

В. А. КИРКИНСКИЙ

МЕХАНИЗМ
И
ЦИКЛИЧНОСТЬ
ГЛОБАЛЬНОГО
ТЕКТОГЕНЕЗА



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

ТРУДЫ ИНСТИТУТА ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ
ВЫПУСК 682

В. А. КИРКИНСКИЙ

МЕХАНИЗМ
И ЦИКЛИЧНОСТЬ
ГЛОБАЛЬНОГО
ТЕКТОГЕНЕЗА

Ответственный редактор
д-р геол.-мин. наук *Б. М. Чиков*



НОВОСИБИРСК
ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

1987

Киргинский В. А. Механизм и цикличность глобального тектогенеза. — Новосибирск: Наука, 1987.

В монографии проанализированы физико-химические процессы, играющие ключевую роль в тектогенезе литосферы. Описан ранее предложенный автором глубинный механизм тектоники плит. Дана оригинальная трактовка происхождения рифтовых зон, зарождения и углубления океанических впадин, субдукции литосферных плит и формирования окраинных бассейнов. По-новому объясняются асимметрия распределения континентов и океанов на поверхности Земли, крупномасштабная цикличность тектономагматической активности, уровня Мирового океана и климата. Рассмотренный механизм глобального тектогенеза согласуется с изученными особенностями геологического строения и истории Земли.

Для геологов, тектонистов, геофизиков и петрологов.

Рецензенты *П. М. Бондаренко, В. А. Калинин*

ОТ РЕДАКТОРА

Правильное понимание вопросов структурообразования в литосфере и создание удовлетворительной теории тектогенеза во многом зависят от наших представлений об энергетике и динамике тектонических процессов, в частности о движущих силах, способных производить гигантские трансформации в условиях планеты. Непосредственные возможности человека в познании этих процессов ограничиваются локальными наблюдениями и лабораторным моделированием отдаленных аналогий с переносом полученных зависимостей в недоступные наблюдению глубины Земли. Мир экстраполяции установленных отношений на области, в которых пока невозможен эксперимент, также увлекателен, как и возможность предвидеть грядущие события. О постоянно растущем интересе исследователей к природе тектонической активности нашей планеты свидетельствуют и крупные симпозиумы, проводимые в разных странах мира, и очень важные публикации специалистов-естествоиспытателей. Геологи, физики, математики, механики с различных позиций и с помощью разных средств пытаются приблизиться к решению этой проблемы.

Оригинальная концепция механизма глобального тектогенеза представляется читателю на страницах этой книги. Ее автор В. А. Киркинский — геохимик по образованию. Долгие годы его профессиональные интересы определяются исследованием физики и химии земных недр, изучением процессов минералообразования в условиях высоких давлений, экспериментальным воспроизводством фазовых превращений минералов при высоких температурах и давлениях.

Проблема энергетической природы и динамики глобальных тектонических процессов приобрела особую актуальность в связи с разