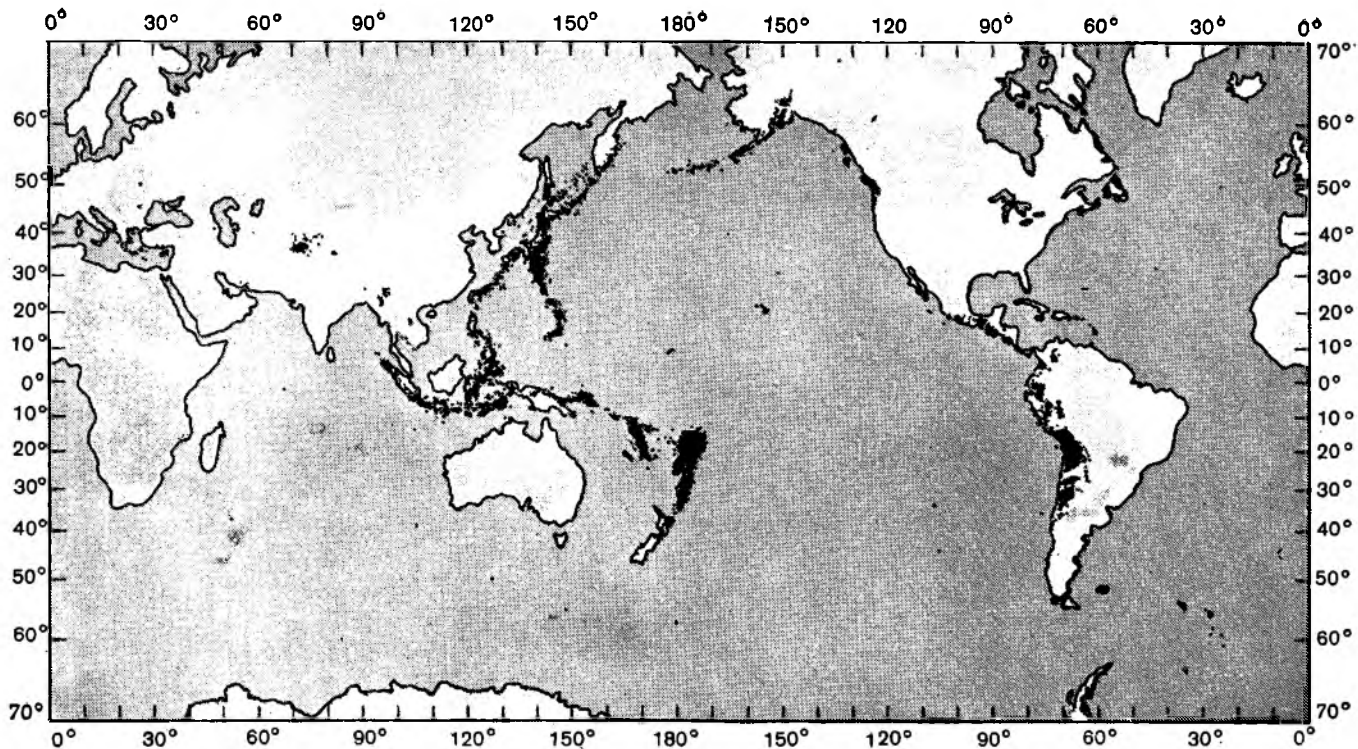
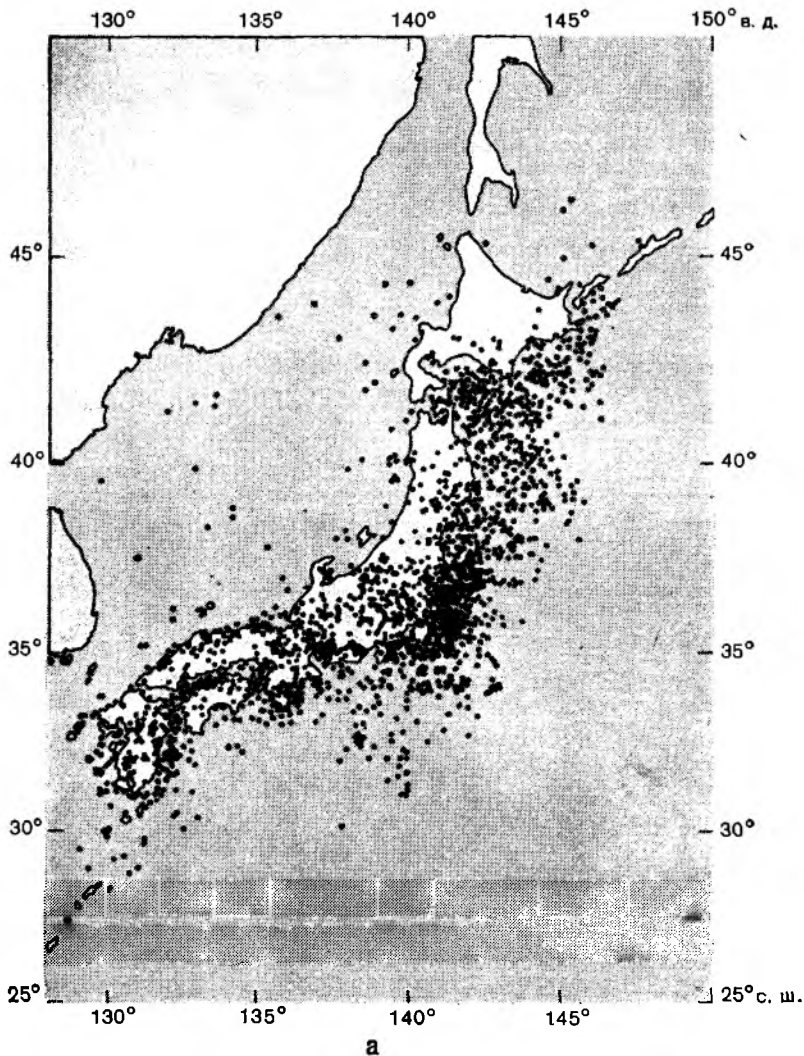


Рис. 5-5. Размещение эпицентров землетрясений с глубинами очагов более 100 км, 1961—1967 гг. (M. Barazangi, J. Dorman, World seismicity map compiled from ESSA Coast and Geodetic Survey Epicenter Data, 1961—1967, Bull. Seismol. Soc. Amer., 59, p. 369, 1969).

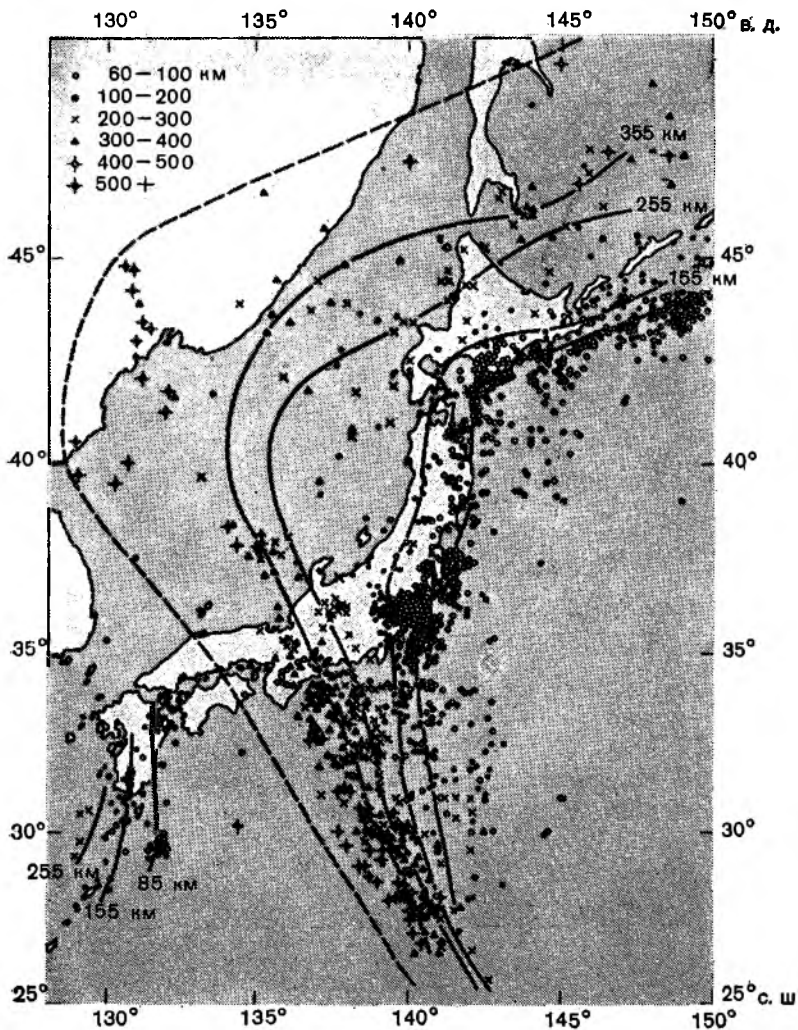


а

Рис. 5-6.

а. Эпицентры землетрясений (с магнитудой больше 4) в районе Японии за исключением землетрясений на площади Японского моря (объяснение б. Эпицентры промежуточных и глубоководных землетрясений,

давлениях породы теряют свою хрупкость и испытывают текучесть, а не дробление. Таким образом, то, что землетрясения все-таки возникают на больших глубинах, где мантия горячая и находится под большим давлением, представляет собой загадку. Однако известно, что при низких температурах породы обычно сохраняют свою хрупкость даже в условиях высоких давлений;



б

1900—1950 гг. Большинство этих землетрясений — мелкофокусные, понятия магнитуды см. в тексте, стр. 141).
 1928—1962 гг. (Japan Meteorological Agency, 1958, 1966).

следовательно, разумно предположить, что вдоль зоны Вадати — Бенъофа температура должна быть необычно низкой. Но, очевидно, тонкая наклонная зона не может долгое время сохранять температуру ниже, чем окружающая мантия, так как горячая мантия быстро нагревает ее. Эта зона может оставаться достаточно холодной, только если она постоянно снабжается новым хо-

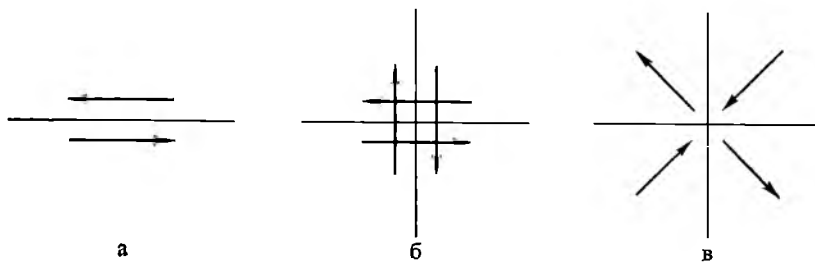


Рис. 5-7. Предлагавшиеся модели сил, действующих в очаге землетрясения.

лодным материалом в виде опускающейся литосферной плиты. На это обстоятельство впервые (в 1969 г.) специально указал в своей модели тектоники плит Д. Мак-Кензи. Он рассчитал, что, если холодная плита соответствующей толщины (70—100 км) погружается в мантию со скоростью несколько сантиметров в год, средняя часть плиты может оставаться холодной до глубины 600—700 км, т. е. до уровня очагов самых глубоких землетрясений. Наоборот, под срединно-океаническими хребтами, где горячий мантийный материал находится в процессе непрерывного подъема, возникают только мелкофокусные землетрясения, так как горные породы там оказываются текучими уже на небольших глубинах.

Таким образом, само возникновение глубоких землетрясений свидетельствует в пользу субдукции холодных плит. Кроме того, согласно модели Мак-Кензи, очаги глубоких землетрясений должны образовываться в средней части погружающейся плиты. До создания этой модели обычно считалось, что глубокие землетрясения возникают на границе между опускающейся плитой и окружающей ее мантией. Значение этого различия для теоретических построений обсуждается на стр. 137.

Чтобы возник очаг землетрясения, помимо хрупкости материала должны существовать и большие напряжения, сведения о которых получают путем анализа механизмов землетрясений. Изучая направление первых вступлений сейсмических волн, можно оценить ориентировку напряжений, вызвавших образование разрыва в очаге землетрясения (см. стр. 79). Основы изучения механизмов землетрясений были заложены уже в 1930-х годах японским ученым Х. Хонда и его коллегами. В то время многие западные сейсмологи считали, что землетрясения возникают в результате действия *пары сил*, т. е. двух сил, равных по величине и противоположных по направлению (рис. 5-7, а). Но Хонда и др. показали, что причиной землетрясений является *двойная пара* (рис. 5-7, б), т. е. две пары сил, ориентированные перпендикулярно одна другой. Геометрическая двойная пара, изображенная на рис. 5-7, б, эквивалентна паре сил сжатия и растяжения, изображенной на рис. 5-7, в. Предположение о двойной паре тео-

ретически более обоснованно, чем идея о простой паре сил, но концепция, выдвинутая Хонда, была окончательно принята только после долгих споров. Она не получила сразу мирового признания прежде всего потому, что невозможно было сделать выбор между моделями простой и двойной пары сил только по наблюдениям первых вступлений продольных волн. Достоверность модели двойной пары окончательно подтвердилась при изучении поля первых вступлений поперечных волн. Детальный анализ первых вступлений S -волн — дело трудное, так как ко времени их прихода на сейсмограммах уже фиксируются P -волны, и четко выделить момент прихода поперечных волн бывает очень сложно. Успехи японских ученых в этом исследовании связаны, по-видимому, с тем, что частые землетрясения потребовали создания плотной сети сейсмографов по всей Японии, что и позволило получать правильные решения механизмов землетрясений.

Ориентировка двух пар сил, определяемая в результате анализа сейсмических волн, показывает направление сил, действующих в очаге в момент землетрясения, т. е. сил, вызывающих землетрясение. На рис. 5-8 показана ориентировка сил сжатия в районе Японии. Направление этих сил, действующих в очагах глубокофокусных землетрясений, проецируется на горизонтальную плоскость. Из рисунка ясно, что в пространственном распределении этих сил существует закономерность: направление осей сжатия перпендикулярно направлению дуги. Это также, по-видимому, доказывает, что поле напряжений согласуется с представлениями тектоники плит.

Однако картина будет не столь проста, если мы рассмотрим распределение напряжений в вертикальном разрезе через погружающуюся пластину. На рис. 5-9 показаны направления сжимающего напряжения между точками A и B (рис. 5-8) в проекции на вертикальную плоскость, проведенную перпендикулярно желобу. Мы видим, что оси сжатия параллельны плоскости погружающейся пластины, положение которой определяется по сейсмологическим данным. Что это означает? Если океан и континент (на рис. 5-9 соответственно слева и справа) при встречном движении давят друг на друга, не следует ли ожидать, что сжимающее напряжение будет горизонтальным? Однако фактически это напряжение оказывается ориентированным *по падению*, т. е. параллельно сейсмической плоскости и, значит, наклону пластины. Это кажущееся противоречие долгое время не давало покоя многим ученым, в том числе и мне. Затем, в 1969 г. Б. Айзекс и П. Молнар обнаружили, что под многими другими дугами сжимающие напряжения также направлены по падению, но иногда параллельно наклону пластины ориентируется ось растяжения, а не сжатия (рис. 5-10, a).

Тектоника плит дает простое и ясное решение и для этой проблемы. Айзекс и Молнар объясняли обнаруженное ими явление следующим образом: пластина, погружаясь, встречает сопро-

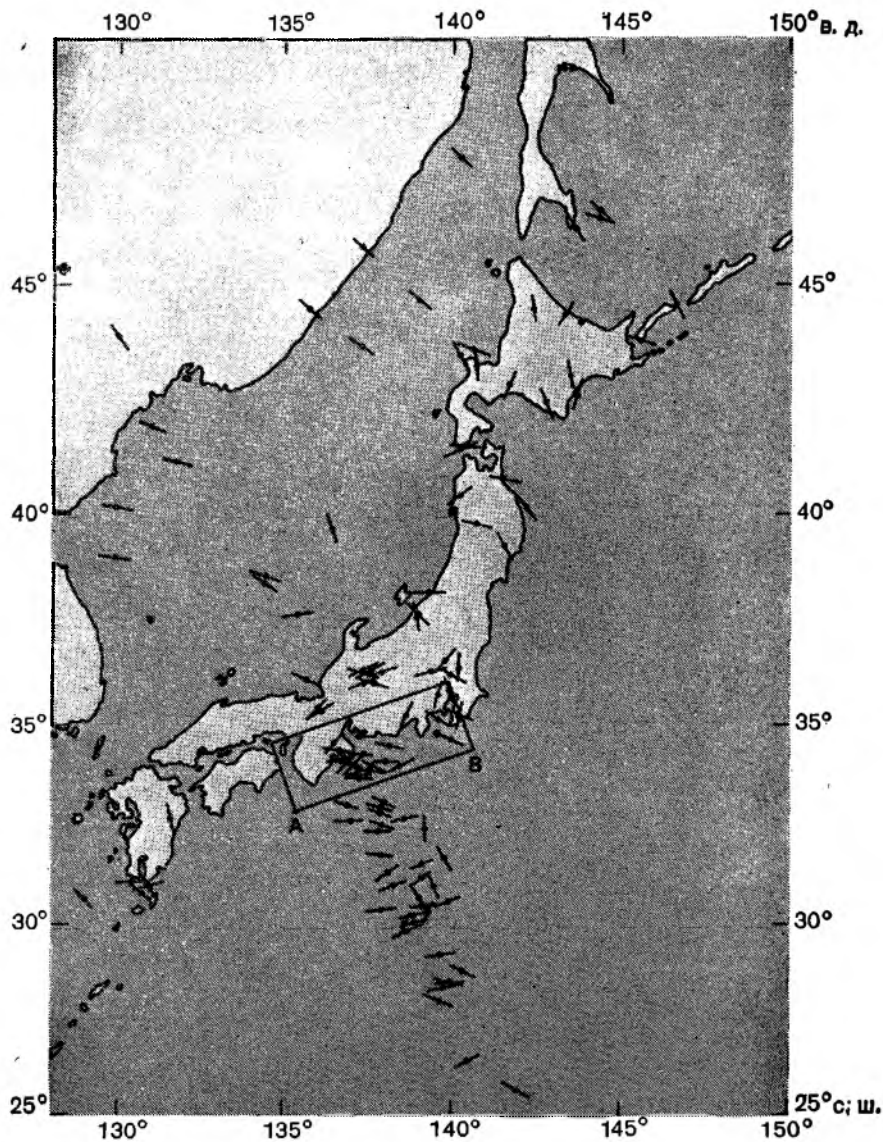


Рис. 5-8. Направление максимального горизонтального сжатия в очагах промежуточных и глубоководных землетрясений (*H. Honda*, On the mechanism of deep earthquakes and the stress in the deep layer of the earth crust, *Geophys. Mag.*, Japan Meteorological Agency, 8, p. 179, 1934; *M. Ichikawa*, Mechanism of the earthquakes in and near Japan, 1950—1962, *Papers Meteorol. Geophys.*, 16, p. 201, 1966).

Ориентировка напряжения показана штрихами, проведенными через эпицентры. Объяснение прямоугольника *AB* дано на рис. 5-9.

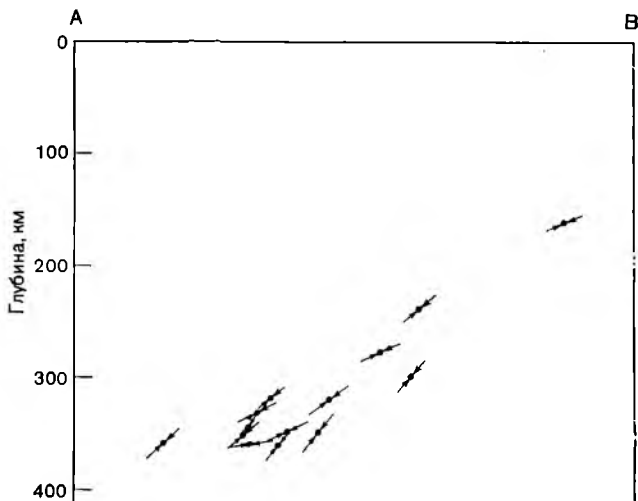
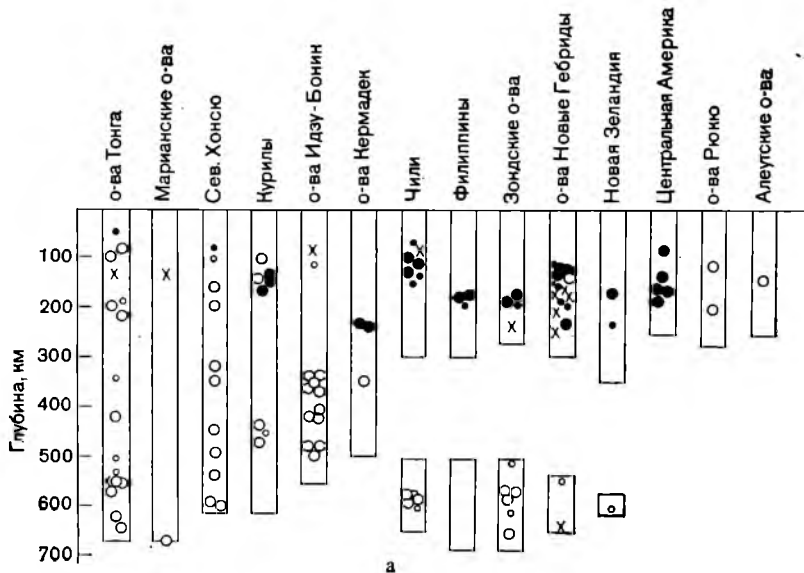


Рис. 5-9. Направление главного сжимающего напряжения в очагах промежуточных и глубоководных землетрясений в проекции на вертикальную плоскость, проведенную через линию *AB* (показана на рис. 5-8) (*H. Honda et al.*, On the mechanism of earthquakes and the stresses producing them in Japan and its vicinity, *Geophys. Mag.*, Japan Meteorological Agency, 33, p. 27, 1967).

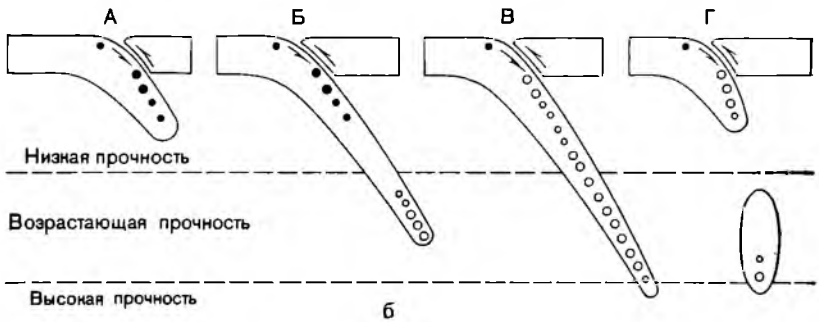
тивление со стороны более глубокой, прочной мантии, как это показано на рис. 5-10, б. Кроме того, землетрясения возникают в *средней* части плиты, или пластины, а не на ее границе с мантией (см. стр. 136). Таким образом, вполне естественно изображать силу сопротивления, действующую на погружающуюся пластину, параллельной этой пластине. Отметим здесь, что мантия сравнительно податлива в астеносфере, но на глубинах, скажем, 500—700 км она становится прочнее. Как мы увидим в следующей главе, теперь считается, что погружающаяся пластина «тонет» под действием собственного веса, так что, если внешнее сопротивление мало, в ней происходит растяжение. Это объясняет распределение напряжений, показанное на рис. 5-10, б (схемы *A*, *B* и *Г*).

Мелкофокусные землетрясения. Мелкофокусные землетрясения значительно более эффектны, потому что во время этих землетрясений выделяется гораздо большая энергия, и, следовательно, их воздействие на человеческое общество гораздо сильнее.

Величина землетрясения чаще всего выражается его магнитудой (*M*). Мы привыкли считать землетрясения, при которых происходят сильные колебания — сильными, а при которых возникают слабые колебания — слабыми, но это не совсем точно, потому что, каким бы сильным ни было землетрясение, никто не сможет ощутить его толчки, если оно возникло где-то очень дале-



а



б

Рис. 5-10.

а. Тип напряжений, ориентированных по падению сейсмической зоны, как функция глубины для 14 различных районов. Темными кружками обозначено растягивающее напряжение, светлыми — сжимающее; крестиками обозначены случаи, когда ориентировка напряжений не отвечает ни тому, ни другому виду. Маленькими кружками показаны напряжения, ориентировка которых определена неточно, прямоугольниками — приблизительное распределение очагов землетрясений в зависимости от глубины (показана максимальная глубина и наличие промежутков между отдельными скоплениями очагов).

б. Схемы возможного распределения напряжений в пластинах литосферы, погружающихся в астеносферу (А) и упирающихся в ее днище (Б и В). На схеме Г показаны пластина и оторвавшийся от нее кусок. Обозначения для разных видов напряжений те же, что и на рис. 5-10, а. На схемах Б и Г показаны предполагаемые промежутки между скоплениями очагов. Показаны также направление поддвижения и растягивающие напряжения, возникающие в верхней части пластины вследствие ее изгиба под желобом. Данные получены путем анализа механизмов мелкофокусных землетрясений (дальнейшее объяснение см. в тексте) (B. Isacks, P. Molnar, Mantle earthquake mechanisms and the sinking of the lithosphere, Nature, 223, p. 1121, 1969).

ко. Как яркость двух ламп можно точно сравнить только тогда, когда эти лампы находятся на одинаковом расстоянии от глаз наблюдателя, так и величину двух землетрясений можно сравнить по ощущаемым сотрясениям грунта только в том случае, если наблюдения производятся на равном расстоянии от гипоцентров обоих землетрясений.

Магнитуда землетрясений обычно определяется по стандартной методике, разработанной Ч. Рихтером и Б. Гутенбергом. По шкале магнитуд Рихтера возрастанию магнитуды на единицу соответствует 30-кратное увеличение сейсмической энергии. Известное землетрясение 1906 г. в Сан-Франциско имело магнитуду $8\frac{1}{4}$; великое землетрясение Канто (Япония, 1923 г.) — 8,2; Чилийское землетрясение 1960 г. — 8,4. Землетрясений с магнитудой больше 8,7 не отмечалось никогда.

Сейсмическая энергия, выделяющаяся при землетрясении с магнитудой 8, составляет приблизительно 10^{25} эрг¹, что равно энергии 10 тысяч атомных бомб, подобных той, которая была сброшена на Хиросиму.

Землетрясения с магнитудой больше 7,5 называют *сильнейшими* («великими»). Все они мелкофокусные и чаще всего возникают в Циркумтихоокеанском сейсмическом поясе. В районах срединно-океанических хребтов сильнейшие землетрясения неизвестны. В этом заключается еще одно большое различие между системами островных дуг и срединно-океанических хребтов.

Как возникают мелкофокусные землетрясения в островодужных системах? На основе анализа сейсмограмм сильнейших землетрясений и последних достижений теоретической сейсмологии можно оценить не только направление подвижки по разрыву, вызывающей землетрясение, но и величину этой подвижки и даже размер самого разрыва. Х. Канамори и др. провели исчерпывающее изучение сильнейших землетрясений, происходивших в сейсмичных районах Тихоокеанского кольца. Они доказали, что землетрясения возникают в основном в условиях, когда дно Тихого океана поддвигается под блоки земной коры на континентальной стороне желобов, и что относительная подвижка по разрывам составляет несколько метров.

Тем временем С. А. Федотов (СССР), К. Моги (Япония) и Л. Сайкс (США) установили, что области очагов сильнейших землетрясений исторического времени образуют овальные пятна, в грубом приближении параллельные дугам. Эти пятна выстраиваются в полосы, но с многочисленными промежутками, «дырами», в которых вспарывания разрыва не происходило в течение всего того времени, о котором у нас есть сведения. Более того, сейсмологи показали, что очаговые зоны более поздних землетрясений, как правило, не перекрывают друг друга, а как бы заполняют эти «дыры» (рис. 5-11). Федотов, Моги и Сайкс указы-

¹ Эрг — единица измерения энергии: 10^7 эрг равны 0,239 кал.

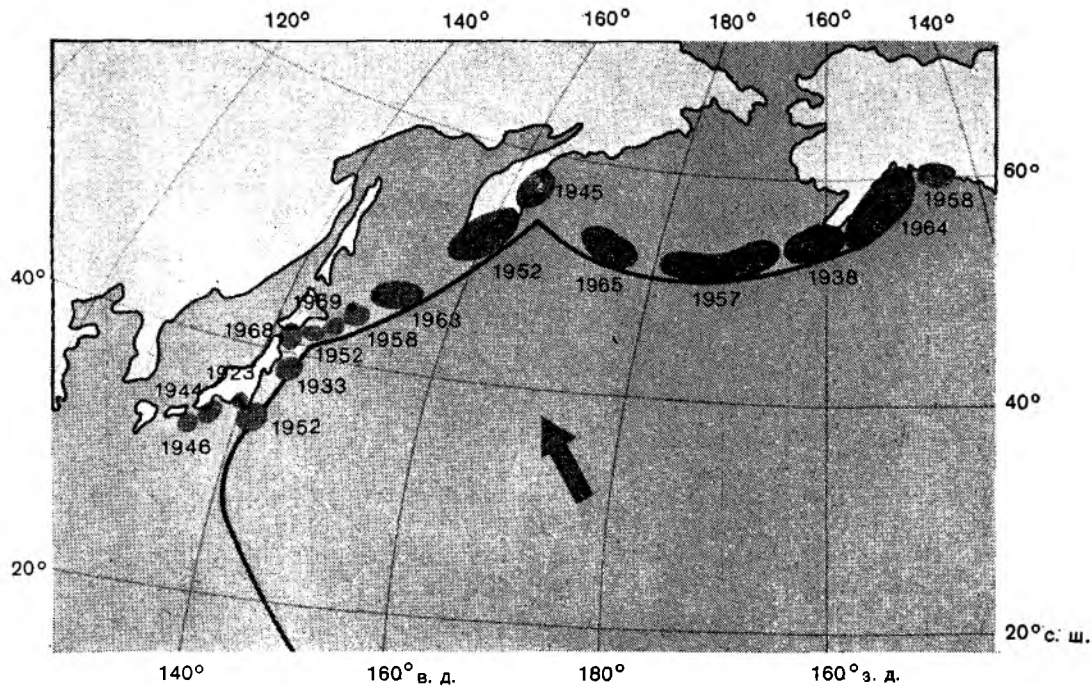


Рис. 5-11. Размещение очаговых зон сильнейших землетрясений вдоль северо-западной окраины Тихого океана, установленное по площадям афтершоков (К. Mogi, Sequential occurrences of recent great earthquakes, Н. Phys. Earth, 16, р. 30, 1968). Для каждой зоны дан год землетрясения. Стрелкой показано приблизительное направление движения Тихоокеанской плиты относительно Евразийской и Американской плит.

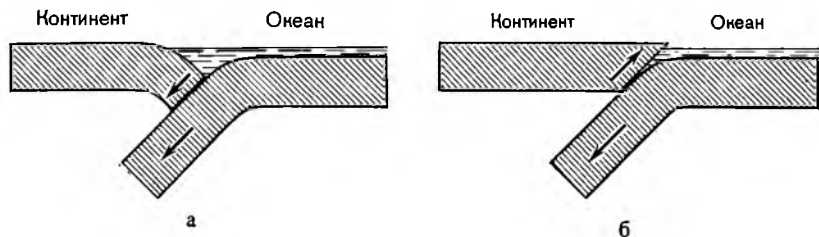


Рис. 5-12. Предполагаемый характер движений под островными дугами: а — в период между землетрясениями; б — во время землетрясения.

вают также, что время между сильнейшими землетрясениями, возникающими на одной и той же площади, составляет около 100 лет.

Здесь следует упомянуть еще один поразительный факт. Уже давно известно, что каждое сильнейшее землетрясение, происходящее в Японии, вызывает поднятие ее тихоокеанского побережья на несколько метров. Но в период между землетрясениями берег постепенно опускается.

Если мы соберем воедино изложенные выше данные, то вывод, который будет здесь сделан, не должен показаться слишком искусственным: в период между землетрясениями дно Тихого океана продолжает поддвигаться под Японские острова на несколько сантиметров в год, увлекая за собой вниз и континентальную кору островов. Когда деформация, вызванная этим волочением, достигает критической величины, на границе между континентальной корой островов и океанической корой происходит проскальзывание, в результате чего кора островов рывком возвращается в прежнее положение, т. е. поднимается (рис. 5-12). Предположив, что средняя скорость поддвижения составляет 5 см/год, а период между землетрясениями — 100 лет, получаем, что величина проскальзывания будет равна 5 м. Это число прекрасно согласуется с величиной подвижки по разрыву (несколько метров), оцениваемой по анализу сейсмических волн сильнейших землетрясений.

То обстоятельство, что такие очаговые зоны постепенно заполняют всю Циркумтихоокеанскую зону, также, очевидно, подтверждает теорию тектоники плит, так как это доказывает, что вся жесткая Тихоокеанская плита поддвигается под континентальную плиту.

Кратко суммируя данные о различии между мелкофокусными и глубокими землетрясениями, заметим, что мелкофокусные землетрясения, происходящие в районах островных дуг, — это *межплитовые* землетрясения, которые возникают в результате взаимодействия океанической плиты с плитой, расположенной ближе к матерiku, т. е. в результате поддвижения первой плиты

под вторую, тогда как глубокофокусные землетрясения можно назвать *внутриплитовыми*¹, потому что они возникают внутри поддвигающейся пластины. Происхождение землетрясений на границах другого типа (на границах раздвижения плит и на трансформных разломах) уже нами рассматривалось (см. стр. 80).

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ ЯПОНСКИХ ОСТРОВОВ

Мы видели, что гравитационные аномалии указывают на то, что в районах островных дуг существует, по-видимому, некоторая сила, помимо силы тяжести, которая тянет дно желобов в глубь Земли. Для проверки такого предположения требуется, конечно, другой метод наблюдений: определение структуры коры путем анализа сейсмических волн. Залегающие на глубине слои горных пород, различающиеся по своим свойствам, можно обнаружить с помощью сейсмографов, так как распространение сейсмических волн на таких участках происходит необычным образом. Этот метод называется сейсморазведкой, он давно уже используется для поисков нефти и других полезных ископаемых. Однако для чисто научных целей — для изучения структуры коры до глубины во много десятков километров — этот метод стал широко использоваться только после второй мировой войны. В 1947 г. на одном из островов Атлантического океана был произведен большой взрыв, просто с целью избавиться от взрывчатого вещества.

Это событие, давшее европейским сейсмологам возможность наблюдать одновременно в разных точках континента сейсмические волны, вызванные этим взрывом, стало первым в мире крупным экспериментом по взрывной сейсмологии².

В Японии в 1950 г. была организована Исследовательская группа по взрывной сейсмологии, которая с тех пор активно занимается изучением коры и верхней мантии. Согласно результатам этих работ, кора Японских островов содержит, по-видимому, следующие слои: верхний слой мощностью несколько километров со скоростью продольных волн 5,5 км/с и второй слой мощностью 10—30 км со скоростью продольных волн 6,0—6,6 км/с. Этот второй слой можно разделить на два слоя — гранитный и базальтовый. Таким образом, кора Японских островов имеет почти континентальный облик. Было также установлено, что скорость продольных волн в самых верхних горизонтах мантии

¹ Внутриплитовыми (intraplate) землетрясениями часто называют (в работах по тектонике плит) те землетрясения, которые возникают во внутренних районах материков, вдали от границ плит. — *Прим. перев.*

² В результате этого взрыва впервые удалось собрать сведения о глубинной структуре Европейского континента, так как информацию такого рода можно получить только путем наблюдения сейсмических волн на некотором удалении от их источника: чем дальше наблюдатель от этого источника, тем больше глубинность наблюдений.

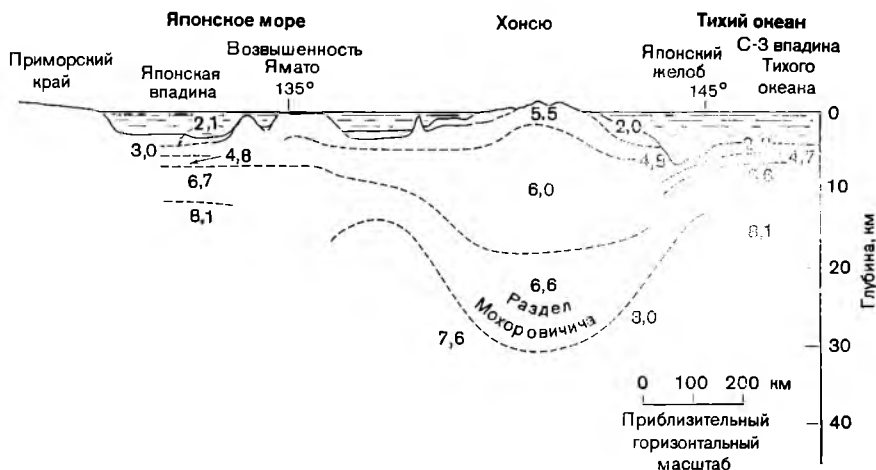


Рис. 5-13. Разрез земной коры через северо-восточную Японию (S. Murauchi, M. Yasui, Geophysical investigations in the seas around Japan, Kagaku, 38, p. 196, 1968).

Цифрами показана скорость продольных волн (в км/с). Там, где данные неполные, границы слоев земной коры обозначены штриховыми линиями.

(сразу же под разделом Моховоричича) составляет 7,6—8,0 км/с. Величина 7,6 км/с значительно меньше мирового среднего значения (8,0—8,2 км/с). Эти важные результаты иллюстрируются разрезом земной коры, показанным на рис. 5-13. Как можно видеть на этом рисунке, кора под Тихим океаном много тоньше 30-километровой коры, подстилающей Японские острова. Кора под Японским морем также имеет небольшую толщину, особенно в районе так называемой Японской впадины. Там глубина моря около 3500 м, а кора почти такая же тонкая, как в Тихом океане. В районе подводной возвышенности Ямато (в юго-западной части Японского моря) кора имеет большую толщину и похожа на континентальную.

В целом толщина коры явно оказывается меньше в областях глубоководных впадин, но этот вывод неприемлем в отношении желобов. На рисунке видно, что кора под Японским желобом не тоньше, чем под впадиной Тихого океана. Это еще более подтверждает сделанный в результате измерений силы тяжести вывод о том, что в районах глубоководных желобов изостатическое равновесие не сохраняется.

ВУЛКАНЫ И ПОЯСА ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОРОД

Как мы уже заметили, в различных геофизических особенностях островных дуг, например в гравитационных аномалиях и в сейсмической активности, существует ряд закономерностей. Это касается не только района Японии, но вообще всех островных

дуг. Поэтому можно предположить, что островные дуги возникли под действием какого-то определенного механизма, общего для всех них. Согласно теории тектоники плит, этим механизмом может быть субдукция — затягивание холодной пластины в мантию. Однако некоторые геофизические особенности, несмотря на их закономерный характер, трудно объяснить, используя только представление о субдукции. Возьмем, к примеру, вулканическую деятельность. Размещение вулканов очень похоже на расположение очагов землетрясений. Вулканы, как и эпицентры землетрясений, сосредоточены на островных дугах и океанических хребтах. Действующие вулканы имеются и во впадинах океанов, например, вулканы Гавайских островов, но таких вулканов немного. Более 90% активных вулканов мира находятся на Циркумтихоокеанских островных дугах. На рис. 5-14 показано размещение вулканов в Японии. Хорошо видно, что они сосредоточены вдоль двух систем островных дуг (Восточных и Западных дуг, показанных на рис. 5-2).

Хотя и вулканы и очаги землетрясений приурочены к системам островных дуг, их конкретное размещение не совпадает, что можно увидеть, сравнив расположение эпицентров землетрясений (рис. 5-6, а) с расположением вулканов (рис. 5-14). Большинство очагов землетрясений сосредоточено на океанской стороне островных дуг, тогда как никаких вулканов в этой зоне нет. Размещение вулканов и землетрясений кажется одинаковым в масштабе всего земного шара, но при детальном изучении становится ясно, что образуемые ими пояса смещены по отношению друг к другу. Легко устанавливается граница вулканических зон, обращенная к океану. Эту границу называют *фронтом вулканического пояса*, или *вулканическим фронтом* (А. Сугимура, 1963). Почему же нет ни одного вулкана в соседнем с океаном районе, перед вулканическим фронтом?

Вулканические породы — это затвердевшая лава, выбрасываемая вулканами. Однако химический и минеральный состав этих пород сильно меняется в зависимости от характера находящейся на глубине первичной (материнской) магмы, а также от различных процессов, происходящих в магме перед извержением. Например, если температура магмы уменьшается, происходит фракционная кристаллизация: минералы определенного состава кристаллизуются и выпадают из расплава. Кроме того, остаточная магма может реагировать с вмещающими породами. Оба процесса приводят к изменению состава магмы. С помощью современных петрологических методов можно учесть воздействие этих сложных процессов и по составу излившейся лавы оценить химический состав исходной магмы. Такие оценки показали закономерный характер вулканических пород. Первые работы в этой области были проведены японскими учеными Т. Томита (в 1930-х годах) и позднее Х. Куно. В результате их работ были установлены закономерности химического состава исходной магмы.

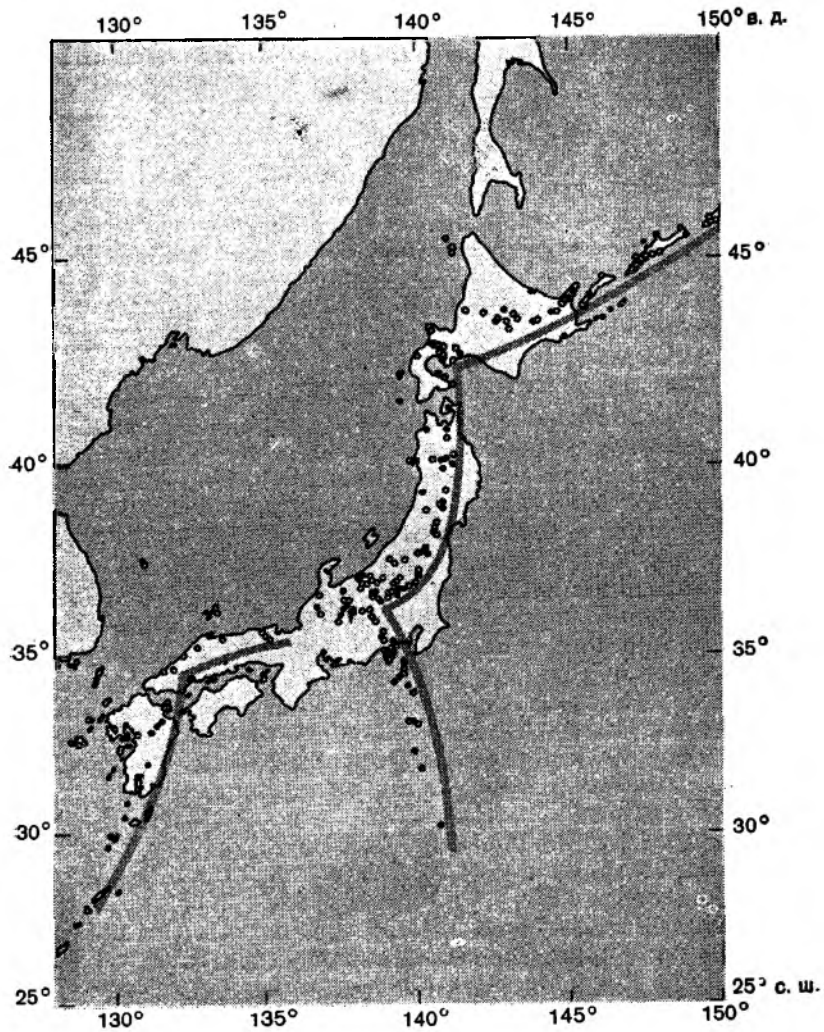


Рис. 5-14. Размещение вулканов в Японии [44].

Серыми полосками показано положение вулканических фронтов. Темные кружки обозначают действующие вулканы, светлые — другие четвертичные вулканы.

Среди различных вулканических пород наиболее близкий к исходной магме состав имеют базальты. Поэтому Куно использовал для определения природы первичных магм именно эти породы. На рис. 5-15 показано предложенное Куно распределение различных типов первичной базальтовой магмы в районе Японии. Магма, образующаяся под вулканами вблизи вулканического фронта, называется *толеитовой* базальтовой магмой. Магма, выплавляющаяся дальше от вулканического фронта (т. е. ближе к Азиатскому материку), называется *щелочной* базальтовой магмой; в последней содержание калия и натрия значительно выше, чем в толеитовой магме. Между районами с различными типами магмы залегают базальты с высоким содержанием алюминия. Куно назвал зоны развития различных типов магм *петрографическими провинциями*.

Объясняя происхождение этих петрографических зон, которые располагаются параллельно желобу, Куно предположил, что вблизи вулканического фронта магма образуется на меньшей глубине, а ближе к континенту — на большей. Эта гипотеза основана на достижениях экспериментальной петрологии. Х. С. Йодер из Института Карнеги (США) и И. Кусиро из Токийского университета обнаружили, что чем больше давление, при котором образуется магма, тем выше в ней содержание калия и натрия. Геологическая лаборатория Института Карнеги с ее превосходными установками для плавления горных пород под высоким давлением стала местом настоящего паломничества для специалистов по экспериментальной петрологии. Поскольку давление изменяется пропорционально глубине, результаты экспериментов Йодера и Кусиро согласуются, по крайней мере качественно, с гипотезой Куно, а именно что ближе к континенту магма образуется на большей глубине. Развивая дальше свою гипотезу, Куно объединил предположение о глубинах выплавления магмы с данными о глубокофокусных землетрясениях в зоне Вадати — Беньофа и постулировал, что образование магмы связано с возникновением глубоких землетрясений. В то время (1959 г.) представления о затачивании (субдукции) пластины еще не существовало. После его появления закономерности химического состава были найдены не только в базальтах, но и в других вулканических породах. Так возникла одна из крупнейших проблем новой теории тектоники плит — как объяснить наблюдаемые закономерности химического состава магм, образующихся в районах островных дуг. Многие ученые пытались обобщить собранные данные и построить единую теорию. Среди тех, кто сделал значительный вклад в разработку такой теории, видное место занимают А. Э. Рингвуд (Австралия) и У. Дикинсон (США). Мы не станем разбирать эту проблему более подробно, потому что нашего внимания требует более общий вопрос: «Как же все-таки происходит под островными дугами образование магмы?»

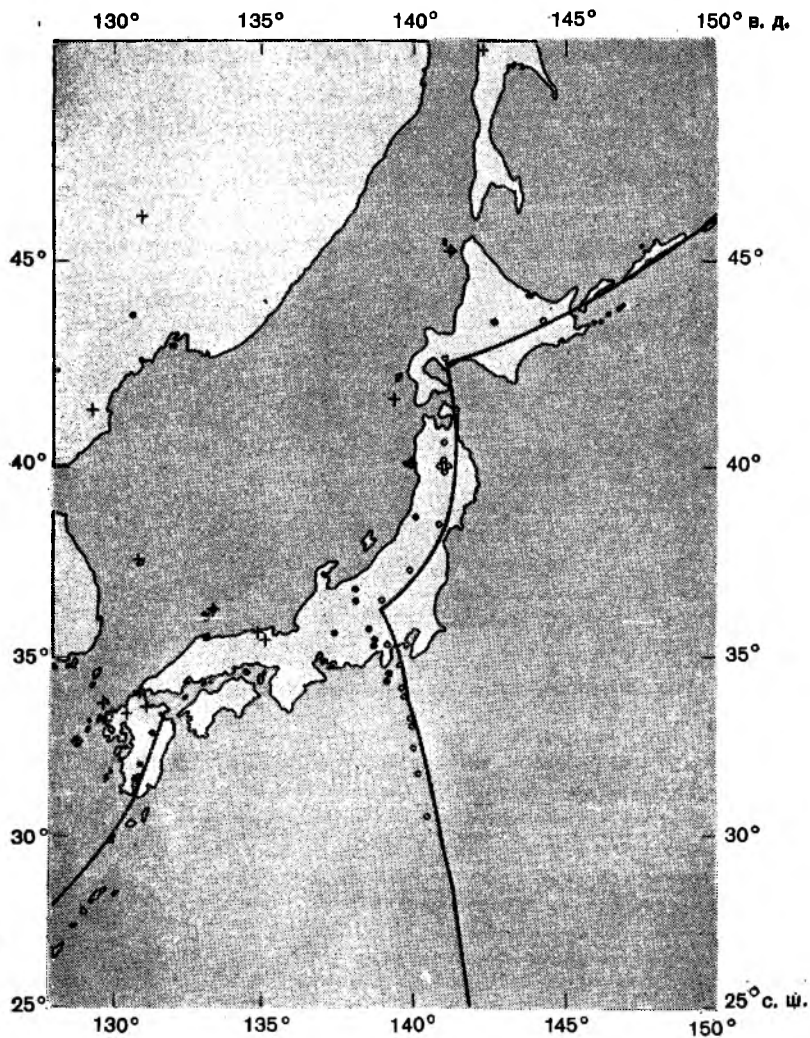


Рис. 5-15. Распределение различных типов материнской магмы в Японии и окружающих районах (H. Kuno, High-alumina basalt, J. Petrol., 1, p. 121, 1960). Светлыми кружками показана толентовая магма, темными — магма с высоким содержанием алюминия; крестиками обозначена щелочная базальтовая магма; сплошной линией отмечено положение вулканического фронта.

ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНЫХ НЕДР ПОД ОСТРОВНЫМИ ДУГАМИ

Магма, образующаяся в глубине земных недр, скорее всего в верхней мантии, появляется на поверхности Земли как продукт вулканических извержений. Ясно, что вулканическая деятельность в большой степени определяется тепловым состоянием верхней мантии. Образование магмы происходит тогда, когда подземная температура повышается, что приводит в отдельных местах к плавлению материала. В чем причина этого повышения температуры и почему этот процесс локализуется в определенных зонах? Допустив, что в срединно-океанических хребтах выделяется горячий мантийный материал, разумно предположить, что именно там происходит образование магмы. Таким образом, наличие вулканов на срединно-океанических хребтах объясняется легко. Однако вулканов еще больше в Циркумтихоокеанских зонах, где, как полагают, идет погружение холодного морского дна. Причину этого объяснить трудно. Ученые поняли, что для того, чтобы дать требуемое объяснение, они должны изучить тепловое состояние Земли и прежде всего его особенности под островными дугами. Один из эмпирических подходов к этой проблеме состоял в измерении на обширных площадях теплового потока Земли.

Мы начали проводить измерения теплового потока в районе Японии в 1957 г. Этой проблеме была посвящена научная работа, выполненная мной в Институте сейсмических исследований Токийского университета после получения ученой степени. Хотя эта работа начиналась с наспех составленных набросков, вскоре она получила поддержку со стороны К. Хораи, М. Ясуи и Т. Ваганабе, которые приняли участие в исследованиях. Кроме того, наши измерения теплового потока в океанах сильно расширились благодаря сотрудничеству со Скриппсовским океанографическим институтом и Геологической обсерваторией Ламонт-Догерти¹.

В последние годы измерениями теплового потока в разных районах занимается большая группа японских ученых: И. Йокояма, Х. Мидзутани, К. Баба, Й. Коно и др. Еще один пример успешного международного сотрудничества — измерения теплового потока в Южной Корее, проведенные японскими специалистами совместно с Геологической службой Южной Кореи. В результате всех этих разнообразных работ тепловой поток в районе Японских островов и окружающей территории был изучен чрезвычайно детально. Теперь мы надеемся распространить эти измерения — в сотрудничестве с учеными заинтересованных стран — на главную часть Азиатского материка и районы юго-восточной Азии.

¹ Развитие этих работ в большой мере способствовало то, что они финансировались из фондов, выделенных по программе научного сотрудничества между США и Японией.

Результаты наблюдений теплового потока в районе Японии (по состоянию на 1970 г.) суммированы на рис. 5-16. Обращает на себя внимание закономерный характер полученного распределения. Тепловой поток имеет низкие значения в обращенных к Тихому океану районах островных дуг или глубоководных желобов и высокие — со стороны суши (а именно на океанской стороне, в районах частых мелкофокусных землетрясений, тепловой поток имеет величину меньше 1 е. т. п.¹, а на континентальной стороне он выше 2 е. т. п.). Следует отметить, что обращенная к океану граница зоны высоких значений теплового потока хорошо совпадает с вулканическим фронтом, показанным на рис. 5-14. Большинство измерений теплового потока было намеренно проведено на большом расстоянии от действующих вулканов и горячих источников. Таким образом, можно не сомневаться, что высокий тепловой поток, отмеченный во внутренних районах островных дуг, отражает их региональное состояние, а не местные особенности, вызванные близостью отдельных вулканов и горячих источников. Эти результаты ясно показывают, что распределение теплового потока тесно связано (по характеру проявления и территориально) с размещением вулканов и очагов землетрясений.

Другая важная особенность картины распределения теплового потока (рис. 5-16) заключается в том, что район высоких значений теплового потока протягивается к материку, включая впадины окраинных морей — Охотского, Японского, — а также Окинавскую впадину (восточная часть Восточно-Китайского моря. — *Прим. перев.*). Однако размещение действующих вулканов (рис. 5-14) свидетельствует о том, что их количество увеличивается к вулканическому фронту и уменьшается в сторону материка. В Японском море действующих вулканов нет.

Закономерный характер распределения теплового потока в районах островных дуг (низкие значения со стороны океана, высокие со стороны континента и в окраинных морях) проявляется в районе Курильской дуги, дуги северо-восточного Хонсю, Идзу-Боинской — Марианской дуги и дуги Рюкю. Однако в районе дуги юго-западного Хонсю высокий тепловой поток обнаружен на океанской стороне дуги. Анализ рис. 5-6, б и 5-14 показывает, что как глубокофокусные землетрясения, так и действующие вулканы в области дуги юго-западного Хонсю весьма редки. Тем самым подтверждается вывод о том, что район юго-западного Хонсю — не типичная активная островная дуга. Дуга Рюкю, находящаяся дальше к юго-западу, более активна и более типична.

Насколько общим для других частей земного шара является такое размещение зон высоких и низких значений теплового потока? Естественно, мы стремились сопоставить результаты наших

¹ Единица теплового потока (е. т. п.) равна 0,000001 кал/(см²·с). Среднее мировое значение теплового потока Земли составляет около 1,5 е. т. п.

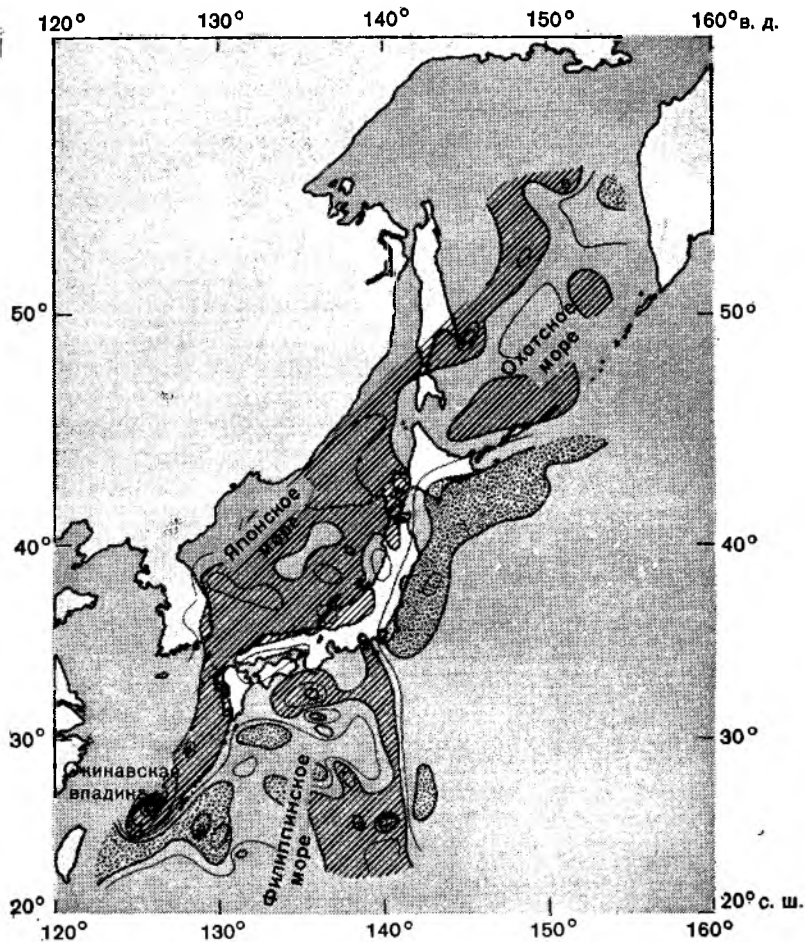


Рис. 5-16. Распределение теплового потока на площади Японии и в окружающих районах (в единицах теплового потока).

Изолинии проведены через 0,5 е. т. п. Области, где тепловой поток превышает 2 е. т. п., заштрихованы; области, где значения теплового потока меньше 1 е. т. п., покрыты крапом.

измерений с данными по районам других дуг. В то время, однако, таких данных было не много. Поэтому в 1969 г. была организована экспедиция для изучения дуговых систем на другой стороне Тихого океана — вдоль западного побережья Южной Америки. Т. Ватанабе и я провели измерения теплового потока в горных выработках и на нефтяных месторождениях Эквадора, Боливии, Перу, Чили и Аргентины. Измерения выполнялись при содействии местных властей и в сотрудничестве с местными учеными, а также с работавшими там геологами-разведчиками и

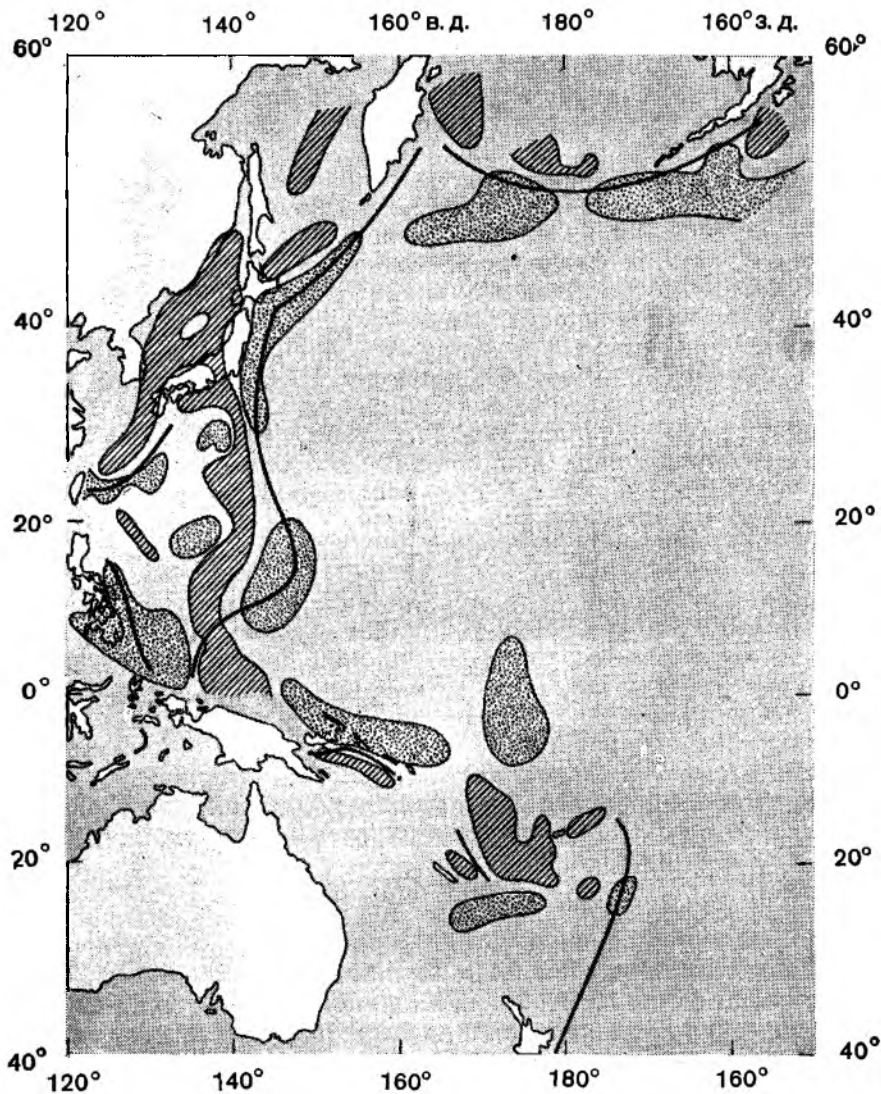


Рис. 5-17. Упрощенная схема распределения теплового потока в западной части Тихого океана (*T. Watanabe, Heat flow in the western margin of the Pacific, 1974*).

Условные обозначения те же, что и на рис. 5-16. Сплошными линиями показаны оси глубоководных желобов.

учеными из разных стран. Результаты этих исследований указывают на существование зоны низких значений теплового потока на океанской стороне вулканического фронта, но наличие зоны высокого теплового потока на континентальной стороне не было доказано. Конечно, там необходимы более детальные съемки.

Различные коллективы выполнили ряд съемок на других островных дугах и в тыловых островодужных окраинных бассейнах. До сих пор измерения проводятся в основном в морях, окружающих дуги, а не на самих островах. В районах желобов тепловой поток почти всегда имеет низкие значения, но в окраинных морях позади дуг распределение теплового потока весьма сложное. В одних местах отмечены высокие значения, в других — низкие. Например, в Северо-Фиджийской впадине (Фиджийское плато), в Южно-Китайском море и на западе Берингова моря тепловой поток имеет высокие значения, а в Южно-Фиджийской впадине, в Западно-Филиппинской впадине и на востоке Берингова моря отмечены либо нормальные значения, либо чередование высоких и низких значений. Как мы увидим дальше, характер теплового потока в краевых впадинах, по-видимому, тесно связан с историей этих впадин. Тепловой поток западной части Тихого океана схематически показан на рис. 5-17.

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ И ТЕПЛОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ

Еще одной важной характеристикой, отражающей тепловое состояние земных недр, служит распределение глубинной электропроводности. Породы, слагающие кору и мантию, — это, так сказать, «полупроводники» (они обладают некоторой электропроводностью, но не являются хорошими проводниками); их удельная электропроводность возрастает с повышением температуры. Поэтому распределение электрической проводимости во внутренних зонах Земли дает сведения о распределении температуры.

Метод оценки глубинной электропроводности довольно сложен. Требуемые величины определяются по короткопериодным вариациям геомагнитного поля. Главной причиной земного магнетизма считаются электрические токи, циркулирующие в металлическом ядре Земли. Эти токи поддерживаются «работой» своего рода динамомшины ядра. Однако небольшая часть геомагнитного поля вызывается электрическими токами, возникающими вне Земли. Это поле, связанное с внешними причинами, испытывает вариации, протекающие очень быстро по сравнению с теми медленными изменениями, которые обусловлены электрическими токами земного ядра, например по сравнению с инверсиями геомагнитного поля (см. гл. 3), продолжительность которых измеряется в геологическом масштабе времени. Вариации внешнего поля происходят в течение часов или минут и даже еще

быстрее. Они связаны с изменчивостью электрических токов в верхних слоях атмосферы, что в свою очередь обусловлено изменениями в потоках заряженных частиц и радиации Солнца. Например, хорошо известно, что во время вспышек на Солнце геомагнитное поле испытывает особенно сильные возмущения, которые называются магнитными бурями. Однако происходят, причем ежедневно, и другие, не столь мощные магнитные вариации, связанные с тем, что солнечная радиация в каждой данной точке на поверхности Земли ежедневно меняется.

Теперь представим себе, что происходит, когда магнитное поле меняется под действием электрических токов в верхних слоях атмосферы в зависимости от состояния Солнца. По закону электромагнитной индукции, при этом изменении магнитного поля в недрах Земли должен возбуждаться соответствующий электрический ток, который вызовет быстро меняющееся, хотя и слабое, вторичное магнитное поле. Когда мы наблюдаем изменения магнитного поля на поверхности Земли во время магнитной бури, на самом деле мы видим суммарный эффект вариаций двух видов: одни вариации связаны с токами в ионосфере, другие — с токами в недрах Земли, возбужденными первыми вариациями. Отделив вторичные вариации от первичных, теоретически можно оценить силу возбужденного в Земле электрического тока. По полученным значениям можно рассчитать затем электропроводность Земли. Работы по оценке глубинной электропроводности этим методом были начаты С. Чепмэном (Великобритания) и его сотрудниками более 30 лет назад. Затем Т. Рикитакэ и его коллеги в 1955 г. обнаружили, что вариации вторичного геомагнитного поля в районе Японской дуги имеют совершенно аномальный характер по сравнению с другими областями земного шара. Из этого они заключили, что и электрическая проводимость под островной дугой Японии аномальна по сравнению с другими областями.

Аномалии электропроводности свидетельствуют об аномальном распределении температур, поскольку электропроводность — это косвенный показатель теплового состояния горной породы. Согласно результатам последующих детальных исследований, проведенных Рикитакэ и его сотрудниками, распределение температур под районом Японии, установленное по данным электропроводности, хорошо согласуется с оценками, сделанными в результате изучения теплового потока. Температура верхней мантии под Японскими островами, определенная по аномалиям электропроводности, выше на континентальной стороне дуги северо-восточного Хонсю (см. рис. 5-2) и ниже на океанской стороне. Интересно, что этот вывод не применим к дуге юго-западного Хонсю, где измерения показывают почти противоположный характер распределения теплового потока по сравнению с дугой северо-восточного Хонсю (рис. 5-16). Несмотря на то, что для оценки температур по наблюдениям магнитных вариаций приходится

делать длинный ряд предположений и использовать сложную процедуру обработки данных, согласованность полученных результатов с данными о тепловом потоке представляется поистине замечательной.

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

Другой способ оценки подземной температуры заключается в анализе скорости сейсмических волн, также зависящей от изменения температуры. Проходя через нагретые горные породы, сейсмические волны заметно снижают скорость. Когда же температура достигает точки плавления, скорость падает еще более резко. Здесь нам необходимо ввести понятие еще об одном типе сейсмических волн — о *поверхностных волнах*, которые распространяются по поверхности Земли (в отличие от продольных и поперечных волн, которые проходят через тело Земли).

Типичным примером поверхностных волн можно считать рябь, возникающую на поверхности озера. Сейсмические поверхностные волны включают волны с различным периодом. В соответствии с теоретическими представлениями на характеристики распространения поверхностных волн влияют физические свойства среды до глубины, сравнимой с длиной волны. Высокочастотные поверхностные волны (короткопериодные) свидетельствуют о свойствах коры, низкочастотные (длиннопериодные) — о свойствах мантии. Изучая поверхностные волны с различными периодами (т. е. с различными длинами волн), можно оценивать физические свойства всей верхней мантии как функцию глубины. Х. Канамори и К. Абе исследовали этим методом свойства верхней мантии района Японии. Распределение температур в верхней мантии, установленное по результатам этих работ, и в этом случае оказалось в полном соответствии с тем распределением, которое было получено по измерениям теплового потока (рис. 5-16). Канамори и Абе также считают, что температура в верхней мантии очень высока под такими районами, как Японское море и восточная часть Филиппинского моря, — фактически настолько высока, что частичное плавление может происходить там на необычно малых глубинах в 30—40 км.

Сейсмология дает и другие важные сведения о строении верхней мантии островных дуг. В Японии уже давно замечали, что распределение интенсивности сейсмических колебаний часто бывает весьма необычным. Например, когда под Японским морем возникает глубокофокусное землетрясение с глубиной очага, скажем, 400 км, то сейсмические сотрясения часто оказываются сильнее на восточной (тихоокеанской), а не на западной (прилегающей к Японскому морю) стороне. Поскольку в сторону океана расстояние от очага увеличивается, этот феномен противоречит общему правилу и требует объяснения. Японские ученые М. Кацумата и Т. Уцу интерпретировали его следующим образом.

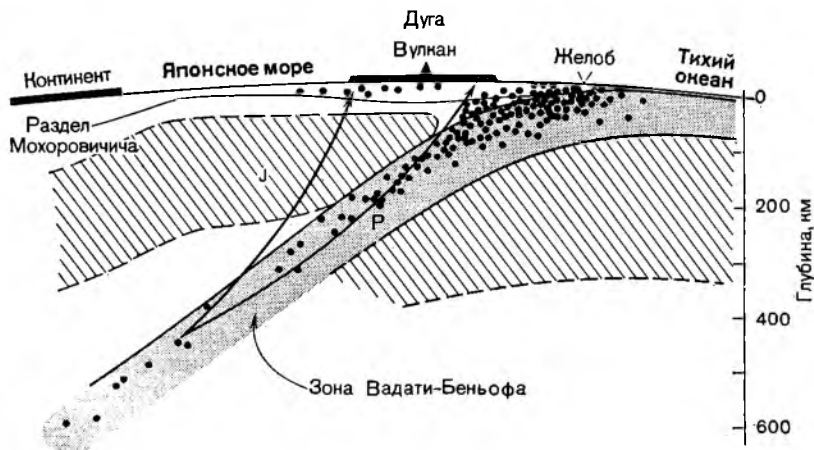


Рис. 5-18. Схема, показывающая различные слои глубинной структуры северной части Японской дуги (*T. Utsu, Seismological evidence for anomalous structures of island arcs with special reference to the Japanese region, Review of Geophys and Space Phys., 9, p. 839, 1971*).

Буквой *J* обозначен типичный путь сейсмической волны от очага глубокого землетрясения к западной (прилегающей к Японскому морю) стороне дуги; буквой *P* обозначен путь от того же очага к тихоокеанской стороне. Серым показан холодный слой, в котором сейсмические волны имеют высокую скорость и слабое затухание (поглощение), штриховкой показан горячий слой, через который волны проходят с низкой скоростью и большим затуханием.

На рис. 5-18 показаны характерные пути сейсмических волн от очага глубокофокусного землетрясения к точкам на разных сторонах дуги. Если сейсмические волны проходят через горные породы вдоль пути *P* со значительно меньшим затуханием, чем вдоль пути *J*, то на тихоокеанской стороне колебания будут ощущаться сильнее, чем на стороне Японского моря. Кацумата и Уцу сделали вывод, что под Японскими островами располагается наклонный слой со слабым поглощением сейсмических волн, уходящий вглубь с тихоокеанской стороны вдоль зоны Вадати — Беньофа. Впоследствии было замечено, что сейсмические волны, проходящие через этот слой со слабым поглощением, имеют большую скорость, чем на других участках верхней мантии — за пределами этого слоя. Известно, что сейсмические скорости больше, а их затухание слабее в более холодных породах. Таким образом, фактические наблюдения позволяют сделать определенный вывод о том, что вдоль зоны Вадати — Беньофа располагается пластина, более холодная, чем окружающий материал (рис. 5-18). Так вновь подтверждается центральная идея тектоники плит. Поразительно похожую ситуацию обнаружили Дж. Оливер и Б. Айзекс в районе дуги Тонга (южная часть Тихого океана).

Итак, под островодужными системами тепловое состояние верхней мантии отличается большой сложностью. Наиболее важ-

ный вопрос здесь — согласуется ли это тепловое состояние с представлением об опускающейся пластине или нет. В настоящее время чаще всего высказывают предположение, что затягивание, или субдукция, пластины происходит потому, что эта пластина холодная и, следовательно, тяжелая. Если мы примем это предположение, то такие динамические явления, как мелко- и глубокофокусные землетрясения, и такие физические условия, как низкий тепловой поток, который свидетельствует о низкой температуре и, следовательно, отсутствии вулканов, окажутся вполне объяснимыми. Упомянутые выше другие сейсмические данные в пользу существования холодной пластины служат подтверждением общего представления о субдукции океанической плиты. И все же, как объяснить такие аномальные явления, как высокий тепловой поток, высокие температуры в верхней мантии и существование вулканов на континентальной стороне островных дуг? Не противоречит ли это сильно той модели, в которой погружающаяся пластина считается холодной?

ОСТРОВНАЯ ДУГА КАК ОРОГЕНИЧЕСКАЯ ЗОНА

Прежде чем вдаваться в трудную проблему противоречия между данными о высоких температурах в верхней мантии и концепцией холодной пластины, обсудим вкратце другую группу фактов. Одной из важнейших особенностей геологического строения Японских островов является резкое различие между районами северо-восточной и юго-западной Японии. В северо-восточной Японии ярко выражены характерные черты типичной активной островной дуги, такие, как глубоководный желоб и вулканический пояс. Вулканический пояс (рис. 5-14) проходит вдоль осевой зоны северо-восточной Японии, затем поворачивает на юг, следуя вдоль главного геологического раздела, который называется *Фосса-Магна*¹ (рис. 5-19), и продолжается дальше уже в пределах Идзу-Бонинской — Марианской дуги. В юго-западной Японии, наоборот, современная вулканическая деятельность развита слабо. Эта область делится на две части *Срединной тектонической линией* (рис. 5-19). Геологические структуры простираются здесь параллельно этой линии. Наибольший интерес в геологическом строении юго-западной Японии представляет размещение поясов регионального метаморфизма, также показанных на рис. 5-19.

Метаморфические породы — это вторичные породы, которые образуются, когда первоначальные породы испытывают то или иное превращение (метаморфизм) в результате термодинамического воздействия. Грубо их можно разбить на две группы: породы, метаморфизованные в условиях низкой температуры и высокого давления, и породы, метаморфизованные при низком дав-

¹ Fossa Magna — великий ров (лат.). — Прим. перев.

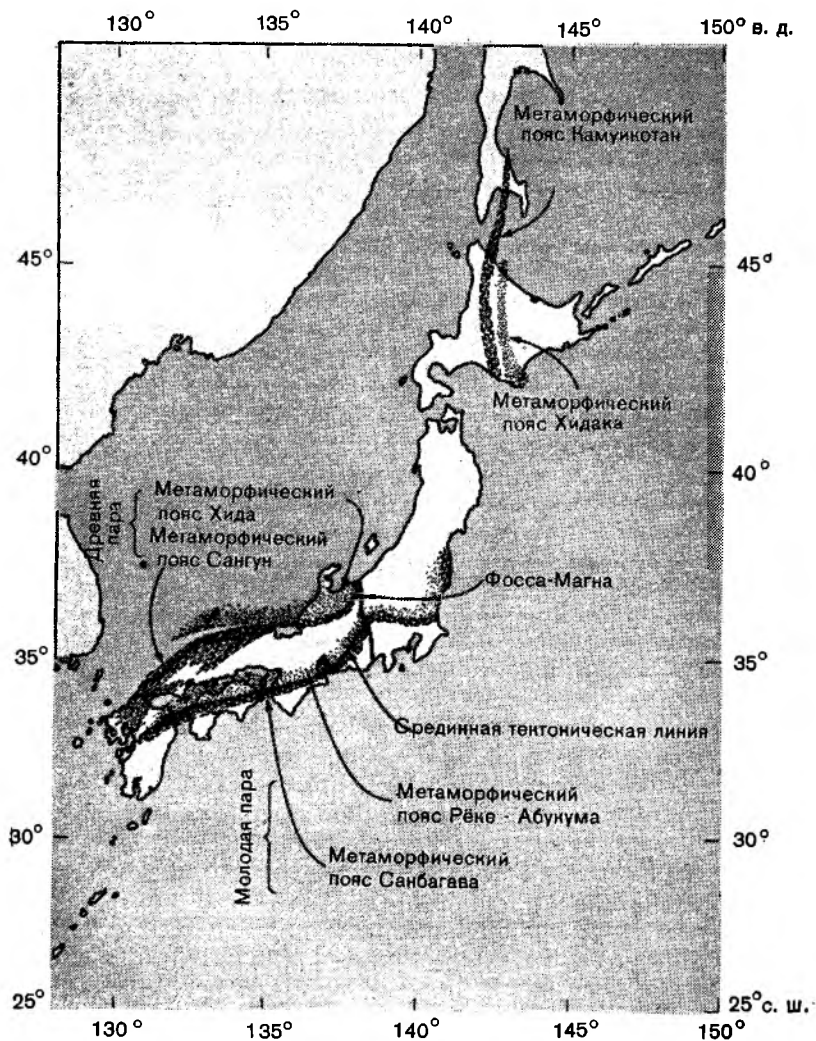


Рис. 5-19. Пояса регионального метаморфизма в Японии (А. Miyashiro, Evolution of metamorphic belts, J. Petrol., 2, p. 277, 1961).

лении и высокой температуре. В юго-западной Японии эти два вида метаморфических пород размещаются закономерно, образуя парные пояса. Зона метаморфизма высоких давлений и низких температур (пояс Санбагава) прилегает к Срединной тектонической линии со стороны океана, а зона метаморфизма низких давлений и высоких температур (пояс Рёке) проходит по другой стороне, ближе к континенту. Считается, что эти зоны отражают характер того глубинного процесса, который развивался во время метаморфизма. (Пояса Рёке и Санбагава возникли в результате метаморфизма, развивавшегося в юрское и меловое время.) Заметим, что на рис. 5-19 метаморфические зоны проходят в южную часть северо-восточной Японии, пересекая разлом Фосса-Магна. Отсюда следует, что в мезозое и в более раннее время остров Хонсю представлял собой один орогенический пояс. Это не согласуется с современной конфигурацией северо-восточной и юго-западной Японии. Другая пара метаморфических поясов проходит в юго-западной Японии вдоль побережья Японского моря. Зона метаморфизма высоких давлений и низких температур, проходящая по океанской стороне, здесь также дополняется параллельной зоной метаморфизма низких давлений и высоких температур. Они называются метаморфическими поясами Хида и Сангун. Считается, что эта пара метаморфических поясов образовалась в палеозое и, следовательно, она древнее, чем расположенная южнее пара Рёке — Санбагава. Наличие этих двух пар указывает на то, что в палеозое и мезозое тепловое состояние данного района было, по-видимому, во многом похоже на современное состояние активной зоны, а именно температуры были низкими на стороне, обращенной к океану, и высокими — на стороне, обращенной к континенту. Поскольку в настоящее время юго-западная Япония считается весьма неактивной островной дугой, это может дать нам некоторое представление о том, каким станет облик активной островной дуги через несколько сот миллионов лет. Хотя многие ученые уже давно видели эту связь (или по меньшей мере, «чувствовали» ее), первыми, кто сформулировал (в конце 1950-х — начале 1960-х годов) это предположение, были А. Миясиро, А. Сугимура и Т. Мацуда. Их гипотеза сводилась к следующему: активные островные дуги — это те места, где в данный момент происходит орогенез (процесс, в результате которого образуются обширные горные пояса и развивается метаморфизм — то, что можно видеть в юго-западной Японии).

МЕТАМОРФИЗМ И ТЕПЛОВОЙ ПОТОК

Поддержать указанную концепцию нас (Х. Такеути и меня) побудило то количественное сопоставление, которое показано на рис. 5-20. Кривая *A* показывает глубинное распределение температур на океанской стороне северо-восточной Японии, т. е. в зоне низкого теплового потока, кривая *B* — распределение температур

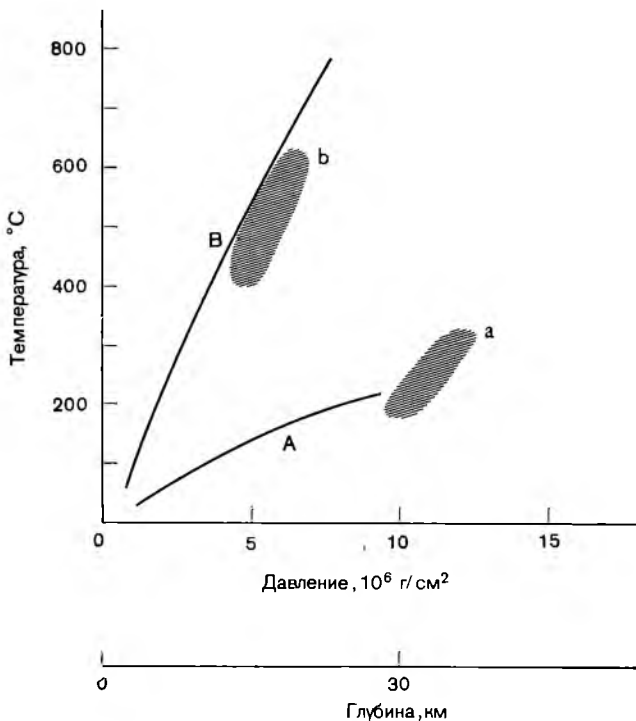


Рис. 5-20. Разные виды зависимости температуры под современными островными дугами от глубины и интервалы температур и давлений для метаморфических поясов (H. Takeuchi, S. Uyeda, A possibility of present-day regional metamorphism, *Tectonophysics*, 2, p. 59, 1965).

Кривая А соответствует современному распределению температур в районах с низким тепловым потоком, кривая В — в районах с высоким тепловым потоком. Заштрихованная область а показывает интервалы температуры и давления для регионального метаморфизма высоких давлений и низких температур, область б — для регионального метаморфизма низких давлений и высоких температур.

на обращенной к континенту стороне, т. е. в зоне высокого теплового потока. Эти распределения температур были выведены из наблюдений теплового потока, выполненных К. Хораи и мной в 1964 г. По оси абсцисс на рис. 5-20 отложены значения давления и глубины. Заштрихованная область а показывает интервалы температуры и давления, соответствующие, вероятно, условиям метаморфизма высоких давлений и низких температур, существовавшим в поясе Санбагава, а область б — интервалы, соответствующие условиям метаморфизма в поясе Рёке. Эти диапазоны давления и температуры были определены путем сравнения минеральных ассоциаций в метаморфических породах с минералами, полученными в лаборатории при известных условиях давления и температуры. Таким образом, оценка интервалов темпера-

гуры и давления была проведена двумя отдельными методами: один из них основан на измерениях теплового потока в районе современной активной дуги северо-восточной Японии, а другой — на изучении состава метаморфических пород вдоль древней орогенической зоны юго-западной Японии. Такеути и я пришли к выводу, что совпадение результатов, показанных на рис. 5-20, настолько хорошее, что оно не может быть случайным. Поэтому мы высказали предположение, что эти два типа регионального метаморфизма развиваются, возможно, в настоящее время под островной дугой северо-восточной Японии.

ОРОГЕНИЯ ТИХООКЕАНСКОГО ТИПА

Напрашивается вывод о сходстве между нашим представлением о развитии островных дуг, которое мы считаем фактически процессом орогенеза, и революционной концепцией Дьюи и Берда, согласно которой все геологические явления можно объяснить тектоникой плит (см. стр. 120). Однако их схема, хотя и очень эффективная, все же остается только феноменологической. Они, по-видимому, считают само собой разумеющимся, что, где бы ни происходила субдукция, там обязательно будут и землетрясения, и вулканы, и метаморфизм. Связь между субдукцией и землетрясениями понять легко, но развитие в тех же районах вулканической деятельности и метаморфизма (особенно метаморфизма низких давлений и высоких температур) требует более полного объяснения. Точно так же и для проверки нашего предположения о том, что островные дуги отражают активный орогенический процесс, необходим более детальный анализ того физического механизма, который приводит этот процесс в действие. Особенно трудно объяснить опять-таки тепловой режим.

Чтобы не смешивать орогенический процесс, в результате которого возникают высочайшие горные хребты, такие, как Гималаи, и процесс, происходящий в островных дугах, мы будем называть процесс развития островных дуг *орогенией¹ тихоокеанского типа*. Вопрос о том, как увязать плавление и высокие температуры с одновременным опусканием холодной плиты, уже давно терзает умы тех ученых, кого больше всего интересует проблема «почему».

МОДЕЛЬ ОРОГЕНИИ ТИХООКЕАНСКОГО ТИПА

Поскольку мы твердо придерживаемся популярной в наше время схемы, согласно которой холодная литосферная плита погружается под островную дугу, то для объяснения орогении ти-

¹ В геологической литературе на русском языке вместо термина «орогения» часто используются выражения «тектоно-магматическая эпоха» или «тектоно-магматический процесс». — *Прим. перев.*

хоокеанского типа нам необходимо предположить, что существует какой-то особый механизм нагрева. В настоящее время мы считаем возможным источником тепловой энергии в ороении этого типа теплоту трения. Но каким образом трение может дать столько тепла, пока не ясно. Первобытные люди умели получать огонь трением двух кусков дерева друг о друга, но современная наука не в состоянии объяснить, как холодная плита, опускаясь всего на несколько сантиметров в год, производит такое количество тепла, которого достаточно, чтобы вызвать орогенический процесс. В попытке решить эту проблему мы (мои коллеги К. Хасебе, Н. Фудзии и я) поставили в 1970 г. перед собой задачу найти физический механизм образования этого тепла. В качестве первого шага мы попытались оценить количественно, сколько нужно тепла, чтобы вызвать на континентальной стороне островных дуг высокий тепловой поток и вулканизм. Мы выяснили, что лучше всего такую оценку проводить методом численного моделирования с использованием электронных вычислителей. Прежде всего был составлен предполагаемый разрез для исходного состояния нормальной океанической коры. Затем мы построили модель, в которой в определенный момент начинается субдукция плиты. Мы предположили, что в процессе субдукции вдоль границы между погружающейся плитой и окружающей ее мантией образуется некоторое количество тепла. Затем мы подсчитали, как в пределах нашего разреза изменятся с течением времени распределение температур. При расчетах учитывались такие параметры, как теплоемкость, скорость опускания плиты, теплопроводность и температура плавления различных материалов. Меняя значения этих характеристик, мы стремились количественно определить условия, необходимые для того, чтобы возникло наблюдаемое распределение теплового потока. Принцип нашей модели показан на рис. 5-21. Серым цветом на рисунке обозначена погружающаяся холодная плита.

В расчетах, подобных нашему, важным элементом является время, прошедшее от начала процесса до настоящего момента. Продолжительность его можно оценить по геологическим наблюдениям, но точно определить нельзя. Поскольку геологическая структура Японских островов не могла сформироваться за короткий период — порядка, скажем, 10 млн. лет — и поскольку известно, что современные островные дуги возникли после мезозойской эры, мы предполагаем, что от начала поддвигания до современной эпохи прошло порядка 100 млн. лет. Следовательно, главной задачей наших усилий, направленных на то, чтобы понять развитие ороении тихоокеанского типа, было узнать, какие условия, существовавшие 100 млн. лет назад, создали современную геологическую обстановку. Количество тепла, образующегося на кровле косо погружающейся плиты, оценивалось следующим образом. Прежде всего, хотя наблюдаемая на поверхности ано-

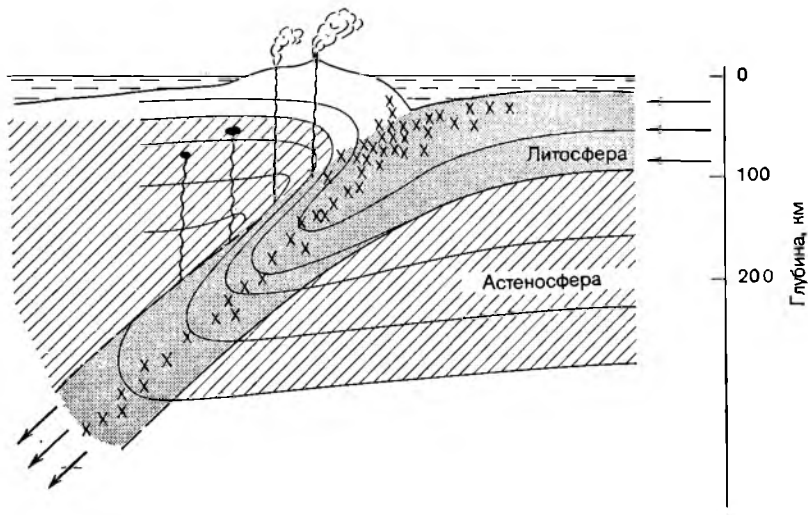


Рис. 5-21. Модель предполагаемого механизма нагрева под активной островной дугой, объясняющая орогению тихоокеанского типа [44].

Серым показана погружающаяся холодная литосферная плита. Искривленные линии — изотермы. Стрелками обозначено направление движения, крестиками — очаги землетрясений. Волнистые вертикальные линии обозначают подъем магмы.

малия теплового потока составляет около 1 е. т. п.¹, на кровле пластины должен генерироваться тепловой поток интенсивностью 5 е. т. п. Такое большое количество тепла необходимо потому, что холодная плита затягивается вглубь и основная часть выделяющегося тепла должна уходить вниз вместе с этой холодной погружающейся плитой.

Мы выяснили также, что теплопроводность, необходимая для того, чтобы передать тепло через мантию к поверхности Земли, должна быть примерно в 10 раз больше, чем известная величина теплопроводности мантийных пород. Таким образом, наши расчеты показали, что должно было выделиться большое количество тепла и что оно должно было передаваться к земной поверхности очень быстро. На первый взгляд такой быстрый перенос тепла кажется невероятным, но мы решили, что он все-таки возможен, если тепло переносится не только посредством теплопроводности твердых пород, но и поднимающейся магмой. Однако количественный анализ показал, что объем лавы, обнаруженной на земной поверхности, недостаточен, чтобы перенести требуемое тепло; он должен был быть примерно в 10 раз больше фактического количества лавы. Все эти условия очень важны, но их нелегко увязать между собой. Некоторые ученые считают, что сильное

¹ Напомним, что одна единица теплового потока (е. т. п.) равна 0,000001 кал/(см²·с).

фрикционное нагревание, которого требует наша модель, несовместимо с предположением о плавлении, необходимом для переноса тепла, потому что образующийся расплав должен действовать как смазка. Это также представляет собой большую проблему, которую надо еще решать!

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЯПОНСКОГО МОРЯ: ОДНО ИЗ ПРЕДПОЛОЖЕНИЙ

Если огромная масса магмы, в 10 раз большая, чем количество лавы, которое найдено на земной поверхности, будет непрерывно подниматься в течение 100 млн. лет, то к чему это может привести? Ответ на такой вопрос рождает одну весьма подходящую нам гипотезу. Материал, поднимающийся в течение 100 млн. лет к поверхности Земли, можно представить себе в виде столба высотой 300 км. Если бы этот материал нагромождался на земной поверхности, то на внутренней стороне островных дуг над глубинными сейсмическими зонами появились бы гигантские горы — в 50 раз выше Джомолунгмы. Поскольку этого не случилось, нам надо рассмотреть возможность того, что блок верхней мантии, над которым располагается сейчас Японское море, в течение последних 100 млн. лет поднялся с больших глубин. Что это значит? Было бы нелепо предполагать, что на этом месте когда-то была впадина 300-километровой глубины, но, может быть, не будет абсурдным вообразить, что современные Японские острова раньше представляли собой восточную окраину Азиатского материка (рис. 5-22, а), а затем переместились в направлении Тихого океана, освобождая место для поднимающегося материала (рис. 5-22, б). Такая модель объяснила бы происхождение окраинных морей — одной из характерных особенностей островодужных систем — как неизбежное следствие тектонического развития островных дуг. В нашей модели Тихоокеанская плита хотя и поглощается, погружаясь под внутреннюю часть островной дуги, но поглощается не полностью: часть ее снова поднимается на континентальной стороне дуги и образует плиту под окраинным морем. По мере того как окраинные моря, например Охотское, Японское, Филиппинское, Восточно-Китайское, увеличиваются в размерах, дугообразная форма цепочек островов, отделяющих эти моря от океана, должна становиться все более и более выразительной. На основании палеомагнитных исследований, проведенных Н. Каваи и его сотрудниками, было установлено, что дуга Хонсю в течение геологического времени постепенно поворачивалась. Этот поворот было бы логично считать результатом как раз такого процесса образования окраинного моря.

Происхождение окраинных морей, подобных Японскому, издавна является предметом споров. Геологу трудно считать такое море очень древним. Ввиду того что реки выносят с прилегающей суши большое количество обломочного материала, море та-

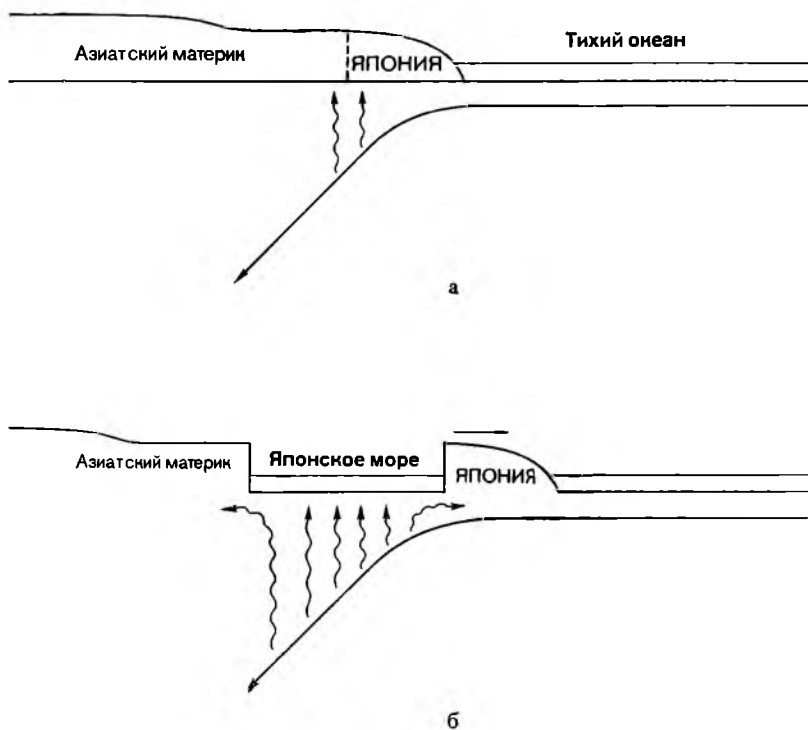


Рис. 5-22. Модель, изображающая возможный процесс раскрытия Японского моря.

кого небольшого размера должно наполняться осадками в геологическом масштабе времени чуть ли не «мгновенно» (т. е. всего за «каких-нибудь» 200 или 300 млн. лет). Однако в настоящее время толщина осадочного слоя на дне Японского моря не превышает 2 км. Это заставляет нас предполагать, что Японское море в своем нынешнем виде существует сравнительно недолго.

Одно из более ранних представлений заключалось в том, что вплоть до самого недавнего времени район Японского моря представлял собой сушу, а море возникло в результате ее опускания. Эта теория также встретила логическое возражение, так как, по закону Архимеда, массив суши для сохранения плавучести должен иметь под собой толстую кору (см. стр. 24). Это означает, что, если суша вдруг становится морем, образовавшаяся впадина должна создать огромную гравитационную аномалию, а таких аномалий нет ни под Японским морем, ни где-либо в ином месте. Такая теория была бы жизнеспособной, если бы можно было доказать, что континентальная кора *замещается* океанической. Идею о такой «океанизации» континентальной коры отста-

ивает, пытаясь объяснить происхождение окраинных морей, советский ученый В. В. Белоусов. Однако, по мнению большинства современных петрологов, представление о том, что горные породы, образующие континентальную кору, могут превратиться в породы океанической коры, неприемлемо с термодинамической точки зрения, хотя обратный процесс—превращение вещества океанической коры в вещество континентальной коры — вполне возможен.

Учтя эти соображения, я заключил, что Японское море нельзя считать опустившейся частью континента. Пытаясь установить, какими же все-таки условиями объясняется современное распределение теплового потока и механизм орогении тихоокеанского типа (см. предыдущий раздел), мои сотрудники и я предположили, что фрикционный нагрев и подъем магмы могут приводить к тому, что островные дуги, такие, как Японская, отходят от соседних континентов, образуя окраинные моря, подобные Японскому морю. Утверждение, что Японское море образовалось в результате перемещения Японских островов, на самом деле нельзя считать совершенно новым. Уже в 1930-х годах Т. Терада, отличавшийся оригинальными взглядами физик и естествоиспытатель из Токийского университета, пришел к такому же заключению в своем исследовании, касающемся рельефа Японского моря. Не столь давно в поддержку этой гипотезы выступили еще два моих соотечественника: С. Мураути и К. Накамура. Я обращаю особое внимание на эти работы потому, что хотя я и поглощен своим собственным исследованием, касающимся развития Японского моря, но ни в коем случае не желаю игнорировать важный вклад других ученых в изучение окраинных морей.

Относительно происхождения окраинных морей выдвинуты три главные гипотезы. Мы обсудили две из них: *океанизацию* (континентальной коры) и *дрейф островных дуг*. Третья — это гипотеза *захвата*, согласно которой новая островная дуга образуется в открытом океане, а часть океана, оказавшаяся между дугой и континентом, как бы захватывается и становится окраинным бассейном. Это означает, что возраст окраинного моря должен быть больше, чем возраст островной дуги. Однако в случае очень древней дуги такая гипотеза неприемлема, потому что небольшая впадина быстро заполнялась бы осадочным материалом, поступающим с окружающих массивов суши. Американцы А. Купер, М. Марлоу и Д. Шолл высказали недавно предположение, что Берингово море — это «захваченная» часть Тихого океана и имеет древний возраст. Они заявляют, что открыли в Алеутской впадине магнитные полосы, которые относятся, как оказалось, к аномалиям серии М (см. стр. 116); район, где обнаружены эти аномалии, образовался, возможно, как часть плиты Кула, а позднее был «захвачен» при формировании Алеутской дуги. Другой морской бассейн, который образовался, возможно, в результате захвата,— западная часть Филиппинского моря.

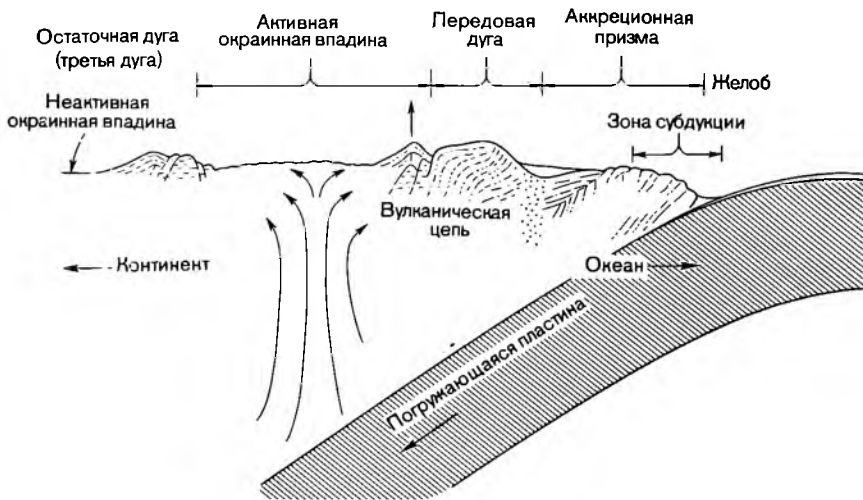


Рис. 5-23. Модель островодужной системы западной части Тихого океана [28]. Модель основана на представлении Д. Карига о том, что дуга в ходе своего образования раскалывается на две части (передовую и остаточную дуги) и что в результате этого между ними образуется окраинная впадина. Аккреционная призма на островном склоне желоба — это сложная структура, образованная осадочными породами океанического дна, которые были соскоблены с погружающейся пластины (подробнее это описано в гл. 6).

Насколько мне известно, примеров окраинных морей, относительно которых было бы убедительно доказано, что они образовались путем «океанизации», нет, хотя защитники этой гипотезы считают почти все окраинные моря хорошими примерами такого процесса.

Из трех гипотез образования окраинных морей дрейф островных дуг и, возможно (для некоторых морей), захват кажутся нам более реалистичными, чем океанизация. Доказать эти гипотезы можно непосредственным исследованием самих окраинных морей. Среди работ по проблеме образования окраинных морей значительное место заняла статья Д. Карига [28], опубликованная в 1974 г. Изучив топографию морского дна, распределение осадков и другие геологические данные, Кариг высказал предположение (в 1970 г.), что окраинные моря раскрываются под действием сил растяжения, оттягивающих островные дуги в сторону океана. Он ввел также представление о том, что в ходе образования островной дуги подъем материала с кровли погружающейся пластины расщепляет дугу в продольном направлении и что между двумя половинами дуги впоследствии образуется междуговая впадина. Эти две части прежде единой дуги называются *передовой* и *остаточной* дугами. Позади передовой дуги, которая движется в направлении океана, проходит вулканическая цепь. По этой причине остаточную дугу называют также *третьей* дугой (рис. 5-23).

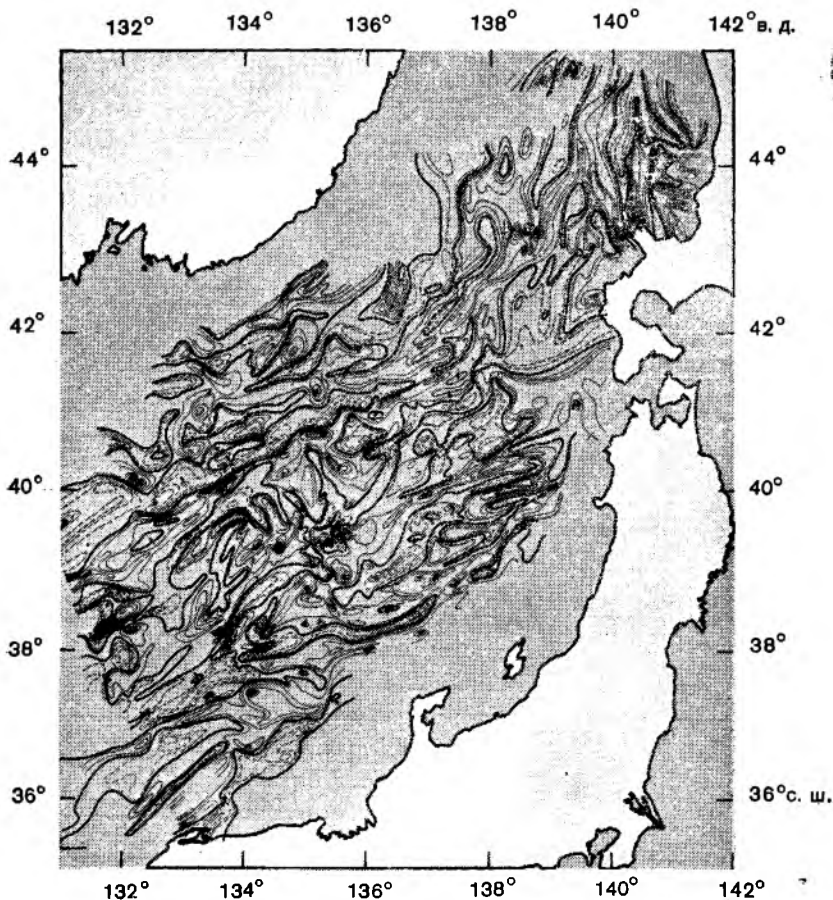


Рис. 5-24. Магнитные аномалии Японского моря (N. Isezaki, S. Uyeda, *Geomagnetic anomaly pattern in the Japan Sea. Marine Geophys. Res.*, 2, p. 51, 1973).

Сплошными линиями показаны положительные аномалии, штриховыми — отрицательные. Изолинии проведены через 50 гамм.

Кариг показал, что такой последовательностью событий можно объяснить особенности устройства некоторых дуговых областей, в том числе дуги Тонга — Кермадек, Ново-Гебридской и Марианской дуг; он предположил, что раскрытие окраинных бассейнов под действием растяжения происходит неоднократно, в результате чего образуется серия отдельных впадин. Так, он считает, что составные части Филиппинского моря: Марианская впадина, впадина Сикоку — Паресе-Вела и Западно-Филиппинская впадина (см. рис. 5-1) — возникли в результате серии эпизодов растяжения (западные впадины — более древние). Как уже указывалось, Западно-Филиппинская впадина образовалась, возмо-

жно, путем захвата части океана. Но первые две впадины (Марианская и Сикоку — Паресе-Вела) вполне могли возникнуть в результате двух эпизодов растяжения; одна впадина развивается в современную эпоху, а другая, теперь неактивная, развивалась в третичное время. На рис. 5-23 они обозначены как активная и неактивная окраинные впадины.

Японский ученый И. Томода с сотрудниками и ученые из Ламонтской обсерватории А. Уоттс и Дж. Уайссел закартировали недавно во впадине Сикоку линейные магнитные аномалии. Возраст некоторых из них был определен как миоценовый, что в целом подтверждает идею Карига. Теперь можно представить себе, что процесс образования окраинных морей напоминает процесс разрастания морского дна (а может быть, оба процесса полностью идентичны), так как в окраинных морях также есть полосовые магнитные аномалии типа Вайна — Мэтьюза — Морли.

В Японском море магнитная съемка выполнялась с двух исследовательских судов «Сеифу-мару» и «Кофу-мару» морских метеорологических обсерваторий Майдзуру и Хакодате. В 1970 г. нам представилась возможность провести более детальные съемки с рыболовного судна «Дайэи-мару-83». На рис. 5-24 показана карта магнитных аномалий, построенная по материалам этих съемок. Хотя аномалии и проявляют преимущественное простирание с юго-запада на северо-восток, они малы по интенсивности, часто обрываются и имеют неправильную форму, поэтому установить их возраст по стандартной шкале времени магнитных инверсий очень трудно (ср. с полосовыми аномалиями на рис. 2-8). Если даже Японское море действительно раскрывалось в результате последовательных эпизодов дрейфа Японской дуги, то это было, вероятно, не типичным разрастанием морского дна, которое происходит от одного хребта, а неправильным внедрением отдельных блоков магмы — *рассеянным* (диффузным) разрастанием. Однако Н. Иседзаки предположил (на основе результатов весьма замысловатой математической обработки) существование в магнитных полосах Японского моря некоторой оси симметрии. Если такая ось действительно есть, то, значит, и в Японском море разрастание могло идти по типу Вайна — Мэтьюза — Морли. Вопрос еще не решен.

НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА ЗЕМЛЮ

НОВАЯ ГЛОБАЛЬНАЯ ТЕКТОНИКА

Мы видели, что теория континентального дрейфа прошла через бури и противоречия нескольких десятилетий, причем в течение значительного времени была почти полностью отвергнута. Она возродилась благодаря достижениям в области палеомагнетизма, была поддержана данными морской геофизики и достигла зрелости в результате развития гипотезы разрастания морского дна, после чего быстро превратилась в концепцию, которая теперь называется тектоникой плит.

Мы видели также, что есть много способов изучения истории и строения Земли. Но если мы хотим приблизиться к идее, которую можно было бы назвать «новым взглядом на Землю», мы должны объединить результаты, полученные при различных подходах к изучению Земли. Ни гипотеза разрастания морского дна, ни тектоника плит сами по себе не могут дать материал для этого нового представления о нашей планете — представления, от которого мы в конечном счете перейдем к пониманию того, как устроена и как живет Земля — однако обе концепции совершенно необходимы для такого понимания. В этой новой перспективе Земля воспринимается как нечто подвижное, непрерывно меняющееся, тогда как в традиционном, противоположном мировоззрении она изображается застывшей, неизменной. Это противоречие иногда описывают как конфликт между мобилистами («дрейфистами») и фиксистами.

Принципы, на которых основаны мобилистские представления, сводятся в самом общем виде к следующему: континент — это часть литосферной плиты, и он движется вместе с этой плитой. Сама литосфера формируется в океанических хребтах в результате остывания мантийного материала и образовавшись таким образом, начинает вести себя как жесткая плита. Вся поверхность Земли состоит из нескольких больших и малых литосферных плит. После этого постулируется, что все крупные явления, происходящие в настоящее время на поверхности Земли, можно рассматривать как результат относительного движения плит. Когда океаническая плита сталкивается с континентальной, то она под-

двигается под континентальную плиту (выражаясь языком тектоники плит, происходит *субдукция* океанической плиты под континентальную), в результате чего образуется океанический желоб. Следствием субдукции является образование не только желобов, но и островных дуг. Активное развитие таких островных дуг включает в себе главные черты орогенеза. Когда сталкиваются плиты, на которых располагаются континенты или островные дуги, возникает иной вид орогенеза: субдукции не происходит, а вместо этого континенты и дуги формируют складчатые горы. В результате такого вида орогенеза образовались многие горные хребты, например Гималаи и Альпы.

Однако до сих пор нет ответа на самый главный вопрос: что приводит в действие все эти процессы. Вспомним, что еще в 1920-х годах Артур Холмс постулировал, что причиной того движения, в результате которого перемещаются, как по ленте конвейера, материи, является конвекционное течение в мантии. Эта концепция не умерла. Она сохраняется в силе; на ней основана гипотеза разрастания морского дна, предложенная в 1960-х годах Хессом, Дитцем, Уилсоном и другими. В 1930-х годах Д. Т. Григгс разработал теорию происхождения островных дуг и океанических желобов, в которой утверждается, что дуги и желоба образуются там, где мантийный конвекционный поток уходит вниз. Эта теория также осталась жива и служит каркасом тектоники плит. Давайте теперь снова рассмотрим, что же заключает в себе понятие «конвекция в мантии».

ЧТО ТАКОЕ КОНВЕКЦИЯ?

Все знают о круговороте, который происходит в котле кипящей воды. Всегда, когда плотность жидкости оказывается неодинаковой, более тяжелые ее части опускаются, а более легкие поднимаются к поверхности. Конвекция в котле с водой называется тепловой конвекцией, потому что она развивается благодаря разной плотности воды, обусловленной различием ее температуры. Таким образом, если котел нагревают снизу, то вода, которая находится у дна, нагревается, расширяется, становится легче и всплывает на поверхность, где охлаждается, становится тяжелее и, значит, должна снова опуститься. В ходе такой циркуляции вся вода постепенно нагревается и начинает отдавать тепло в воздух. Короче говоря, тепловая конвекция — это один из способов переноса тепла от огня, зажженного под котлом, в воздух, находящийся над котлом. Конвекция, происходящая в мантии, также считается тепловой. Более глубокие части мантии нагреваются и расширяются, что вызывает круговое течение материала.

Однако ученые долго пренебрегали серьезным исследованием такого простого и знакомого явления, как перемешивание кипящей воды в котле. Первым, кто начал проводить фундаментальное экспериментальное изучение тепловой конвекции, был фран-

цузский ученый Бенар. Результаты его работы были опубликованы в 1906 г. В своем эксперименте Бенар поместил тонкую пленку (0,5—1,0 мм) парафина на верхнем торце отлитого из железа цилиндра и нагревал этот цилиндр снизу. Оказалось, что конвекция в парафине не начинается до тех пор, пока цилиндр не достигнет определенной температуры. Продолжая нагревать цилиндр, Бенар увидел, что кусочки растрескавшейся парафиновой пленки повсюду начали подниматься, лишь в периферических частях этих кусочков парафин стал опускаться.

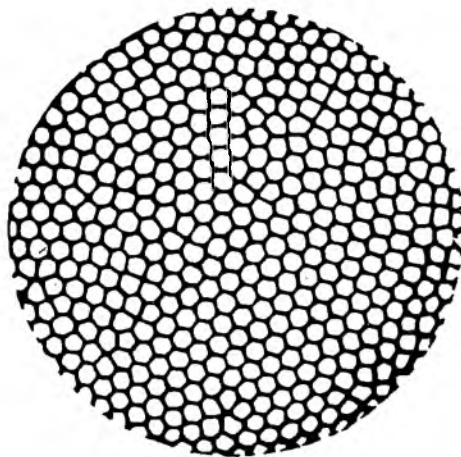


Рис. 6-1. Ячейки Бенара на парафиновой пленке. (Рисунок по фотографии, сделанной Бенаром.) (S. Chandrasekhar, Hydrodynamic and hydromagnetic stability, The Clarendon Press, 1961).

Спустя некоторое время на поверхности образовалась правильная гексагональная сетка типа той, которая показана на рис. 6-1. Нагретый материал поднимается к поверхности в центре каждого шестиугольника этой сетки, а остывающий материал опускается у краев каждого такого шестиугольника. Перемешивание не может надолго нарушить правильный характер этого узора. Другими словами, гексагональная сетка, состоящая из так называемых *ячеек Бенара*, стабильна. Бенар установил также, что отношение толщины слоя жидкого вещества к горизонтальному размеру образующихся правильных шестиугольников, например к длине стороны, близко к единице.

Теоретический анализ открытий Бенара как физического феномена не был, однако, выполнен вплоть до 1916 г., когда вышла в свет статья знаменитого лорда Рэля. Рэлей отметил, что тепло, поступающее снизу, пока оно может передаваться через жидкость в воздух посредством обычной теплопроводности не обязательно вызывает конвекцию. Однако если тепло поступает в слишком больших количествах и оно не может быть полностью передано в воздух путем теплопроводности, то это тепло накапливается возле дна и жидкость там расширяется, становится легче и начинает подниматься. Так возникает конвекция. При этом развитию конвекции оказывает сопротивление вязкость жидкости. В жидкостях с низкой вязкостью, таких, как вода, конвекция осуществляется легко, но в жидкостях липких и густых, напри-

мер, таких, как овсяная каша, конвекция очень затруднена. Поэтому-то, скажем, овсяная каша так долго не остывает.

Учтя все эти соображения, Рэлей пришел к выводу об условиях, которые теоретически необходимы для развития процесса конвекции. Он заявил, что тепловая конвекция начинается, когда некоторая безразмерная функция R , имеющая вид $R = \frac{\alpha^3 g h^4}{k \eta}$, достигает определенной величины (фактически около 1000). Если R меньше этого числа, то тепло передается только посредством обыкновенной теплопроводности. В выражении для R буква h обозначает глубину слоя жидкости, α —коэффициент теплового расширения, соответствующий приращению объема при повышении температуры на 1° , β —температурный градиент, т. е. скорость увеличения температуры внутри слоя в зависимости от глубины, g —ускорение силы тяжести, k —коэффициент температуропроводности, η —вязкость. Возникновение конвекции при возрастании величины R понять (качественно) очень легко. В формуле для R те характеристики, которые облегчают конвекцию, находятся в числителе, а те, которые затрудняют ее,—в знаменателе. Теория Рэрея полностью подтверждает результаты экспериментов Бенара. Поэтому само явление и описывающая его теория были названы конвекцией Бенара—Рэрея, а величина R называется теперь *числом Рэрея*. То значение числа Рэрея, при котором начинается конвекция, называется *критическим числом Рэрея*.

Во время эксперимента Бенара было установлено, что поверхность парафина на краях шестиугольников, где охлаждающееся вещество опускается, оказывается немного выше, чем поверхность в центральной части ячеек, где нагретый материал поднимается. Это не вязалось со схемой мантийной конвекции, потому что поднимающийся мантийный материал образует в океане хребты, а опускающийся материал формирует глубоководные желоба, что прямо противоположно результату, полученному Бенаром. Эта загадка не давала покоя большому числу ученых вплоть до 1950-х годов, когда американец М. Блок и англичанин Дж. Пирсон нашли, наконец, ответ. С учеными сыграло злую шутку поверхностное натяжение. Как это ни поразительно, причиной движения жидкости, наблюдавшегося в эксперименте Бенара, была, согласно Блоку и Пирсону, не тепловая конвекция, а изменение поверхностного натяжения, вызванное изменением температуры. Поскольку роль поверхностного натяжения при большой толщине слоя жидкости, несомненно, уменьшается, *теория Рэрея* сохраняет свое значение для тепловой конвекции в достаточно толстых слоях жидкости. Однако сам эксперимент Бенара, под который Рэлей пытался подвести теоретическую основу, имел, как оказалось, весьма малое отношение к проблеме тепловой конвекции.

Если мы решились утверждать, что в мантии происходит тепловая конвекция, нам прежде всего надо выяснить, выполняется ли в этом случае условие Рэлея. Первая трудность заключается в том, что мантия — это твердое тело. Не потому ли говорят про тело «твердое», что оно не может течь? Рассмотрим, однако, важный факт, который интуитивно вовсе не кажется очевидным. Ни одно вещество, каким бы твердым оно ни было, не в состоянии бесконечно долго сопротивляться действию приложенных к нему сил. Например, высокий железный столб не может вечно выдерживать даже свой собственный вес: через какое-то длительное время он согнется и затем обрушится. Значит, любое твердое тело, даже кристаллическое, такое, как лед, все-таки течет. Просто у большинства твердых материалов скорость течения неощутимо мала. Может ли и мантия быть текучей? Как мы видели в гл. 1, сам факт, что существует изостазия, означает, что мантия, очевидно, обладает свойством текучести: большие горные хребты плавают в мантии в соответствии с законом Архимеда, а этот закон применим только к жидкостям. История Скандинавского полуострова представляет хороший пример развития Земли как текучего тела. Около 10 тыс. лет назад этот полуостров был покрыт толстым слоем материкового льда, и поверхность суши была придавлена, как сильно нагруженный плот. В конце последнего оледенения ледяной покров растаял, а полуостров освободился от его огромной тяжести. Это нарушило изостатическое равновесие, и начался процесс его восстановления: Скандинавский полуостров стал подниматься. В настоящее время он все еще поднимается со скоростью нескольких миллиметров в год. Самое простое объяснение такого процесса состоит в том, что мантия ведет себя здесь как жидкость с вязкостью 10^{21} П (пуаз — стандартная единица вязкости). Это явление получило название *послеледникового выравнивания*.

Другой признак текучести Земли — ее эллипсоидальная форма. Земля не имеет правильной сферической формы из-за центробежной силы вращения, которая заставляет ее выпячиваться по экватору. Это доказывает, очевидно, что Земля в целом также может вести себя как жидкое тело. Таким образом, почти неоспоримо, что в ходе длительного времени, реагируя на слабые, но постоянно действующие напряжения, мантия Земли течет. Если мы рассмотрим все входящие в формулу Рэлея параметры, то увидим, что число Рэлея для конвекции, захватывающей всю мантию Земли, составляет от 10^6 до 10^8 , что на много порядков больше, чем критическое число Рэлея (около 10^3). Значит, мантия Земли полностью удовлетворяет условию Рэлея для конвекции.

Может показаться, что, подставив в знаменатель формулы R величину вязкости 10^{21} , мы не должны получить для числа Рэлея

большое значение. Однако глубина всей мантии h , входящая в числитель в четвертой степени, настолько велика, что число Рэлея также оказывается очень большим, несмотря даже на огромную вязкость и малый температурный градиент (допустим, $0,3^\circ\text{C}/\text{км}$). Итак, если считать мантию нормальной жидкостью (или, как говорят, ньютоновской жидкостью), то существование в ней конвекции кажется естественным и неизбежным. Как кипение воды в чайнике!

Рэлей доказал, однако, только условие, необходимое для начала конвекции в ряде идеализированных ситуаций, но он не объяснил, какого вида конвекционные потоки должны действительно возникать, если число Рэлея много больше критической величины. Целый ряд вопросов, касающихся мантийной конвекции, ждет еще своего решения.

Один из вопросов состоит в том, что мантия, которую мы можем рассматривать здесь как слой вязкой жидкости, представляет собой сферическую оболочку, а не плоский слой, использованный в модели Рэлея. Кроме того, разогревание этой жидкости идет не только снизу, но и изнутри, так как в самой мантии имеются источники тепла в форме радиоактивности. Чтобы изучить эту проблему более реалистически, надо проанализировать много других факторов. Например, различные физические свойства, которые в теории Рэлея предполагаются постоянными, в действительности оказываются функциями температуры и давления. Известно, в частности, что от температуры сильно зависит вязкость: при изменении температуры меньше, чем, скажем, на 100°C , значение вязкости изменяется на много порядков.

Еще важнее то обстоятельство, что мы не можем с уверенностью сказать, действительно ли текучесть мантии подобна текучести обыкновенных, или ньютоновских, жидкостей. Поэтому само определение вязкости в уравнениях движения становится неоднозначным. Возможно, не над всеми этими факторами нам надо ломать голову, но весьма вероятно также, что некоторые из них имеют решающее значение. Сразу же возникает чрезвычайно трудная проблема: решить уравнения движения деформируемой, вращающейся сферической оболочки, вязкость которой может быть неньютоновской. Мы знаем, что эта оболочка четко расслаивается на литосферу, астеносферу и более глубокую мантию и что она нагревается как изнутри, так и снизу. К сожалению, значения важных характеристик, в особенности тех, которые связаны с вязкостью, настолько мало известны, что очень трудно выбрать правдоподобные, реальные модели — даже при наличии самой мощной вычислительной техники. Однако несмотря на все эти трудности, огромные усилия направляются сейчас на то, чтобы продвинуть вперед наше представление о конвекции в мантии.

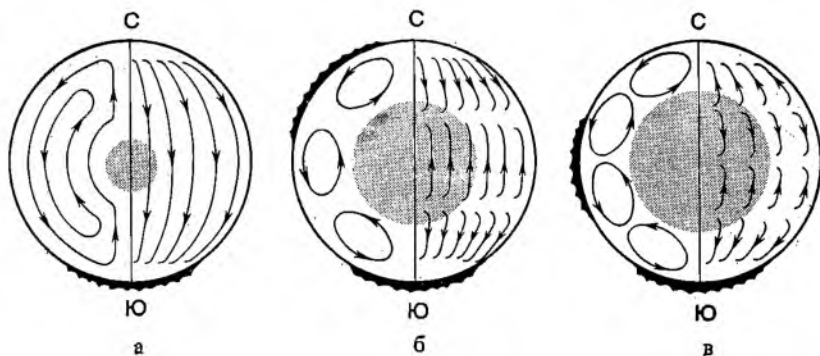


Рис. 6-2. Конвекция в мантии при различных размерах ядра (из журнала «Nature»).

Рисунки а—в показывают последовательное увеличение размера ядра и связанные с ним изменение характера конвекционного течения и раскол континентов.

МОДЕЛИ И ДЕЙСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Известный индийский астроном С. Чандрасекхар (из Чикагского университета) распространил в 1949 г. теорию тепловой конвекции Рэля на сферические тела, в том числе на такие тела, в которых, как и в Земле, содержится другое сферическое тело (ядро). Результаты его исследований указывают на то, что конвекционные потоки больших размеров, охватывающие всю Землю, могут возникать только в случае, если размеры ядра малы. Если же ядро растет, вызывая тем самым уменьшение толщины мантии, расположение конвекционных ячеек претерпевает резкие изменения, а размер ячеек становится меньше.

Теорию Чандрасекхара поддержал С. К. Ранкорн, который использовал ее в 1965 г. для объяснения дрейфа континентов. Он предположил, что когда-то континенты плавали на поверхности больших конвекционных ячеек. На определенных этапах истории Земли рост ядра вызывал резкие изменения в распределении конвекционных потоков. Эти изменения создавали в положении континентов неустойчивость, заставляя их раскалываться и расходиться в разные стороны (рис. 6-2). Как ни горд был Ранкорн тем, что ему удалось придумать такое изящное объяснение, оно тем не менее было встречено оппозицией в штыки. Одни ученые говорили, что, поскольку действительное состояние недр Земли далеко от той модели, к которой применялась теория Рэля — Чандрасекхара, и поскольку число Рэля для мантии, очевидно, гораздо больше критической величины, в мантии невозможно существование простого конвекционного течения, постулированного Чандрасекхаром. Другие утверждали, что простая модель вообще неприемлема для реальной мантии с ее переменной вязкостью. Это только несколько из многих вопросов, возникших после появления этой интересной идеи.

Было предложено принять одно основополагающее допущение, а именно что при достаточно длительном времени Земля может вести себя как идеальная ньютоновская жидкость. Однако никто не уверен полностью, что это действительно так. Мы плохо знаем, какими свойствами течения обладает мантия. Мы даже не знаем точно, из чего она состоит. Применение данных реологии (науки о свойствах деформации и течения вещества) к породам мантии находится еще в зачаточном состоянии. Хотя мы и можем найти породы, которые раньше были частью мантии, но почти невозможно подвергнуть их в лаборатории столь медленной деформации, какая происходит при геологических процессах. Несмотря на эту трудность, Д. Григгс и другие исследователи—основоположники экспериментальных работ в области мантийной реологии и конвекции—приступили к опытам по деформации горных пород. Конечно, выводы из этих опытов еще нельзя считать окончательными, но они уже позволяют предполагать, что свойства мантии Земли отличаются от свойств нормальной ньютоновской жидкости. В ньютоновских жидкостях скорость деформации, или течения, вещества пропорциональна давлению, а скорость деформации вещества Земли, по-видимому, возрастет при повышении давления экспоненциально, на много порядков. Если это так, то течение в мантии может быть сильно локализованным, струйным. В большей части объема течение будет медленным, но если в каком-то месте оно почему-либо ускоряется, то его скорость может возрасти очень сильно. Хотя некоторые исследователи продолжают настаивать на том, что мантия ведет себя как ньютоновская жидкость, но от тех вопросов, которые возникли в результате реологических экспериментов, уйти уже нельзя, и их надо решать, как бы ни были они трудны для современной науки о Земле.

Трудностей же чрезвычайно много. В мантии могут иметь место различные виды фазовых переходов (как между льдом и водой), а также различные виды химических изменений. Когда поднимающийся при конвекции мантийный материал достигает земной поверхности, часть его, вероятно, отделяется, образуя океаническую кору. В то же самое время в мантии может происходить выплавление железа, которое опускается к подошве мантии и добавляется к ядру. Кроме этих факторов существует еще множество других, связанных с мантийной конвекцией. Поэтому не удивительно, что одно из принятых некоторыми учеными допущений—допущение о том, что процессы разрастания морского дна и формирования глубоководных желобов получают исчерпывающее объяснение в простой модели конвекции,—подверглось суровой критике как слишком оптимистическое. Это только один пример проблем, возникающих при сопоставлении моделей и действительности. Хотя нам и очень хотелось бы научиться объяснять запутанные явления с помощью простых моделей, действительность может оказаться слишком сложной, а модель, в кон-

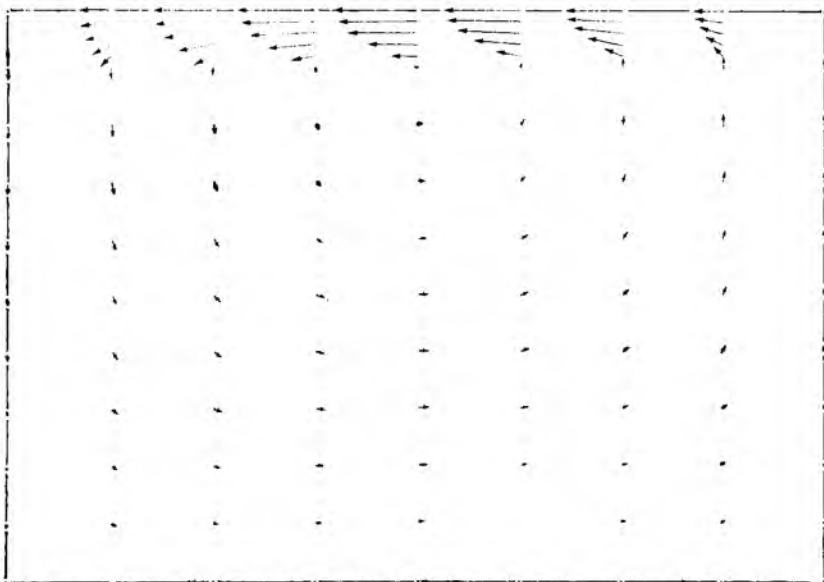


Рис. 6-3. Возможный характер конвекционного течения в жидкости, в которой вязкость возрастает с глубиной (H. Takeuchi, M. Sakata, Convection in a mantle with variable viscosity, J. Geophys. Res., 75, p. 921, 1970).

це концов,— это только модель. И все же отвергать любые попытки строить простые модели, заявляя, что никто и никогда не сможет постичь даже физические принципы таких явно сложных моделей,— значит отгораживаться от насущных задач, проявляя тем самым упрямство и неблагоприятное. Нынешняя наша неспособность построить количественную теорию мантийной конвекции не означает, что мы вправе вовсе отбросить представление о такой конвекции. Такая позиция вязалась бы с научным подходом ничуть не лучше, чем необоснованный оптимизм.

Те, кто придают большое значение слоистому устройству мантии, особенно существованию в верхней мантии слоя мягкой астеносферы, склонны утверждать, что конвекционное течение не захватывает всю мантию целиком, а ограничивается пределами астеносферы. При таком подходе, хотя и весьма обоснованном, возникает другая проблема. Теория Рэлея и все другие, более сложные теоретические построения требуют, чтобы *отношение сторон* конвекционной ячейки, т. е. отношение ее горизонтального размера к вертикальному, было бы близко к единице. Эксперименты также подтверждают это заключение. Следовательно, для того чтобы в мантии могли существовать такие конвекционные ячейки, их горизонтальный размер должен быть сравним с толщиной астеносферы, т. е. быть порядка сот километров.

Однако движения, наблюдаемые на поверхности Земли,— дрейф континентов и разрастание морского дна — захватывают области гораздо большей протяженности: порядка многих тысяч километров. Это несоответствие горизонтальных размеров беспокоило многих ученых. Но вот японские ученые Х. Такеути и М. Саката показали, что если построить модель, в которой вся мантия разделяется на астеносферу, имеющую низкую вязкость, и нижнюю мантию, обладающую высокой вязкостью, то характер течения, по крайней мере в начальной стадии конвекции, должен быть примерно таким, как это показано на рис. 6-3. Главное течение будет сосредоточено в верхнем мягком слое, а обратный поток будет распределяться по всей глубине нижележащего слоя высокой вязкости. Это означает, что горизонтальный размер всей ячейки может быть значительно больше, чем глубина астеносферы. По-видимому, этот результат в какой-то мере объясняет отмеченное выше несоответствие горизонтальных размеров. Однако мне по-прежнему кажется, что проблема отношения сторон конвекционных ячеек еще не решена. Мы вернемся к этой теме в другом разделе.

ГИПОТЕЗА И ФАКТЫ

В такой области знания, как науки о Земле, где неоднократное наблюдение каких-либо явлений с помощью лабораторных экспериментов затруднено в силу самой природы этих явлений, конфликт между моделью и фактами бывает очень острым. Ученые часто рассуждают о том, «верить» или «не верить» в гипотезу разрастания морского дна или в тектонику плит, но в действительности речь идет не о вере. Речь идет о «рабочих гипотезах», а первая задача, предъявляемая к гипотезе, состоит в том, чтобы объяснить какой-то факт или группу фактов таким образом, чтобы наши знания продвинулись вперед. Обоснована ли гипотеза с научной точки зрения или нет, это должно оцениваться не только по ее «работоспособности», но и по другим меркам. Ясно, что мы не можем принять *любую* гипотезу. Но если мы станем сразу же отвергать рабочую гипотезу, которую не в состоянии пока полностью доказать, то из чего же мы будем исходить при создании новой гипотезы? Полезная гипотеза со временем наберет силу, и чем сильнее и глубже она станет, тем строже она будет проверяться фактами. Часто этот процесс протекает так: кто-то берет на вооружение новую рабочую гипотезу, позволяющую предсказать какое-то явление как ее логическое следствие, а это предсказание проверяется затем независимыми наблюдениями или экспериментами. В какой-то стадии такого процесса могут встретиться непреодолимые трудности, и тогда эту гипотезу придется оставить. Тем не менее к моменту, когда мы ее отвергнем, наши знания продвинутся дальше, чем были до того, как мы начали использовать эту гипотезу. Таково свойство всех гипотез, и

когда мы выдвигаем новую, мы фактически говорим следующее: «Мы не утверждаем, что это факт. Мы только предполагаем, что к исследованию такого-то явления можно подойти таким-то путем. Мы продолжаем наши попытки исследовать эффективность такого подхода». Можно ли действовать иначе?

ТЕПЛОВАЯ ИСТОРИЯ ЗЕМЛИ: ПРИМЕР РАЗВИТИЯ ГИПОТЕЗЫ

Возможно, что окончательный ответ на вопрос о происхождении Земли не удастся получить никогда. Только 30—40 лет назад многие думали, что первозданная Земля была огненным шаром, оторвавшимся от Солнца, а история Земли представлялась как процесс постепенного остывания этого шара. Еще в XIX в. ученые во главе с такими основоположниками современной науки, как знаменитый лорд Кельвин (У. Томсон), рассчитали тепловую историю Земли на основе предположения о том, что наша планета прошла путь от раскаленного месива до современного холодного и твердого состояния. Затем на пороге нашего столетия А. Беккерель и М. Кюри открыли радиоактивность и радиоактивные элементы, существующие в недрах Земли. Это заставило ученых задуматься о том, что, хотя Земля и остывает, в ней имеется и свой источник тепла. Вскоре они занялись новыми вычислениями по тепловой истории Земли, с тем чтобы учесть этот новый источник. Земля настолько велика, что даже без этого источника тепла она не может быстро остыть, а внутренний разогрев должен еще более задержать процесс охлаждения. Расчеты показали, что если Земля, содержащая источники тепла, первоначально была горячей, она не успела бы остыть до нынешнего состояния! Так был брошен вызов представлению о Земле как о некогда огненно-жидком, а затем застывшем шаре. В 1940-х годах астрономическая концепция происхождения Солнца и Солнечной системы претерпела значительные изменения; некоторые ученые предложили даже совершенно иную идею. Земля не отделилась от Солнца, утверждали они, а скорее образовалась из скопления холодной космической пыли.

Приблизительно в это же время добавились новые сведения и к нашим знаниям о теплопроводности земных недр — другом важнейшем факторе, необходимом для изучения тепловой истории Земли. Раньше теплопроводность вводилась в простое уравнение передачи тепла как постоянная величина. Однако было выяснено, что она уменьшается при повышении температуры, а это означает, что Земля остывает еще медленнее, чем считалось раньше. Но к концу 1950-х годов ученые сделали вывод, что теплопроводность должна возрастать, когда температура становится выше 1000—1200°C, потому что тепло может тогда передаваться посредством излучения — даже в таких веществах, как горные породы. Простые теоретические расчеты, выполненные С. П. Кларком на основе закона теплового излучения, указали на

то, что перенос тепла путем излучения должен возрастать пропорционально кубу абсолютной температуры. При высокой температуре горные породы, по сути дела, почти прозрачны для тепловых лучей. Были проведены многочисленные вычисления, учитывающие роль переноса тепла путем излучения в тепловой истории Земли.

Вследствие того что приходилось учитывать все новые и новые факторы, уравнения для тепловой истории Земли постепенно становились все более сложными, пока, наконец, не сделались почти неразрешимыми. Выручило ученых не что иное, как появление в конце 1950-х годов быстродействующих вычислительных машин. Ученые, например Е. А. Любимова (СССР) и Дж. Макдоналд (США), подсчитали, учтя все известные факторы и проведя анализ многочисленных моделей, каким должно было быть начальное состояние Земли, чтобы в конце концов создалось ее современное состояние. В настоящее время ядро и мантия образуют четкую слоистую структуру Земли. Любая теория развития Земли должна объяснять эту главнейшую ее особенность. Наиболее вероятным считалось предположение, что для возникновения такой структуры в ранней истории Земли должно было произойти ее полное расплавление. Это соображение было одним из сильнейших аргументов в пользу гипотезы «горячего происхождения».

Однако работы Любимовой и Макдоналда показали, что, если даже Земля 3—4,5 млрд. лет назад была в холодном состоянии, для плавления мантии вполне хватило бы того тепла, которое выделилось, когда железо стало скапливаться в центре Земли, образуя ядро, а легкие элементы стали подниматься к поверхности, образуя кору. Это доказательство сильно укрепило гипотезу «холодного происхождения». Но все модели, использованные учеными для их расчетов, были моделями твердых тел, так что единственными способами переноса тепла, которые в них учитывались, были теплопроводность и излучение в твердом теле¹. Хотя авторы расчетов говорили о крупных перемещениях внутри Земли, необходимых для образования структуры, состоящей из ядра и мантии, сами эти расчеты опирались только на теорию теплопроводности в твердом теле вплоть до точки плавления, а иногда вычисления проводились тем же способом и для температур выше точки плавления!

Если конвекция, захватывающая большие объемы мантии, происходит, как мы утверждаем в этой книге, непрерывно, при температурах и ниже, и выше точки плавления, то бессмысленно рассчитывать условия, существовавшие в прошлом в недрах Зем-

¹ В конце 1960-х годов японские ученые И. Фукао, Х. Мидзутани и автор этой книги, а также американские ученые Дж. Аронсон и Р. Мак-Коннелл установили, что доля теплового излучения в общей теплопроводности слагающего Землю материала значительно меньше, чем предполагалось в этих расчетах.

ли, не учитывая переноса тепла посредством конвекции. Если конвекция в Земле действительно происходит, то Земля должна остывать гораздо скорее, точно так же как жидкий суп остывает гораздо быстрее, чем густая каша. Англичанин Д. Тозер убедительно показал в 1969 г., что конвекция в Земле начинается при некоторой температуре ниже точки плавления, так что максимальная температура в недрах Земли определяется температурой этого размягчения независимо от начальных условий. Однако полного изучения тепловой истории Земли с этой точки зрения до сих пор не проведено.

Если Земля действительно образовалась путем скопления холодной космической пыли, которая затем постепенно нагревалась, причем тяжелые частицы железа плавилась и собирались в центре, образуя ядро планеты, то при этом должно было высвободиться в виде тепла громадное количество гравитационной энергии. Ф. Берч, известный авторитет в вопросах физики твердой Земли, был одним из первых, кто указал, что энергия, высвобождавшаяся при осаждении железа, была бы достаточной, чтобы нагреть весь земной шар примерно на 1000°C и расплавить его целиком. В этом случае расчеты, в которых такой большой источник тепла не принимается во внимание, были бы беспредметными. Д. Андерсон высказал недавно предположение, что, когда конденсировался космический газ, а частицы начинали срастаться, аккреция вещества ядра происходила в первую очередь; таким образом, слоистая структура Земли, представленная ядром и мантией, возникла вместе с образованием Земли. Это предположение основано на космогоническом выводе о том, что железо, слагающее земное ядро, было одним из первых продуктов конденсации космического газа. Если такое предположение верно, то отпадает необходимость учета гравитационной энергии осаждения железа. Решение этой проблемы зависит, однако, от того, насколько хорошо мы знаем процесс, в результате которого образовались Земля и другие планеты. Есть и другие важные вопросы, для решения которых требуются новые усилия космогонической мысли. Если Земля — это сгусток космической пыли, которая раньше была рассеяна в пространстве, а затем собралась в форме шара, то, пока это происходило, огромное количество гравитационной энергии должно было перейти в тепло. По расчетам, эта энергия на много порядков больше, чем энергия, высвободившаяся при отделении ядра от мантии! Если аккреция Земли протекала быстро, то тепло должно было эффективно захватываться Землей. Таким образом, если Земля росла с достаточно большой скоростью, то мы можем сказать, что процесс образования нашей планеты шел, вероятно, в условиях очень высокой температуры.

Радиоактивные источники тепла, как хорошо известно, с течением времени распадаются. Это означает, что в прошлом радиоактивного тепла выделялось больше. Некоторые радиоактив-

ные изотопы, такие, как алюминий-26, железо-60 и хлор-36, распадаются настолько быстро, что к настоящему времени они полностью исчезли. Но в то время, когда во Вселенной проходил синтез материи, появилось, согласно имеющимся оценкам, и большое количество таких короткоживущих изотопов. Если рождение нашей планеты произошло, скажем, немногим позже чем через 10^7 лет после ядерного синтеза, то такие изотопы могли дать большую добавку к общему теплу Земли.

Обычно считали, что аккреция Земли продолжалась около 10^8 лет или больше. Если это так, то никакой из источников тепла — ни гравитационная энергия аккреции, ни радиоактивность короткоживущих изотопов — не оказал существенного влияния на этот процесс. Но в последнее время получены различные данные геохимии и космохимии, а также данные теоретической космогонии, указывающие на то, что процесс аккреции мог развиваться гораздо быстрее. Японские ученые Х. Мидзутани и Т. Мацуи предположили, что этот процесс занял всего лишь около 10^9 лет! Если они правы, то Земля первоначально обладала колоссальным количеством тепла. Тогда вычисленная Тозером температура размягчения могла быть достигнута очень легко, и, следовательно, с того момента в Земле постоянно шла конвекция, необходимая для удаления тепла. При этом должно было быстро произойти формирование ядра. При такой возможности как бы возрождается столетней давности гипотеза «горячего происхождения», но логика, приводящая к этой гипотезе, совершенно иная.

Одной из причин отказа от гипотезы «горячего происхождения» был тот факт, что Земля, будучи гигантским твердым телом, не могла так быстро остыть. Однако если допустить существование активной мантийной конвекции, это противоречие можно устранить. Более того, если учесть конвекцию в мантии, то идея о том, что источники внутреннего тепла неизбежно должны были создать в Земле условия чрезвычайно высокой температуры, кажется сомнительной.

Если мы теперь суммируем все эти рассуждения, станет ясно, что настало время отбросить навязчивую идею о Земле как о нетекучем твердом предмете и заново рассмотреть тепловую историю Земли с точки зрения рабочей гипотезы, в которой утверждается, что Земля текуча. В этой связи исключительно интересна перспектива объединения работ по тепловой истории Земли с развитием представлений тектоники плит (странно, что до сих пор эти две области исследовались порознь). Можно предвидеть, что такой синтез даст поистине захватывающие результаты!

Оглядываясь на прошлые исследования относительно истории Земли, мы обнаруживаем, что некоторые важнейшие вопросы, такие, как была ли Земля в начале горячей или холодной или была ли она когда-нибудь полностью расплавленной, поднимаются снова и снова. И все же никто не осмелится объявить исследова-

ния, проводившиеся в тот или иной период, бесполезными, потому что каждый раз мы возвращаемся к поискам истины, вооруженные более глубокими знаниями.

ОСТАЮЩИЕСЯ ВОПРОСЫ

Хотя преобладающее представление о Земле сместилось от фиксистского к мобилистскому, великое множество вопросов еще остается нерешенным. Часто можно видеть, что гипотезы, которые в первом приближении считались достаточно хорошо обоснованными, при дальнейшем анализе оказывались полны неразрешимых проблем. Может быть, теории разрастания морского дна и тектоники плит подходят к этой точке. Среди тех, кто настроен к «новому взгляду» резко критически, видное место занимает советский ученый В. В. Белоусов. В статье, озаглавленной «Против гипотезы разрастания морского дна» [4], опубликованной в 1970 г., он указал на многие из тех трудностей, с которыми сталкивается гипотеза разрастания морского дна. Хотя главный смысл его возражений заключается в том, что «новый взгляд» не может объяснить, к его удовлетворению, особенностей геологии континентов, часть критических замечаний сосредоточена на предполагаемом происхождении океанического дна. По обеим сторонам от оси океанического хребта располагаются симметричные пояса различного типа; наиболее характерные из них — полосы магнитных аномалий. Анализ магнитного профиля, например такого, как на рис. 3-3, показывает, что аномалии сильнее вблизи оси хребта и становятся слабее с удалением от этой оси. В глубинной структуре срединно-океанических хребтов, какой она представляется по материалам сейсмической разведки или по результатам анализа аномалий силы тяжести, также проявляются изменения, зависящие от близости к оси хребта, а именно второй слой оказывается толще на гребне хребта, тогда как третий слой становится толще с удалением от оси хребта. Если океаническое дно раздвигается, как на лентах конвейера, то участки современного дна, расположенные в настоящее время в сотнях километров от гребня хребта, когда-то должны были находиться на самом этом гребне. Почему же тогда, спрашивает Белоусов, структура гребня хребта не похожа на структуру отдаленных участков морского дна? Это ценное замечание и один из тех фактов, которые многие ученые стараются объяснить. По-видимому, есть некоторая надежда сделать это, учтя, как изменяются по мере разрастания океанической коры такие ее свойства, как степень выветривания, проявления гидратации и других метаморфических процессов.

Другой аспект критических замечаний Белоусова касается распределения осадков на верхнем слое океанического дна. На гребне хребта осадки почти полностью отсутствуют, тогда как дальше от хребта слой осадков становится все более тол-

стым. Качественно это подтверждает гипотезу разрастания морского дна, поскольку из этой гипотезы следует, что гребень хребта моложе, чем более удаленные области. Однако количественно обстановка не полностью удовлетворяет требованиям теории: мощность осадочного слоя возрастает не равномерно, как можно было предположить по этой теории, а как-то беспорядочно. Белоусов считает это еще одним затруднением, которое надо разрешить, чтобы доказать гипотезу разрастания морского дна. Но здесь снова приходят на помощь те многочисленные данные, которые были собраны во время работ по Проекту глубоководного бурения. По-видимому, мощность осадков уменьшается с удалением от экваториальной зоны, характеризующейся высокой скоростью биогенной седиментации, так что распределение мощности осадков на океаническом дне отличается от простой функции, учитывающей только расстояние от хребтов.

С морскими осадками связан и другой вопрос. Что происходит с осадочными породами, которые транспортируются океаническим дном, когда это дно погружается в мантию у океанических желобов? Не должны ли осадочные породы набиваться между океанической и континентальной плитами, сминаться в складки, а затем размазываться по дну желобов? Однако наблюдения в желобах обнаруживают иную картину. На дне желобов найдено немного осадков, и они деформированы, по-видимому, не очень сильно. Если мы предположим, что субдукция происходила в течение последних 100 млн. лет и что мощность осадков на поддвигающемся океаническом дне составляет в среднем 200 м, то к настоящему времени в желобах должно было накопиться около 20 км осадков. Кроме того, в глубоководные желоба постоянно доставляется осадочный материал с суши. Количество этого материала может даже значительно превышать количество осадочных пород, транспортируемых океанической плитой. В итоге в желобах должно скапливаться очень много осадков. Но фактически в большинстве желобов дно прикрыто только тонким чехлом недеформированных осадочных пород. Белоусов спрашивает: в чем причина такого несоответствия? В настоящее время местоположение «пропавших» осадков выясняется благодаря развитию методов глубинного зондирования с помощью отраженных сейсмических волн. Записи, подобные тем, что показаны на рис. 2-3, накапливаются для предстоящего анализа.

На рис. 6-4 показана схема, которой ныне придерживаются ученые. «Исчезнувшие» осадки нагромождены, согласно этой схеме, на прибрежном борту желоба и имеют чрезвычайно характерный облик. Как чехол океанических осадков, так и осадочный материал, поступивший с суши, расщеплены надвигами на тонкие ломти, смяты в складки и образуют сложно построенную разнородную структуру, которую называют *аккреционной призмой* (см. также рис. 5-23). Подозревают, что во многих местах к этой призме «прирастают» не только мягкие осадочные породы,

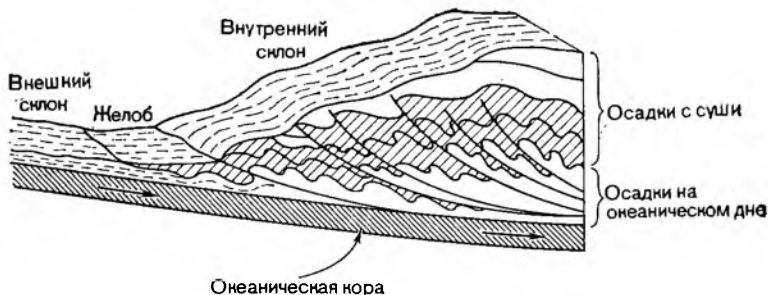


Рис. 6-4. Модель внутреннего склона желоба (D. R. Seely, P. R. Vail, G. Walton, A trench slope model, in C. A. Burk and C. L. Drake, eds., "The Geology of Continental Margins", Springer-Verlag, 1974. (См. также русский перевод: Геология континентальных окраин, под ред. К. Берка и Ч. Дрейка. — М.: Мир, с. 277, 1978).

Стрелками показано движение океанической коры.

но и отщепляющиеся пластинки магматического фундамента (т. е. океанической коры).

Деформированные осадочные породы морского происхождения уже много лет легко распознаются геологами и описываются ими как *геосинклинальные отложения*. С многими такими отложениями ассоциируются изверженные породы, называемые *офиолитами*, происхождение которых до сих пор остается неясным. В настоящее время представляется весьма вероятным, что офиолиты — это куски древней океанической коры, надвинутой на континент вместе с осадками океанического дна, образующими геосинклинальный комплекс. Что же в действительности происходит в зонах субдукции? Несомненно, что в последующие годы это будет одним из важнейших вопросов исследования. На смену Проекту глубоководного бурения, завершеному в 1975 г., пришел Международный этап океанского бурения (IPOD). Бурение в зонах субдукции считается одной из первейших задач этих международных работ. Можно надеяться, что бурение на континентальных склонах желобов даст нам те сведения, которые необходимы для решения упомянутых здесь важных проблем.

Еще один вопрос из тех, которые Белоусов назвал «таинственными», — это вопрос о миграции океанических хребтов (см. стр. 101—108). Считается, что океанический хребет — это то место, где поднимается мантийный конвекционный поток и образуется новое морское дно. Может ли такая зона мигрировать с места на место только для того, чтобы удовлетворялись геометрические требования движения плит? Белоусов утверждает, что предположение о том, что океанический хребет может к тому же и сам погрузиться в океанический желоб, — явное внутреннее противоречие. Его точка зрения понятна, но это кажущееся противоречие разрешается, если принять альтернативный взгляд на природу

хребтов, а именно что они, возможно, не являются отражением восходящих потоков глубинной мантийной конвекции, а представляют собой пассивные окна, через которые материал астеносферы выходит на поверхность, образуя новые части плит.

Еще более таинственными, чем мигрирующие хребты, представляются так называемые «зоны разлома». Когда Дж. Т. Уилсон в 1965 г. объяснил эти зоны как трансформные разломы [50], это было большим вкладом в наше понимание их природы. Однако сам Уилсон не дал полного объяснения того, почему же все-таки происходит начальное смещение хребтов. Если океанический хребет — это зона, в которой поднимается конвекционный поток, то почему хребты бывают так резко смещены по трансформным разломам? Поскольку здесь речь идет о текучем веществе, гораздо вероятнее было бы появление гладких изгибов, а не резких углов. Принимая во внимание все эти соображения, ученые склоняются теперь к мысли, что хребты действительно представляют собой скорее «окна», чем поверхностное выражение глубинной конвекции. Но если хребты не создаются конвекционными потоками, циркулирующими в мантии, то как же быть с той главнейшей идеей, согласно которой плиты приводятся в движение мантийной конвекцией? Короче говоря, защитники континентального дрейфа когда-то никак не могли найти движущий механизм для него, и они, как мессию, встретили идею мантийной конвекции, которая подсказала им этот механизм и спасла теорию. Теперь, по иронии судьбы, мантийная конвекция уже чуть ли не отвергается теми, кто сильнее всех привержен идеям разрастания морского дна и тектоники плит.

В своей беспощадной критике Белоусов, а также американский геолог-нефтяник А. Мейерхофф указали на опасности, которые таит в себе чересчур «смелая» схематизация при попытках объяснить сложное явление только по одному из его поверхностных выражений. (Такие «смелые» объяснения можно уподобить тому, как еще недавно астрономы, видя темные пятнышки на поверхности Марса, соединяли их в линии, чтобы доказать существование там каналов.) Другими словами, очень легко «увидеть» все что угодно, если глаза зрителя уже ослеплены предвкушением того, что ему хотелось бы увидеть. Однако то толкование морской геологии, которое дает ей сам Белоусов, также подвергается критике. В кратком изложении его взгляды сводятся, по-видимому, к тому, что континенты — это образования древние и что постепенно они испытывают «океанизацию». Развитие океана вызывается каким-то процессом, который захватил вначале периферические районы современного океана. К настоящему времени «океанизация» достигла района срединно-океанического хребта. (Это объясняет последовательное уменьшение возраста океанического дна по направлению к хребтам!) У Белоусова, по-видимому, нет исчерпывающего объяснения для физико-химического механизма «океанизации». Он предполагает, что

какой-то вид горячей жидкости просачивается из мантии и вызывает превращение континентальной коры в океаническую. Многие петрологи считают, однако, что такой процесс совершенно невозможен. И все же отбрасывать полностью точку зрения Белоусова только потому, что она трудна для теоретического объяснения, значило бы проявлять недальновидность, особенно если тщательный анализ процесса «океанизации» с различных точек зрения покажет, что эта гипотеза значительно более правдоподобна, чем другие. Таким образом, «океанизация» — это еще одна рабочая гипотеза. Кто знает, может быть, она знаменует собой начало *еще более нового* взгляда на Землю!

ДВИЖУЩИЙ МЕХАНИЗМ (1): СВОДКА ВОЗМОЖНЫХ ВАРИАНТОВ

Теперь, возвращаясь к тектонике плит, напомним, что установление движущего механизма имеет для нее важнейшее значение. Какие правдоподобные варианты такого механизма были предложены до сих пор? Мы видели, что гипотеза простого конвекционного потока встречает многочисленные трудности. Проблема горизонтального размера ячеек (стр. 180) и проблема миграции хребтов (стр. 108) уже дают нам достаточное основание сомневаться в важности конвекционного течения в астеносфере. В 1973 г. молодой советский геофизик Е. В. Артюшков привел еще более сокрушительный довод против мантийной конвекции. Он убедительно показал, что вязкость астеносферы, особенно под океаническими областями, должна быть на один или два порядка меньше обычно принимаемой величины, которая была определена по скорости последнедевонского выравнивания (стр. 175) в Скандинавии и Северной Америке. Следовательно, механическая сила, обусловленная течением в астеносфере и действующая на подошву литосферы, должна быть чересчур слабой, чтобы играть сколько-нибудь важную роль. Артюшков заявил, что хотя в астеносфере действительно может происходить течение, оно не оказывает влияния на движение плит. Независимо от того, полностью ли прав Артюшков или нет, общий вопрос о движущем механизме, очевидно, требует еще серьезных раздумий.

Д. Форсайт и я [17] начали поиски ответа на этот важнейший вопрос в 1972 г., когда я был приглашен преподавателем в Массачусетский технологический институт. Работа показалась нам малоперспективной, и мы прервали ее вплоть до 1974 г., когда стали сотрудничать в Геологической обсерватории Ламонт-Догерти. Нет необходимости говорить, что проблема не была решена нами окончательно. Целый ряд ученых продолжает работать над ней и в настоящее время. Хотя одни из них приходят к выводам, сходным с нашими, взгляды других отличаются от наших представлений. Дальше речь пойдет только о нашем собственном подходе к этой проблеме.

Континентальная плита

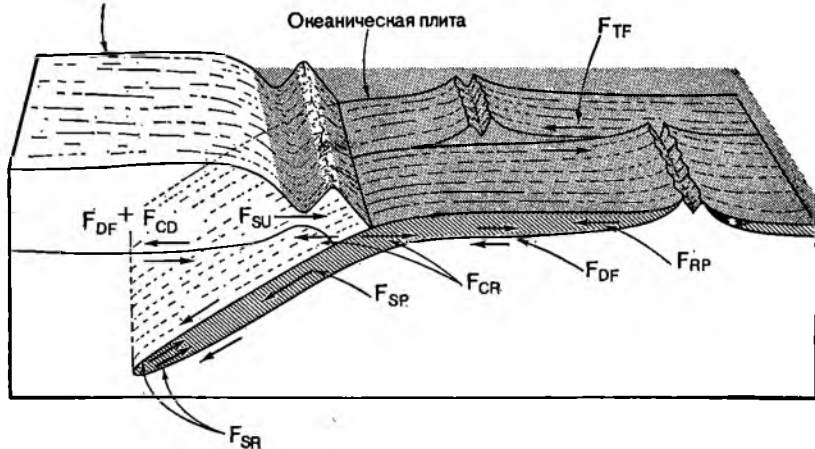


Рис. 6-5. Возможные силы, действующие на литосферные плиты [17].

В первую очередь нам надо было провести обзор основных движущих механизмов, предлагавшихся в последние годы теми геофизиками, которые хорошо представляли себе трудности, заключенные в схеме простой мантийной конвекции. Эти движущие силы показаны на рис. 6-5. Давайте проанализируем их.

Сила сцепления с мантией. Ясно, что, когда движется крупная плита, в более глубоких частях мантии должно происходить внутреннее течение масс от желоба к хребту, уравнивающее перенос масс. Таким образом, почти нет сомнения, что течение в мантии существует. Классическая теория мантийной конвекции предполагает, что течение материала, находящегося непосредственно под плитой, тащит эту плиту и, значит, направлено в сторону ее движения. Следовательно, в более глубоких частях мантии должно происходить обратное течение. Но если, как мы постараемся здесь объяснить, плита приводится в движение какой-то иной силой или действием нескольких сил, то обратное течение материала может проходить непосредственно под плитой, а астеносфера будет действовать тогда на движение плиты как своего рода тормоз. Движущая или тормозящая *сила сцепления плиты с мантией* F_{DF} пропорциональна площади плиты и ее скорости движения относительно астеносферы. Поскольку вязкость астеносферы под континентами может быть выше, к силе сцепления плиты с мантией F_{DF} , действующей на континентальную часть плиты, добавляется дополнительная сила — *сила континентального сцепления* F_{CD} .

Давление хребта. Хотя хребты, возможно, образуются пассивно, они имеют приподнятый рельеф и глубокие корни из ма-

териала с низкой плотностью. Такой хребет, даже находящийся в изостатическом равновесии, обладает большей потенциальной энергией, чем древнее морское дно, на котором нет хребтов. Таким образом, хребты стремятся расползаться в стороны, создавая тем самым силу давления хребта F_{RP} , действующую на плиты по обе стороны хребта. Некоторые геофизики утверждают, что эта сила и является главным движущим механизмом.

Сила тяги пластины и сопротивление движению пластины.

Пластина, поддвигающаяся под желоб, считается более холодной и плотной, чем окружающая мантия. Несколько геофизиков высказали предположение, что отрицательная плавучесть, обусловленная разностью плотностей, должна тянуть пластину вниз и что эта *сила тяги опускающейся пластины* F_{SP} передается на всю плиту и служит важной движущей силой [16]. Теоретические расчеты показывают, что тяга пластины F_{SP} может быть на порядок сильнее, чем давление хребта F_{RP} . Поскольку сила F_{SP} создается объемной силой тяжести, она прямо пропорциональна разности плотностей пластины и окружающей мантии и не зависит от скорости движения пластины, пока эта скорость достаточно велика (скажем, больше 5 см/год). Если же скорость опускающейся пластины будет меньше, приток тепла из окружающего материала значительно уменьшит разность температур, а значит, и разность плотностей между опускающейся пластиной и окружающей мантией. По мере того как пластина погружается в мантию под действием силы F_{SP} , она должна встречать *сопротивление движению* F_{SR} , которое для простоты можно считать пропорциональным скорости поддвига. Полагают, что сила сопротивления движению действует только на передний край пластины, потому что на малых глубинах мантия, вероятно, мягкая.

Засасывание. Мы видели, что вдоль края Тихого океана глубоководные желоба и надвигающиеся континентальные плиты постепенно смещаются в сторону моря, так что площадь Тихого океана уменьшается, а площадь Атлантического океана возрастает. В 1971 г. Эльзассер объяснил этот факт действием *силы засасывания* F_{SV} . Хотя природа этой силы и ее значение еще не ясны, мы включаем ее в наш перечень для полноты картины и считаем, что она не зависит от скорости движения плит.

Сопротивление, связанное со столкновением плит и с движением вдоль трансформных разломов. Можно предвидеть, что плиты при своем движении должны встречать сопротивление различного характера. Сопротивление движению опускающейся пластины F_{SR} , упоминавшееся выше, действует на передний край пластины, тогда как силы сцепления с мантией F_{DF} и F_{CD} приложены к нижней поверхности всей движущейся плиты. Эти два вида сопротивления действуют между плитой и более глубокими частями мантии. Другие виды сопротивления — *сопротивление столкновению плит* F_{CR} и *сопротивление трансформных разломов* F_{TF} — действуют между плитами. Большинство мелко-

фокусных землетрясений вызываются силами этого «межплитового» сопротивления. Сила F_{CR} — это сопротивление на границах столкнувшихся (или сближающихся) плит. Мы полагаем, что его величина не зависит от относительной скорости плит, т. е. от скорости движения одной плиты относительно другой. На первый взгляд может показаться странным, когда говорят, что сопротивление движению плит имеет всюду одинаковую величину, не зависящую от скорости плит. Но мы знаем, что, когда напряжения достигают критической величины, происходят землетрясения; поэтому вполне разумно, наверное, будет предположить, что большая относительная скорость движения плит становится причиной более высокой сейсмичности, но не вызывает более сильных напряжений. То же самое относится и к силе сопротивления трансформных разломов F_{TF} . Хотя величина этих сил не зависит от скорости движения плит, их направление определяется этим движением, т. е. эти силы действуют в направлении, антипараллельном направлению относительного движения плит. Следует указать также, что действие этих сил на обе находящиеся в относительном движении плиты равно по величине и противоположно по направлению как следствие закона Ньютона о действии и противодействии.

Итак, возможные движущие силы — это тяга опускающейся пластины F_{SP} , давление хребта F_{RP} и засасывание F_{SU} , а силы сопротивления — сопротивление движению опускающейся пластины F_{SR} , сопротивление на границе столкновения плит F_{CR} и сопротивление на трансформных разломах F_{TF} . Относятся ли силы сцепления с мантией F_{DF} и F_{CD} к движущим или тормозящим движению, зависит от направления движения плиты относительно движения подстилающей астеносферы.

Как узнать, какие из перечисленных сил имеют большее значение, а какие — меньшее? Это можно сделать только путем тщательного исследования фактически наблюдаемого движения плит. Мы изучили движение 12 плит, показанных на рис. 6-6. Направление и скорость *относительного* движения каждой пары плит определяются на основе анализа, методика которого принята в тектонике плит (см. гл. 4). Но поскольку некоторые силы (F_{DF} , F_{CD} , F_{SP}) зависят от скорости движения плит относительно мантии, т. е. от их *абсолютной* скорости, нам пришлось определять и эти скорости. Чтобы вычислить их, мы предположили, что мировая система *горячих точек* остается неподвижной относительно глубоких частей мантии. Ну, а что же это такое — горячие точки?

ГОРЯЧИЕ ТОЧКИ

В 1965 г. Дж. Т. Уилсон, автор гипотезы о трансформных разломах, выдвинул еще одно предположение. Он заметил, что в некоторых местах земного шара, например на Гавайях и в Исландии

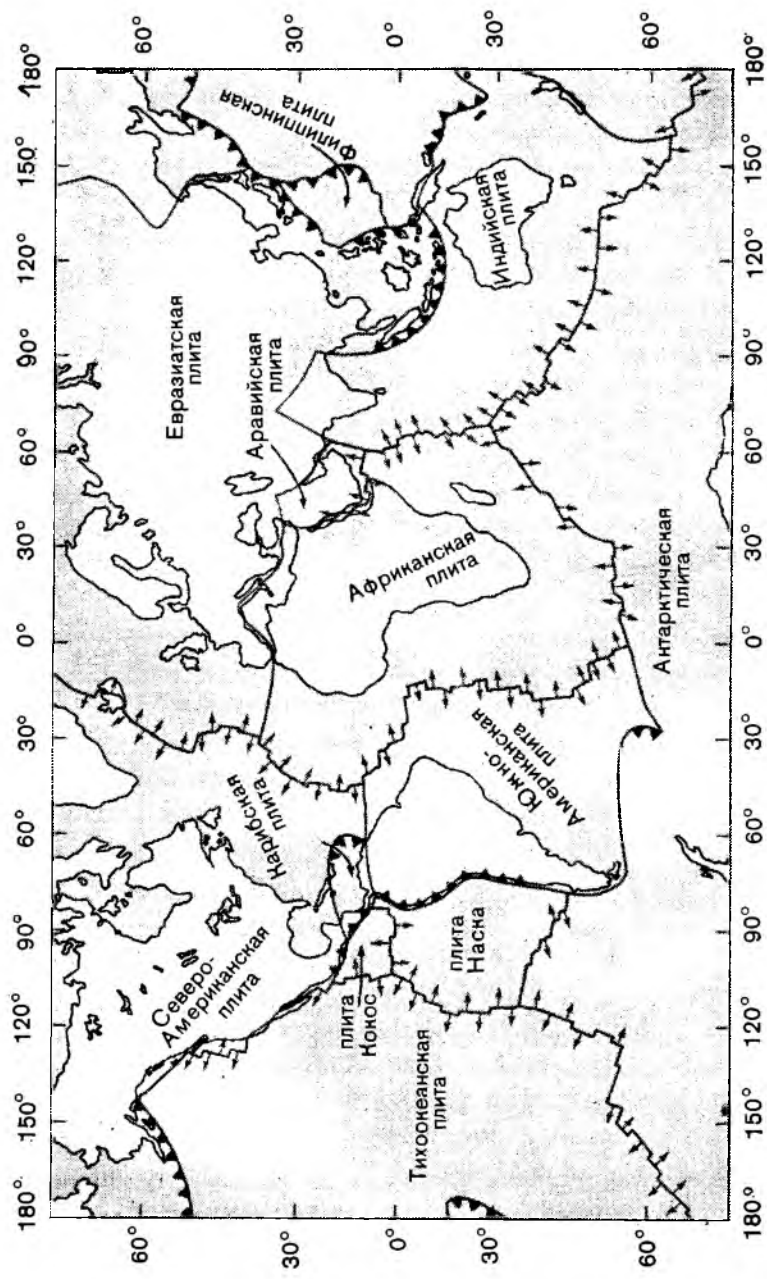


Рис. 6-6. Схема расположения и движения 12 плит [17].

Треугольные зубцы вдоль некоторых границ указывают направление подвига, известное в тех местах, где положение опускающейся плиты можно определить по очагам промежуточных или глубоководных землетрясений. Короткими стрелками на границах, проходящих по хребтам, схематически показано направление относительного движения плит.

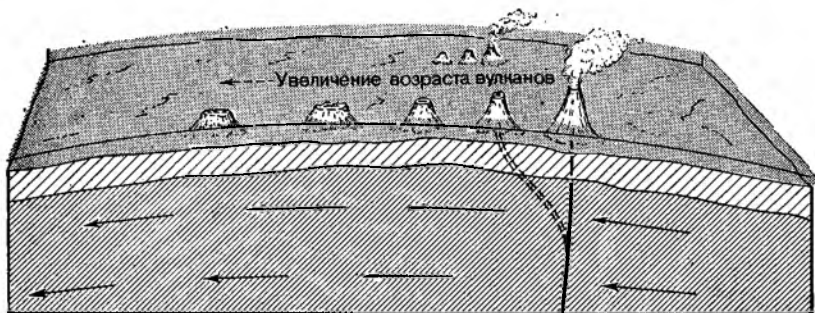
дни, вулканы действуют уже долгое время. Источники магмы, питающие эти вулканы, располагаются, по имеющимся данным, значительно глубже подошвы литосферы, так что положение районов вулканической деятельности фиксировано относительно мантии. Когда плита, находящаяся над таким очагом выплавления магмы, сдвигается в сторону, поверхностные вулканы перемещаются вместе с плитой, но очаг продолжает действовать в прежнем месте. В результате должна возникнуть длинная цепочка вулканов, такая, как Гавайская вулканическая цепь (рис. 6-7, а). И в самом деле, известно, что возраст вулканической деятельности на этой цепи островов увеличивается с расстоянием от активного в настоящее время острова Гавайи, расположенного на юго-восточном конце цепи (рис. 6-7, б).

Когда такой очаг действует на активно раздвигающемся хребте, например как в районе Исландии, цепочки вулканических островов и подводных гор образуются на обеих сторонах хребта, потому что плиты расходятся от хребта в обе стороны. Уилсон выделил еще несколько примеров таких вулканов и связанных с ними цепочек потухших вулканов. Он назвал эти очень небольшие по размерам очаги *горячими точками*. По сути дела, он предположил, что в виде хребта, состоящего из потухших вулканов, на морском дне запечатлено «абсолютное» движение плиты. Так Уилсон вновь представил чрезвычайно плодотворную, хотя до сих пор теоретически не доказанную, гипотезу.

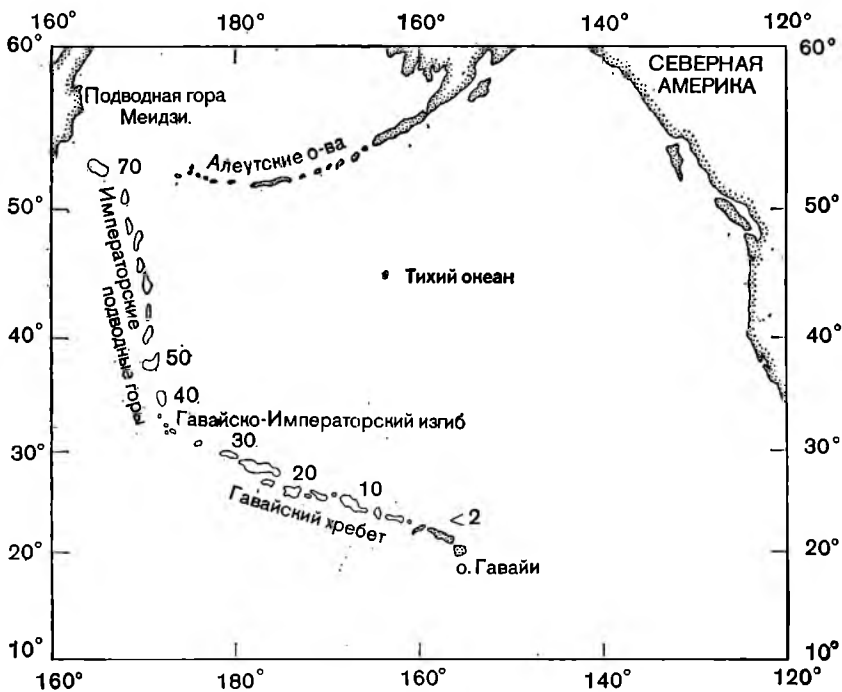
Позднее У. Дж. Морган развил эту идею, указав, что для кайнозойского времени можно определить скорости «абсолютного» движения плит (рис. 6-8). Полученные им скорости и направления согласуются с характеристиками относительного движения, принятыми в тектонике плит, и, таким образом, удовлетворяют условию, что предполагаемые горячие точки должны быть неподвижны относительно друг друга и мантии.

Развивая эту идею еще дальше, Морган заявил, что устойчивое положение горячих точек объясняется существованием там узко локализованных восходящих потоков мантийной конвекции и что это струйное мантийное течение, поднимающееся в виде мантийных перьев и медленно опускающееся в других местах, может служить важным движущим механизмом перемещения плит. С этими последними рассуждениями можно поспорить, однако достаточно устойчивое положение горячих точек подтверждается специальными исследованиями, проведенными впоследствии.

Поэтому, рассматривая вопрос о движении плит, мы приняли в качестве рабочей гипотезы представление о мировой системе горячих точек как об «абсолютной» основе для определения параметров движения плит по отношению к мантии.



а



б

Рис. 6-7.

а. Модель развития Гавайской цепи вулканических островов, согласно гипотезе о горячих точках (J. T. Wilson, Continental Drift, Scientific American, 1963).
 б. Возраст (млн. лет) вулканов Гавайско-Императорской цепи (D. A. Clague et al., Petrology and K-Ar ages of dredged volcanic rocks from the Western Hawaiian Ridge and the Southern Emperor seamount chain, Bull. GSA, 86, p. 991, 1975).

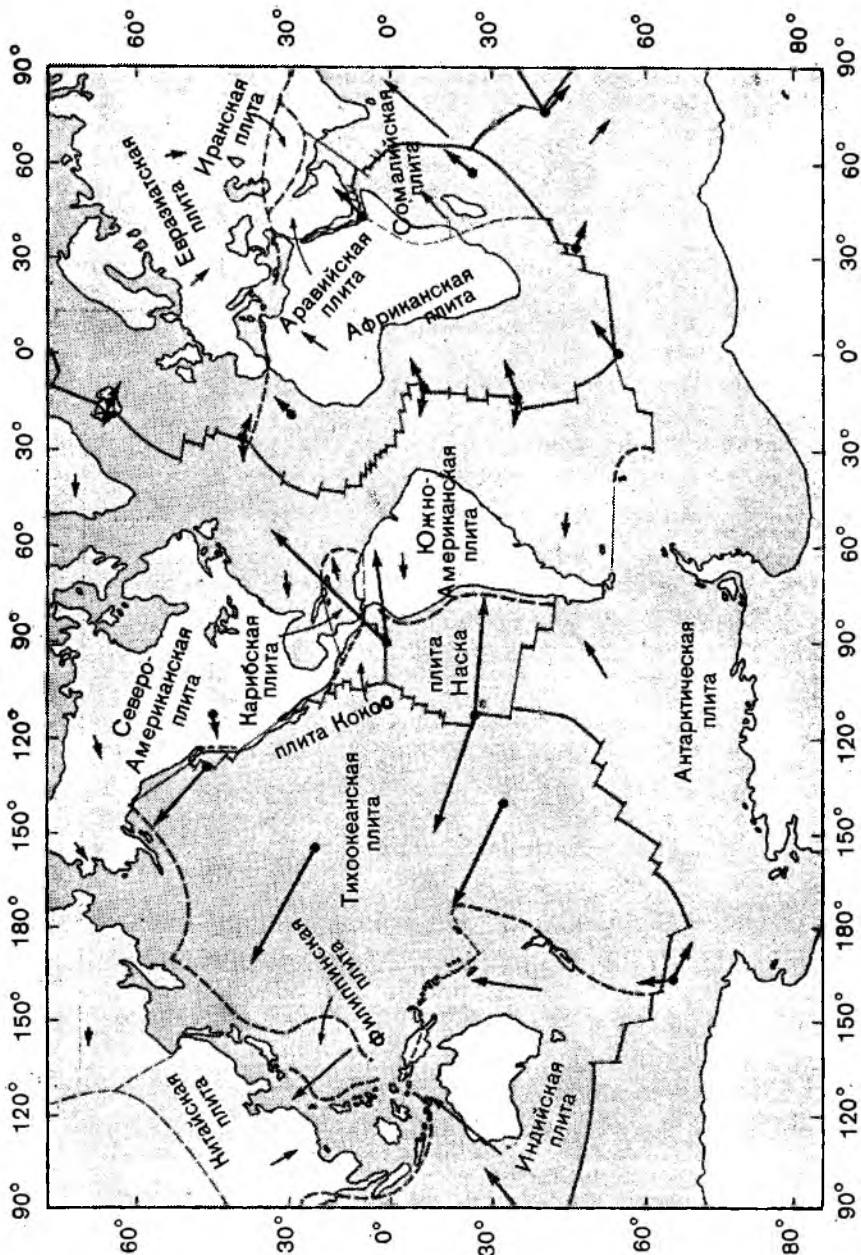


Рис. 6-8. Движение плит над горячими точками [38].

Характер относительного движения плит определен по простиранию разломов и по типу раздвижения границ плит на поднятиях; добавив соответствующую постоянную величину, обусловленную вращением, получаем скорость и направление движения каждой плиты относительно мантии. Длина стрелок пропорциональна скорости движения плит.

Параметры абсолютного движения, представленные на рис. 6-8, включают основные имеющиеся у нас данные. Нашей задачей было определить по этим данным движущий механизм. Прежде всего мы обратили внимание на замечательно закономерный характер движения плит, а именно на то, что всегда больше оказывается скорость той плиты, которая имеет границу поддвигаения по желобу значительного размера, и наоборот. Читатели должны согласиться, что эта закономерность сразу бросается в глаза. Плиты Кокос, Тихоокеанская, Наска, Филиппинская и Индийская имеют такие границы, и для каждой из этих плит средняя скорость (скорость, осредненная на всю площадь плиты) составляет 6—9 см/год, тогда как средняя скорость всех других плит меньше 4 см/год, а в большинстве случаев — меньше 2 см/год. Чтобы доказать эту закономерность, мы составили диаграмму зависимости средней скорости каждой плиты от доли желобов в общей длине ее границы (рис. 6-9). Глядя на эту диаграмму, можно сказать, что в ряду различных движущих сил наибольшее значение, по-видимому, имеет сила тяги погружающейся в желоб пластины F_{Sp} . Мы исследовали также корреляцию между скоростью движения плиты и другими геометрическими факторами, такими, как площадь плиты, площадь ее континентальной части, общая длина хребтов, длина трансформных разломов и длина границы, проходящей по надвинутому борту желоба. Это позволило нам сделать еще несколько интересных выводов. В частности, мы установили, что скорость плохо коррелируется со всеми этими параметрами, за исключением площади континентальной части плиты.

Важным является вывод о том, что скорость не зависит от площади плиты. Если силы, действующие на границах плит, считать движущими силами, а сцепление с мантией — главной силой сопротивления, то отсутствие такой корреляции понять трудно. Например, плиты Наска, Кокос и Тихоокеанская очень похожи друг на друга во всем, кроме площади. Следовательно, если сцепление с мантией представляет собой главную тормозящую силу, то Тихоокеанская плита, имеющая гораздо большую площадь, должна двигаться значительно медленнее. И Морган, и Мак-Кензи в начале 1970-х годов отметили отсутствие корреляции между площадью и скоростью плит; они сделали тогда вывод, что скорость плиты определяется главным образом мантийным течением, а не силами, действующими на границах плит. Однако мы видим возможность иной интерпретации этого явления: механическое сцепление между плитой и подстилающей мантией в океанических районах может быть, как утверждает Артюшков (стр. 189), слабым, так что сила сцепления с мантией мало влияет на скорость плит. Мы выбрали в качестве своей рабочей гипотезы эту альтернативу.

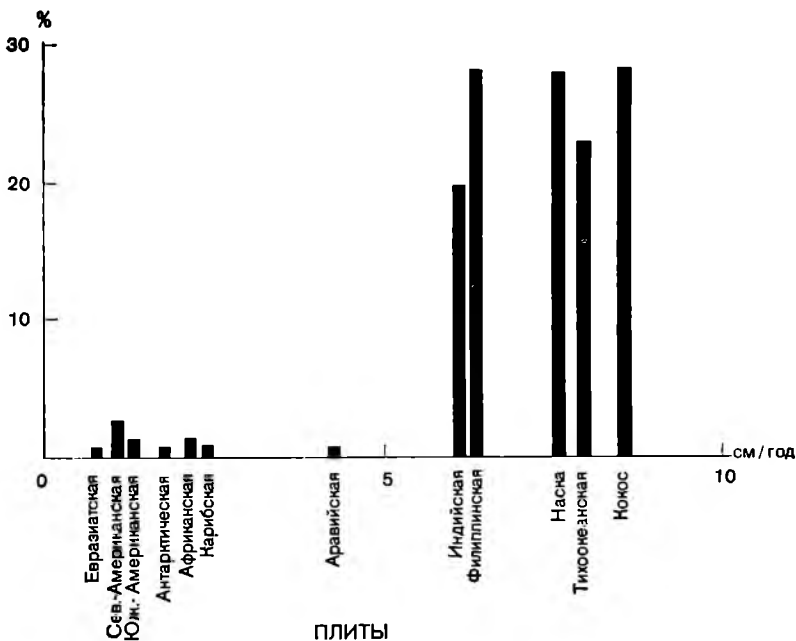


Рис. 6-9. Доля периметра плиты, приходящаяся на длину опускающейся пластины (в %), в сравнении со средней абсолютной скоростью плиты (см/год) [17].

Мы обнаружили существенную корреляцию между скоростью плиты и площадью ее континентальной части. Плиты, несущие на себе материки Евразии, Северной и Южной Америки, Антарктиды и Африки, т. е. все те плиты, у которых велика площадь континентальной части, имеют скорость меньше 2 см/год. Для нас этот результат означал, что сопротивление, вызываемое сцеплением с мантией, сильнее под континентами, чем под океанами.

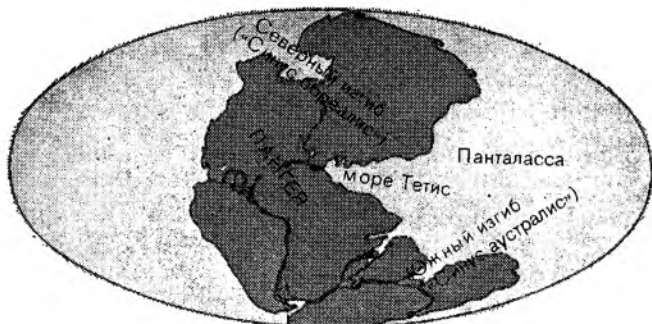
Скорость плиты не имеет очевидной корреляции с общей длиной хребтов вдоль ее границы, с общей длиной трансформных разломов или с общей длиной желоба, если плита надвигается на этот желоб. Мы уже видели, что если плита поддвигается под желоб, ее скорость вполне четко коррелируется с длиной желоба. Эта корреляция позволила нам заключить, что хребты и надвинутые борта желобов играют меньшую роль в движении плит, чем опускающиеся пластины, и что трансформные разломы не оказывают значительного сопротивления. Иначе говоря, силы F_{RP} , F_{TF} и F_{SU} меньше, чем сила F_{SP} . Мы не хотим сказать, что хребты не расталкивают плиты в разные стороны, так как по обе стороны Срединно-Атлантического хребта плиты определенно расходятся друг от друга, хотя и

медленно. Мы просто говорим, что давление хребта F_{RP} , вероятно, много меньше, чем тяга опускающейся пластины F_{SP} .

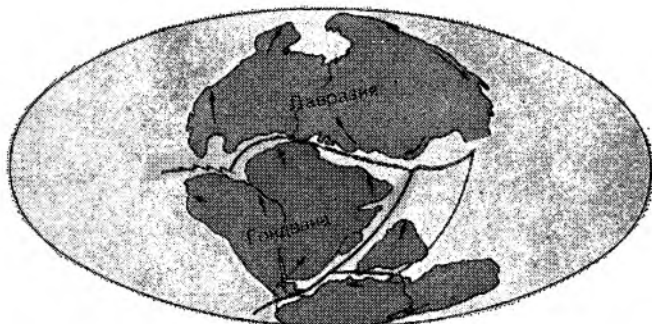
Выводы, которые мы до сих пор сделали, сводятся к тому, что сила тяги опускающейся пластины F_{SP} значительно больше других движущих сил, а континентальное сцепление F_{CD} — единственная значительная сила сопротивления. Если мы вспомним теперь основной закон Ньютона о движении (для того, чтобы тело находилось в равномерном движении, действующие на него силы должны уравновешивать друг друга) и если допустим, что плиты движутся в основном равномерно, то мы должны будем заключить, что силы, действующие на каждую плиту, уравновешены. Анализируя эти силы, мы отметили, что на океанические плиты, сопряженные со значительным по размеру желобом, где происходит поддвигание, действует большая движущая сила F_{SP} , а силы сопротивления F_{DF} и F_{TF} малы. Чтобы уравновесить движущую силу, должно присутствовать соответствующее сопротивление, которое, согласно нашему выводу, создается главным образом силой сопротивления движению опускающейся пластины. Таким образом, мы представили следующую модель. Прежде всего объемная сила F_{SP} , возникающая вследствие избытка массы в опускающейся пластине, очень велика. Сила F_{SP} тянет соединенную с этой пластиной плиту, и скорость опускания пластины в мантию возрастает, пока эта сила не уравновесится почти полностью силой вязкого сопротивления F_{SR} , действующей на пластину. Совершенно одинаковая скорость опускания (6—9 см/год), наблюдаемая на Тихоокеанской плите, на плитах Наска, Кокос, Индийской и Филиппинской, отражает это состояние равновесия и представляет собой, по сути дела, *предельную скорость* падения плотного тела в вязкой среде. Это можно сравнить со скоростью человека, спускающегося на парашюте.

Все другие плиты, которые не соединяются с погружающимися под данные желоба пластинами, движутся со скоростью меньше 4 см/год. Большинство этих плит несут на себе крупные материи, которые, вероятно, скреплены с глубокой мантией более прочно. Но Индийская плита, которая несет на себе довольно крупные континентальные массивы (Индию и Австралию) и имеет длинный желоб (Яванский), движется быстро; это позволяет предположить, что главный фактор, определяющий скорость плиты, — наличие или отсутствие крупной погружающейся пластины, а не наличие или отсутствие континентов.

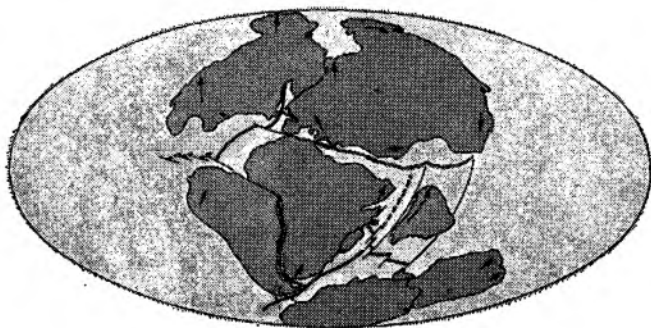
Форсайт и я исследовали достоверность описанной выше модели в более количественном виде и убедились в ее «работоспособности». Если эта модель верна, то мы можем сказать, что скорость плит, соединенных с опускающимися пластинами, определяется равенством двух больших сил F_{SP} и F_{SR} , действующих на эту опускающуюся пластину, и почти совсем не зависит от геометрии поверхности плиты. Мы считаем этот вывод важным для установления движущего механизма перемещения плит. Бы-



а



б

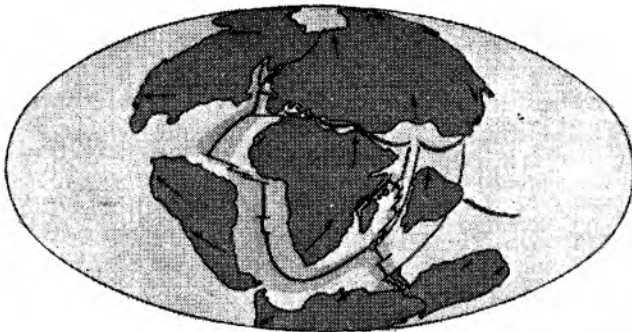


в

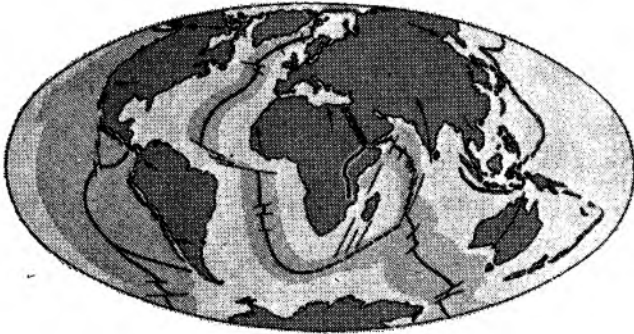
Рис. 6-10. Распад Пангеи [15].

а. Древний массив Пангеи, как он, возможно, выглядел 200 млн. лет назад. Панталасса — океан, окружавший Пангею, — превратился потом в современный Тихий океан; современное Средиземное море — остаток моря Тетис.

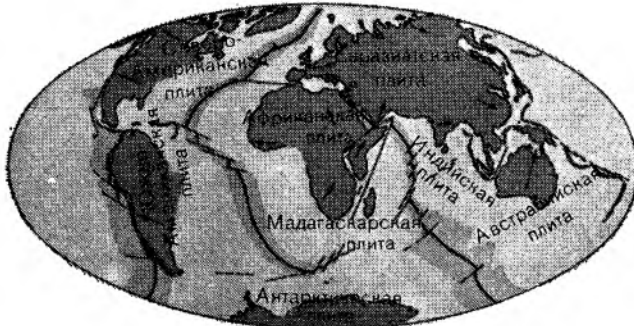
б. География земного шара в конце триасового периода, 180 млн. лет назад, примерно через 20 млн. лет после начала дрейфа. К этому моменту единый массив суши разбился на два суперматерика: Лавразию и Гондвану. Светло-серой полосой обозначено новое океаническое дно. Зоны разрастания показаны жирными линиями, трансформные разломы — тонкими линиями, а зоны субдукции — пунктиром (там, где вместо сплошной линии проведена штриховая, это означает некоторую неуверенность в том, что данная



Г



Д



Е

- структура тогда существовала). Стрелками показано движение континентов после начала дрейфа.
- в. География земного шара в конце юрского периода, 135 млн. лет назад, примерно через 65 млн. лет после начала дрейфа.
 - г. География земного шара в конце мелового периода, 65 млн. лет назад, примерно через 135 млн. лет после начала дрейфа.
 - д. География земного шара в современную эпоху. Светло-серым показано океаническое дно, сформировавшееся за последние 65 млн. лет, в течение кайнозойской эры.
 - е. География земного шара, какой она может стать примерно через 50 млн. лет, если современные движения плит будут продолжаться.

ло бы интересно исследовать применимость этой модели к движениям древних плит, представление о которых выводится из построений тектоники плит.

Конечно, вся эта система в целом является одним из видов тепловой конвекции. Объемная сила F_{SP} возникает благодаря разности плотностей, т. е., по сути дела, благодаря той же силе, которая приводит в действие обычную конвекцию. Таким образом, мы не отрицаем тепловую конвекцию, но говорим, что плита — это важная часть конвекционной системы, а не пассивный груз, который просто переносится конвекционным течением нижежащего материала.

Проведенный анализ не позволил нам достаточно уверенно оценить роль меньших сил: F_{RP} , F_{TF} , F_{SU} и F_{DF} , потому что их величина в общем сравнима с уровнем шума в наших данных. Таким образом, наш следующий шаг будет направлен на решение этой проблемы, с тем чтобы приобрести более полные знания о природе движущих сил. Главные сведения мы рассчитываем получить из анализа *внутриплитовых* землетрясений (т. е. промежуточных и глубокофокусных землетрясений, возникающих внутри поддвигающейся плиты), потому что эти землетрясения, хотя и довольно редкие, отражают то напряженное состояние внутри плиты, которое создается в результате действия всех указанных сил. Л. Сайкс и М. Сбар из Геологической обсерватории Ламонт-Догерти и С. Соломон и его сотрудники из Массачусетского технологического института проводят в настоящее время ценные исследования в этой области.

«Новый взгляд» действительно внес большой вклад в наши знания о Земле, но перед нами все еще стоят неисчислимые важные проблемы. Ученые из разных стран бесстрашно берутся за их решение и преодолевают трудности одну за другой. С этой целью проводятся работы по ряду международных проектов. Один из них — Геодинамический проект, который начался в 1972 г. Другой — проект IPOD (Международный этап океанского бурения), работы по которому начались в 1975 г.

Итак, мнение большинства ученых стало склоняться к мобилистскому взгляду на Землю, и еще очень многое предстоит изучить в будущем. На рис. 6-10 показана современная версия континентального дрейфа, как его представляли себе в 1970 г. Р. С. Дитц и Дж. Холден [15]. Мы видим распад Пангеи и изменения в географии земного шара, происшедшие за долгие века, с точки зрения теории разрастания морского дна и тектоники плит. Диаграмма *e* этого рисунка показывает, что, пользуясь этой теорией, можно даже вообразить, каким станет мир в будущем, через 50 млн. лет. Интересно сравнить этот вариант истории Земли со схемой дрейфа, предложенной Вегенером. Мы обсуждали ее в самом начале нашей книги (рис. 1-1). Поистине, интуиция этого великого человека даже сегодня производит глубокое впечатление. Тем не менее может наступить время, когда

и в нашем «новом взгляде» обнаружатся роковые изъяны и его придется признать устаревшим. Но сейчас наша главная задача — по-прежнему делать все возможное, чтобы выяснить, каково значение этого «нового взгляда» во всех областях науки о Земле, и испытать наши теории в горниле экспериментов и наблюдений. Если мы добьемся успеха, то, возможно, нам все-таки удастся подойти к всестороннему пониманию устройства и жизни нашей планеты.

**Типичные породы континентальной коры,
океанической коры и верхней мантии**

Порода	Положение в разрезе коры и мантии	Плотность, г/см ³	Скорость продольных сейсмических волн, км/с	Минеральный состав, об. %	Химический состав, вес. %
Гранит	Верхняя континентальная кора	2,7	5,8—6,2	Ортоклаз —30 Кварц —30 Плагиоклаз —25 Биотит — 5 Роговая обманка — 5 Другие — 5	SiO ₂ —70 Al ₂ O ₃ —15 K ₂ O — 4 Na ₂ O — 4 CaO — 2 Другие— 5
Базальт	Океаническая кора; возможно, нижняя континентальная кора	2,9	6,4—7,0	Плагиоклаз —50 Пироксен —35 Оливин — 5 Другие (окислы железа и т. д.) —10	SiO ₂ —48 Al ₂ O ₃ —18 CaO —10 MgO — 8 FeO — 6 Fe ₂ O ₃ — 3 Na ₂ O — 3 Другие — 4
Эклогит (тяжелая порода, аналог базальта при высоком давлении)	Возможно, нижняя мантия	3,4	8	Гранат —45 Пироксен —45 Другие (амфибол и т. д.) —10	Как базальт
Перидотит (тяжелая зеленоватая порода)	Вероятно, верхняя мантия	3,2	8	Оливин —85 Пироксен —10 Другие (шпинель, гранат и т. д.) — 5	SiO ₂ —44 MgO —37 FeO — 6 Al ₂ O ₃ — 5 CaO — 4 Fe ₂ O ₃ — 2 Другие— 2
Серпентинит (гидратированная форма перидотита)	Возможно, нижняя кора	2,6	6—7	В основном серпентин	Как перидотит, примерно с 10% воды

1. *Adams L. H.*, Some Unsolved Problems of Geophysics. Transactions of the American Geophysical Union, 28, No. 5, pp. 673—679, 1947.
2. *Artyushkov E. V.*, Stresses in the Lithosphere Caused by Crustal Thickness Inhomogeneities. Journal of Geophysical Research, 78, pp. 7657—7708, 1973. (См. также работы Е. В. Артюшкова на русском языке, например: Е. В. Артюшков. Происхождение больших напряжений в земной коре.— Изв. АН СССР, Физика Земли, № 8, с. 3—25, 1972.)
3. *Atwater T.*, Implications of Plate Tectonics for the Cenozoic Tectonic Evolution of Western North America. Bulletin of the Geological Society of America, 81, pp. 3513—3536, 1970.
4. *Beloussov V. V.*, Against the Hypothesis of Sea-Floor Spreading. Tectonophysics, 9, pp. 489—511, 1970. (См. также работы В. В. Белоусова на русском языке, например: В. В. Белоусов. Об одной гипотезе развития океанов. Бюлл.—МОИП, отд. геол., 45, вып. 4, с. 92—114, 1970.)
5. *Birch F.*, Elasticity and Constitution of the Earth's Interior. Journal of Geophysical Research, 57, pp. 227—286, 1952.
6. *Blackett P. M. S.*, A Negative Experiment Relating to Magnetism and the Earth's Rotation. Philosophical Transactions, Royal Society of London. A245, pp. 309—370, 1952.
7. ***Blackett P. M. S., Bullard E., Runcorn S. K.*, eds., A Symposium on Continental Drift. London: The Royal Society, 323 pp., 1965¹.
8. *Bullard E. C., Everett J. E., Smith A. G.*, The Fit of the Continents around the Atlantic. In *Blackett P. M. S., Bullard E., Runcorn S. K.*, eds., A Symposium on Continental Drift. Philosophical Transactions, Royal Society of London, A258, pp. 41—51, 1965.
9. ***Cox A.*, Ed., Plate Tectonics and Geomagnetic Reversals. San Francisco, Freeman W. H., and Company, 702 pp., 1973.
10. **Cox A., Dalrymple G. B., Doell R. R.*, Reversals of the Earth's Magnetic Field. Scientific American, February, pp. 44—54, 1967.
11. *Dewey J. F.*, Continental Margins: A Model for Conversion of Atlantic Type to Andean Type. Earth and Planetary Science Letters, 6, pp. 189—197, 1969.
12. **Dewey J. F.*, Plate Tectonics. Scientific American. May, pp. 56—58, 1972.
13. *Dewey J. F., Bird J. M.*, Mountain Belts and the New Global Tectonics. Journal of Geophysical Research, 75, pp. 2625—2647, 1970. (Имеется русский перевод в сб. «Новая глобальная тектоника (тектоника плит)». — М.: Мир, с. 191—219, 1974.)
14. *Dietz R. S.*, Continent and Ocean Basin Evolution by Spreading of the Sea Floor. Nature, 190, pp. 854—857, 1961. (Имеется русский перевод в сб. «Новая глобальная тектоника (тектоника плит)». — М.: Мир, с. 26—32, 1974)

¹ Работы, отмеченные звездочкой (*), написаны для широкого круга читателей. Двумя звездочками (**) обозначены сборники статей по темам, затронутым в этой книге.

15. * *Dietz R. S., Holden J. C.*, The Breakup of Pangaea, *Scientific American*, 223, No. 4, pp. 30—41, 1970. (Имеется русский перевод в сб. «Новая глобальная тектоника (тектоника плит)». — М. Мир, с 315—329, 1974.)
16. *Elsasser W. M.*, Convection and Stress Propagation in the Upper Mantle. *Runcorn S. K.*, ed., *The Application of Modern Physics to the Earth and Planetary Interiors*. New York, Wiley Interscience, pp. 223—246, 1969.
17. *Forsyth D., Uyeda S.*, On the Relative Importance of the Driving Forces of Plate Motion. *Geophysical Journal, Royal Astronomical Society*, 43, No. 1, pp. 163—200, 1975.
18. *Gilbert W.*, *De Magnete*. London; Short, 1960; New York, Dover Publications, 368 pp., 1958.
19. *Grow J. A., Atwater T.*, Mid-Tertiary Tectonic Transition in the Aleutian Arc. *Bulletin of the Geological Society of America*, 81, pp. 3715—3722, 1970.
20. * *Heirtzler J. R.*, Sea-floor Spreading. *Scientific American*, June, pp. 60—70, 1968.
21. *Heirtzler J. R., Le Pichon X., Baron J. G.*, Magnetic Anomalies over the Reykjanes Ridge. *Deep Sea Research*, 13, pp. 427—443, 1966.
22. *Hertzler J. R., Dickson G. O., Herron T. M., Pitman W. C., III, Le Pichon X.*, Marine Magnetic Anomalies, Geomagnetic Field Reversals and Motions of the Ocean Floor and Continents. *Journal of Geophysical Research*, 73, pp. 2119—2136, 1968. (Имеется русский перевод в сб. «Новая глобальная тектоника (тектоника плит)». — М.: Мир, с. 38—57, 1974.)
23. *Hess H. H.*, History of Ocean Basins. In *Engel A. E. J., James H. L., Leonard B. F.*, eds., *Petrologic Studies: A Volume in Honor of A. F. Buddington*, Boulder: Geological Society of America, pp. 599—620, 1962. (Имеется русский перевод в сб. «Новая глобальная тектоника (тектоника плит)». — М.: Мир, с. 9—26, 1974.)
24. *Holmes A.*, *Principles of Physical Geology*. London: *T. Nelson and Sons*, 1945, New York: Ronald Press, 2nd ed., 1965. (Имеется русский перевод: А. Холмс. «Основы физической геологии». — М.: ИЛ, 590, с. 1949.)
25. * *Hurley P. M.*, The Confirmation of Continental Drift. *Scientific American*, April, pp. 52—64, 1968.
26. *Isacks B., Oliver J., Sykes L.*, Seismology and the New Global Tectonics. *Journal of Geophysical Research*, 73, pp. 5855—5899, 1968. (Имеется русский перевод в сб. «Новая глобальная тектоника (тектоника плит)». — М.: Мир, с. 133—179, 1974.)
27. *Jeffreys H.*, *The Earth*. Cambridge: Cambridge University Press, 5th ed., 525 pp., 1970. (Имеется русский перевод 4-го изд.: Г. Джеффрис. «Земля, ее происхождение, история и строение». — М.: Мир, 485 с., 1960.)
28. *Karig D. E.*, Evolution of Arc Systems in the Western Pacific. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2, pp. 51—75, 1974.
29. *Larson R. J., Chase C. G.*, Late Mesozoic Evolution of the Western Pacific Oceans. *Bulletin of the Geological Society of America*, 83, pp. 3627—3644, 1972.
30. *Larson R. L., Pitman W. C., III*, Worldwide Correlation of Mesozoic Magnetic Anomalies and Its Implications. *Bulletin of the Geological Society of America*, 83, pp. 3645—3661, 1972.
31. *Le Pichon X.*, Sea-Floor Spreading and Continental Drift. *Journal of Geophysical Research*, 73, pp. 3661—3697, 1968. (Имеется русский перевод в сб. «Новая глобальная тектоника (тектоника плит)». — М.: Мир, с. 93—133, 1974.)
32. *Le Pichon X., Francheteau J., Bonnin J.*, *Plate Tectonics*. Amsterdam, Elsevier, 300 pp., 1973. (Имеется русский перевод: Ле Пишон К., Франшто Ж., Боннин Ж. «Тектоника плит». — М.: Мир, 288 с. 1977.)
33. *McElhinny N. W.*, *Paleomagnetism and Plate Tectonics*. London: Cambridge University Press, 357 pp., 1973.
34. *McKenzie D. P., Parker R. L.*, The North Pacific: An Example of Tectonics on a Sphere. *Nature*, 216, pp. 1276—1280, 1967.
35. *McKenzie D. P., Morgan W. J.*, The Evolution of Triple Junctions. *Nature*, 224, 125—133, 1969.

36. **Maxwell A. E., ed., *The Sea: Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas*. New York: Wiley-Interscience, 4, part 1, 664 pp., 1971.
37. *Morgan W. J., Rises, Trenches, Great Faults and Crustal Blocks*, Journal of Geophysical Research, 73, pp. 1959—1982, 1968. (Имеется русский перевод в сб.: «Новая глобальная тектоника (тектоника плит)». — М.: Мир, с. 68—93, 1974.)
38. *Morgan W. J., Deep Mantle Convection Plumes and Plate Motions*. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 56, No. 1, pp. 203—213, 172.
39. *Néel L., L'Inversion d'Aimantation Permanente des Roches*. Annales de Géophysique, 7, pp. 90—102, 1951.
40. ***Phinney R. A., ed., The History of the Earth's Crust*. Princeton: Princeton University Press, 244 pp., 1968.
41. *Press F., Siever R., Earth*. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 945 pp., 1974.
42. ***Runcorn S. K., ed., Continental Drift*. New York: Academic Press, 338 pp., 1962. (Имеется русский перевод: «Дрейф континентов», под ред. С. Ранкорна.— М.: Мир, 232 с., 1966.)
43. *Sclater J. C., Francheteau J., The Implications of Terrestrial Heat Flow Observations on Current Tectonic and Geochemical Models of the Crust and Upper Mantle of the Earth*. Geophysical Journal, Royal Astronomical Society, 20, pp. 509—542, 1970.
44. *Sugimura A., Uyeda S., Island Arcs: Japan and Its Environs*. Amsterdam: Elsevier, 246 pp., 1973.
45. *Takeuchi H., Uyeda S., Kanamori H., Debate About the Earth*. San Francisco: Freeman. Cooper, 281 pp., 1970.
46. *Vine F. J., Spreading of the Ocean Floor; New Evidence*. Science, 154, pp. 1405—1415, 1966.
47. *Vine F. J., Matthews D. H., Magnetic Anomalies over Oceanic Ridges*. Nature, 199, pp. 947—949, 1963. (Имеется русский перевод в сб. «Новая глобальная тектоника (тектоника плит)». — М.: Мир, с. 32—37, 1974.)
48. *Vine F. J., Wilson J. T., Magnetic Anomalies over a Young Oceanic Ridge off Vancouver Island*. Science, 150, pp. 485—489, 1965.
49. * *Wegener A., The Origin of Continents and Oceans*. London: Methuen, 1924; New York: Dover, paperback ed., 1966. (Имеется русский перевод: *А. Вегенер. «Происхождение материков и океанов».* — М.—Л.: ГИЗ, 148 с., 1925.)
50. *Wilson J. T., A New Class of Faults and Their Bearing on Continental Drift*. Nature, 207, pp. 343—347, 1965. (Имеется русский перевод в сб. «Новая глобальная тектоника (тектоника плит)». — М.: Мир, с. 58—67, 1974.)
51. ***Wilson J. T., ed., Readings from Scientific American: Continents Adrift and Continents Aground*. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 230 pp., 1976.
52. *Wyllie P. J., The Dynamic Earth: Textbook in Geosciences*. New York: Wiley, 416 pp., 1971.

- Абсолютный возраст горных пород 17, 71
 Аккреция (в тектонике плит) 94, 168, 186
 Аккреция вещества Земли 183—184
 Антиклинали 27
 Астеносфера 67, 93—94, 109—110, 179
- Базальт, базальтовая магма 21—22, 55, 111, 148, 204
 Блуждание геомагнитных полюсов 40—43
- Вариации магнитного поля 35, 154—155
 Второй слой океанической коры 23, 89
 Вулканизм 10, 61, 104—106, 121, 146—148, 150, 158, 194—195
 Вулканический фронт 146, 149, 151, 154
- Габбро 21—22, 55, 66, 204
 Гайоты *см.* Подводные горы
 Геодезические измерения 10
 Геодинамический проект 202
 Геомагнетизм *см.* Магнитное поле Земли
 Геосинклинали 9, 27, 29, 187
 Геотермический градиент 53
 Геохронологическая шкала 17—18
 Гипотеза Вайна — Мэтьюза — Морли 70—73, 81—84, 98, 170
 Гипотеза расширения Земли 124
 Глубоководные океанические желоба 13, 48—49, 55, 60—61, 64, 94—95, 101—105, 124—127, 130—131, 145
 Гондвана 26, 29, 47, 200
 «Горячие точки» 69, 193—196
 Гравитационные аномалии 128—131
 Гранит 21, 31, 55, 204
- Дивергенция (в тектонике плит) 94
 Дипольность магнитного поля Земли 38—39, 63
 Донные геофизические приборы 54
 Дрейф континентов *см.* Континентальный дрейф
 Дрейф островных дуг 166—167
- Закон напластования 16
 — фаунистических ассоциаций 17
 Землетрясения, очаги землетрясений 56—57, 61, 92, 104, 131—144, 164, 193
 Землетрясения глубокофокусные 10, 95, 105—106, 121, 132—140, 148, 156—157
 — мелкофокусные (нормальные) 132, 139—144
 Земная кора *см.* Кора Земли
 Земной магнетизм *см.* Магнитное поле Земли
 Зоны Беньофа (зоны Вадати — Беньофа) 132, 135, 148, 157
 Зоны разлома 62—63, 112, 188
- Изостазия 24, 61, 130—131, 175
 Изостатические аномалии силы тяжести 48—49, 145
 Изотермы 109—110, 164
 Изохроны 83, 113
 Инверсия магнитного поля Земли 36—38, 70—75, 84, 115—116, 170
 Интрузивные породы 23, 55
- Конвекция в мантии Земли 11, 43—45, 102, 108—109, 125, 131, 172—180, 189, 202
 Конвергенция (в тектонике плит) 94
 Континентальные окраины 121—124
 Континентальный дрейф 12, 14—16, 27—30, 45—47, 63, 94, 116, 120, 171, 200—202

- Контракция, контракционная теория 27—28
 Кора Земли 21, 31
 — континентальная 21, 24, 144—145, 166—167, 204
 — океаническая 23—24, 51, 109, 111—112, 145, 166, 204
- Лавразия** 200
 Литосфера, литосферные плиты 66, 93—94, 136, 164, 171, 190
- Магма** 93, 108—109, 146—150
 Магнитное поле Земли 10, 12, 32—35, 69
 — склонение 35
 Магнитные аномалии 61—63, 69—74, 81—84, 101—106, 109, 113—116, 169—170, 185
 Магнитуда землетрясений 134—135, 139, 141
 Магния Земли 21, 31, 51, 93—94, 108, 135—136, 175—179, 204
 Международный этап океанского бурения (IPOD) 89, 187, 202
 Межледниковые эпохи 24
 Метаморфизм, метаморфические породы 111, 121—123, 158—162
 Метод Монте-Карло 93
 Механизм очага землетрясения 79—80
 Мобилизм, мобилисты 6, 10, 12, 124, 171
 Морские гравиметрические исследования 51, 61
 — магнитометрические исследования 51—53, 61—63
 — сейсмологические исследования 51, 55
- Намагниченность** горных пород естественная 12, 35, 74, 84
 Намагниченность термоостаточная 36—38, 109
 «Новая глобальная тектоника» *см.* Тектоника плит
- Объединенные океанологические исследования (JOIDES) 85, 89
 Океанизация континентальной коры 166—168, 188
 Океаническое дно 54—55, 59—60, 64, 70—75, 116, 124
 Окраинные моря 128, 151, 154, 165—168, 170
 Оледенения 24—25, 30, 175
- Орогенез 27, 119—120, 160, 172
 Орогенические пояса 92, 104—105, 120—121, 131, 158
 Орогенция тихоокеанского типа 162, 164
 Осадконакопление 27, 74, 185—186
 Осадочные породы 23, 27, 57
 Островные дуги 13, 48—49, 55, 60—61, 92, 119, 124—128, 131, 146—148, 158—160, 162, 164, 168
 Офиолиты 187
- Палеомагнетизм** 12, 35—42, 116
 Палеомагнитные эпизоды 73, 75
 — эпохи 72—73, 75
 Пангея 14, 121, 200—202
 Панталасса 200
 Пара сил, двойная пара сил 136—137
 Первые вступления сейсмических волн 79—80, 96, 99, 137
 Периодит 31, 55, 66, 204
 Поверхностные сейсмические волны 156
 Подводные горы 91, 101, 113, 117—118, 194—195
 «Полусобезная» сила 30
 Полусы вращения литосферных плит 96—98
 Поперечные сейсмические волны (S-волны) 21, 93, 137
 Последниковое выравнивание 175, 189
 Продольные сейсмические волны (S-волны) 21, 93, 137
 Проект глубоководного бурения (DSDP) 83—89, 115, 186—187
 Проекция Меркатора 84, 97—99
 Протонные магнитометры 52—53
- Раздел Мохоровичича** 21, 31, 66, 93
 Разрастание морского дна 13, 44—45, 64—75, 83—92, 98, 119—120, 170, 185
 Регрессии моря 119
 Рифты 44—45, 59—60, 67, 106
- Самообращение намагниченности горных пород 37—38
 Сейсмичность, сейсмическая активность *см.* Землетрясения
 Серпентинит 24, 55, 204
 Синклинали 27
 Складки в слоях горных пород 27—28, 57
 Солидус, температура солидуса 93—94, 109—110

«Спрединг» см. Разрастание морского дна
Срединно-океанические хребты 13, 54—60, 64, 70, 76—79, 92, 95, 102—104, 108—112, 117, 131, 185, 187
Субдукция (в тектонике плит), зоны субдукции 95—96, 121—124, 136, 148, 158, 163—164, 172, 186—187

Тектоника плит 5, 13, 63, 67, 92—94, 120, 124, 137, 157, 162, 171, 189
Температуры в недрах Земли 10, 155—157, 160—161
Теория Вегенера см. Континентальный дрейф
Теория динамо 34, 63
Теория «сухопутного моста» 19—20
Тепловой поток 53, 55—58, 61, 106, 109—111, 150—154, 160—162
Теплопроводность горных пород 53, 110, 164
Тетис 200
Толентовая базальтовая магма 148—149
Точка Кюри 33, 70
Трансгрессии моря 119

Трансформные разломы 72, 76—81, 92, 95—96, 100
Третий слой океанической коры 24, 89
Тройное сочленение 102—104, 106, 117

Ферромагнетизм 32—33, 37
Фиксизм, фиксисты 6, 12, 171

Число Рэлея, критическое число Рэлея 174—175

Шаровые лавы 109

Щелочная базальтовая магма 148—149

Эклогит 66, 204
Электропроводность горных пород 154—155
Эффузивные породы 23, 36

Ядро Земли 31—32, 34, 177
Ячейки Бенара 173

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абе К. (Abe K.) 156
 Адамс Л. (Adams L. H.) 9—10, 32, 205
 Айзекс Б. (Isacks B.) 137, 140, 157, 206
 Аки К. (Aki K.) 9
 Андерсон Д. (Anderson D.) 93, 183
 Аронсон Дж. (Aronson J.) 182
 Аргюшков Е. В. 189, 197, 205
- Баба К. (Baba K.) 150
 Байерли П. (Byerly P.) 79
 Баккус Г. (Backus G.) 34
 Баразанги М. (Barazangi M.) 56
 Бек Р. (Beck R. H.) 52
 Беккерель А. (Becquerel A.) 181
 Белоусов В. В. 69, 167, 185—189, 205
 Бенар А. (Bénard H.) 173
 Беньоф Х. (Benioff H.) 132
 Берд Дж. (Bird J.) 120, 123, 162, 205
 Берк К. (Burk C. A.) 187
 Берч Ф. (Birch F.) 35, 183, 205
 Блок М. (Block M. J.) 174
 Блэккет П. (Blackett P. M. S.) 33, 40, 205
 Боннэи Ж. (Bonnin J.) 5, 41, 43, 206
 Брюнес Б. (Brunhes B.) 36, 73
 Буллард Э. (Bullard Sir Edward) 7, 33, 43—45, 53—55, 205
 Бэкон Ф. (Bacon F.) 14
 Бэрон Дж. (Baron J. G.) 206
- Вадати К. (Wadati K.) 132
 Вайн Ф. (Vine F.) 62, 69—74, 76, 79, 102, 106, 207
 Вакье В. (Vacquier V.) 61, 63, 79, 117
 Ватанабе Т. (Watanabe T.) 150, 152—153
 Вегенер А. (Wegener A.) 12, 14—16, 19—20, 24, 29—30, 41, 45, 63, 202, 207
 Вейл П. (Vaill P. R.) 187
- Венинг-Мейнес Ф. (Vening Meinesz F.) 48—49, 51, 61, 125, 128
- Гамильтон У. (Hamilton W.) 106
 Геллер Р. (Geller R.) 7
 Гердлер Р. (Girdler R. W.) 104—105
 Гильберт У. (Gilbert W.) 32, 206
 Гласс Б. (Glass B.) 74—75
 Григгс Д. (Griggs D.) 125, 172, 178
 Гроу Дж. (Grow J. A.) 117, 206
 Грэм Дж. (Graham J.) 37—38
 Гутенберг Б. (Gutenberg B.) 141
- Далримпл Б. (Dalrymple B.) 37, 71—73, 205
 Джеймс Х. (James H. L.) 206
 Джеффрис Г. (Jeffreys Sir Harold) 30, 206
 Дикинсон У. (Dickinson W.) 148
 Диксон Г. (Dickson G. O.) 82—83, 206
 Дитц Р. (Dietz R.) 66, 70, 172, 200—202, 205—206
 Дорман Дж. (Dorman J.) 56
 Доуэлл Р. (Doell R.) 37, 71—73, 205
 Дрейк Ч. (Drake C. L.) 187
 Дьюи Дж. (Dewey J.) 95, 120, 122—123, 162, 205
 Дю Тойт А. (Du Toit A. L.) 26
- Зюсс Э. (Suess E.) 26
- Иседзаки Н. (Isezaki N.) 169—170
 Итикава М. (Ichikawa M.) 138
- Йодер Х. С. (Yoder H. S.) 148
 Йокояма И. (Yokoyama I.) 150
- Каваи Н. (Kawai N.) 165
 Канамори Х. (Kanamori H.) 7, 141, 156, 207

Кариг Д. (Karig D.) 168—170, 206
Кацумата М. (Katsumata M.) 156—
157

Кельвин (Lord Kelvin) см. Томсон У.
Кёнигсбергер Й. (Königsberger J. G.)
36

Кёппен В. (Köppen W.) 16, 41
Кларк С. П. (Clark S. P.) 181
Клагг Д. (Clague D. A.) 195
Коидзуми К. (Koizumi K.) 86
Кокс А. (Cox A.) 7, 37, 71—73, 205
Колман П. (Coleman P. J.) 129
Коно Й. (Kono Y.) 150
Крайхгауер Д. (Kreichgauer D.) 41
Куно Х. (Kuno H.) 146, 148—149
Купер А. (Cooper A.) 167
Кусиро И. (Kushiro I.) 148
Кэри С. (Carey S. W.) 26, 124
Кюри М. (Curie M.) 181

Ларсон Р. (Larson R. L.) 84, 88, 113—
117, 118—119, 206

Ленард Б. (Leonard B. F.) 206
Ленер П. (Lehner P.) 52
Ле Пишон Кс. (Le Pichon X.) 5, 41,
43, 82—83, 94, 99, 206
Листер К. (Lister C.) 110
Лоуз Ф. (Lowes F. J.) 34
Любимова Е. А. 182

Макдональд Дж. (MacDonald G. J. F.)
182

Мак-Дугалл И. (McDougall I.) 37
Мак-Кензи Д. (McKenzie D. P.) 94, 96,
103—104, 106, 136, 197, 206
Мак-Коннелл Р. (McConnell R.) 182
Максвелл А. (Maxwell A. E.) 87, 207
Мак-Элхинни Н. (McElhinny N. W.)
206
Марлоу М. (Marlow M.) 167
Матуйама М. (Matuyama M.) 36, 48
Мацуда Т. (Matsuda T.) 160
Мацуи Т. (Matsui T.) 184
Мейерхофф А. (Meyerhoff A.) 188
Мейсон Р. (Mason R.) 61
Менард Г. (Menard H. W.) 91, 100
Мидзутани Х. (Mizutani H.) 150, 182,
184
Миясиро А. (Miyashiro A.) 111, 159—
160
Могги К. (Mogi K.) 141—142
Молнар П. (Molnar P.) 137, 140
Морган У. Дж. (Morgan W. J.) 94,
98, 104, 106, 194, 196—197, 206—
207
Морли Л. (Morley L.) 70—72, 76
Мохоровичич А. (Mohorovičić A.) 21
Мураути С. (Murauchi S.) 145, 167

Мэтьюз Д. (Matthews D. H.) 69—72,
74, 76, 207

Нагата Т. (Nagata T.) 36—37
Накамура К. (Nakamura K.) 7, 167
Накано Х. (Nakano H.) 79
Нэль Л. (Néel L.) 36—38, 207

Оливер Дж. (Oliver J.) 157, 206
Опдайк Н. (Opdyke N. D.) 74—75

Паркер Р. (Parker R. L.) 94, 96, 98,
206

Пирсон Дж. (Pearson J. R. A.) 174
Питер Г. (Peter G.) 101
Питман У. (Pitman III W. C. J.) 74,
81—84, 88, 102—103, 115—117, 119,
206
Пресс Ф. (Press F.) 7, 18, 39, 93, 207

Ранкорн С. (Runcorn S. K.) 40, 42,
57, 177, 205—207

Рафф А. (Raff A.) 61
Ревелл Р. (Revelle R.) 50
Рикитакэ Т. (Rikitake T.) 34, 37, 155
Рингвуд А. (Ringwood A. E.) 148
Рихтер Ч. (Richter C.) 141
Рэлей (Lord Rayleigh; Strutt J. W.)
173—174

Сайкс Л. (Sykes L.) 80—81, 141, 202,
206

Саката М. (Sakata M.) 179—180
Сбар М. (Sbar M.) 202
Сивер Р. (Siever R.) 18, 39, 93, 207
Сиды Дз. (Shida J.) 79
Сили Д. (Seely D. R.) 187
Симадзу Й. (Shimazu Y.) 34
Склейтер Дж. (Sclater J. G.) 110—
112, 207
Смит А. (Smith A. C.) 205
Снайдер А. (Snider A.) 14
Соломон С. (Solomon S.) 202
Стайн С. (Stein S.) 7
Сугимура А. (Sugimura A.) 126—127,
146—147, 160, 164, 207
Схаутен Г. (Shouten H.) 116 ..

Такеучи Х. (Takeuchi H.) 34, 161,
179—180, 207

Тальвани М. (Talwani M.) 50, 130—
131
Тарлинг Д. (Tarling D.) 37
Тарп М. (Tharp M.) 51, 57

Телье Э. (Thellier E.) 36
Терада Т. (Terada T.) 167
Тозер Д. (Tozer D.) 183
Томита Т. (Tomita T.) 146
Томода Й. (Tomoda Y.) 51, 129, 170
Томсон У. (лорд Кельвин) (Thomson W.) 181

Уайссел Дж. (Weissel J.) 170
Уеда М. (Uyeda M.) 7
Уеда С. (Uyeda S.) 5—6, 37, 58, 86, 90, 113, 117, 126—127, 147, 150, 152, 161, 163—164, 169, 182, 189—193, 198—199, 207
Уилкинсон И. (Wilkinson I.) 34, 86
Уилли П. (Wyllie P. J.) 207
Уилсон Дж. Т. (Wilson J. T.) 67—70, 73—74, 76—79, 81, 120, 172, 188, 193, 195, 207
Уолтон Г. (Walton G.) 187
Уотс А. (Watts A. B.) 130—131, 170
Уцу Т. (Utsu T.) 156—157

Федотов С. А. 141
Финни Р. (Phinney R. A.) 62, 207
Фогт П. (Vogt P.) 115
Фон Герцен Р. П. (Von Herzen R. P.) 57—58, 87
Форсайт Д. (Forsyth D.) 189—193, 198—199, 206
Фостер Дж. (Foster J.) 75
Франшто Ж. (Francheteau J.) 5, 41, 43, 110—111, 206—207
Фудзин Н. (Fujii N.) 163
Фукао И. (Fukao Y.) 182

Хассе К. (Hasebe K.) 163
Хейзен Б. (Heezen B.) 51, 57, 124
Хейрцлер Дж. (Heirtzler J.) 74, 81, 82—84, 206

Хейс Д. (Hayes D. E.) 102—103
Хейс Дж. (Hayes J. D.) 75, 119
Херзенберг А. (Herzenberg A.) 34
Херли П. (Hurley P.) 46—47, 206
Херрон Т. (Herron T. M.) 82—84, 88, 206
Хесс Г. (Hess H. H.) 64—66, 70, 91, 172, 206
Холден Дж. (Holden J. C.) 200—202, 206
Холмс А. (Holmes A.) 25—26, 43—45, 66, 125, 172, 206
Хонда Х. (Honda H.) 79, 136—139
Хоран К. (Horai K.) 150, 161
Хэллам О. (Hallam O.) 119

Цубои Т. (Tsuboi C.) 51

Чандрасекхар С. (Chandrasekhar S.) 177
Чейз Ч. (Chase C. G.) 113—116, 118, 206
Чеймлон Ф. (Chamelaun F.) 37
Чепмэн С. (Chapman S.) 155

Шолл Д. (Scholl D.) 167

Эверетт Дж. (Everett J. E.) 205
Эльзассер У. (Elsasser W. M.) 33, 191, 206
Энгель А. (Engel A. E. J.) 206
Эрвинг И. (Irving E.) 42
Этуотер Т. (Atwater T.) 106—107, 117, 205—206

Юинг М. (Ewing M.) 50, 57

Ясуи М. (Yasui M.) 7, 145, 150

ОГЛАВЛЕНИЕ

От переводчика	5
Предисловие к английскому изданию	7
Введение	9
Глава 1. Теория континентального дрейфа: ее возникновение, смерть и возрождение	14
Глава 2. Исследование океанического дна	48
Глава 3. Гипотеза разрастания океанического дна: синтез	64
Глава 4. Тектоника плит	92
Глава 5. Островные дуги	124
Глава 6. Новый взгляд на Землю	171
Список литературы	205
Предметный указатель	208
Именной указатель	211

Уважаемый читатель!

Ваши замечания о содержании книги, ее оформлении, качестве перевода и другие просим присылать по адресу: 129820, Москва, И-110, ГСП, 1-й Рижский пер., д. 2, издательство «Мир».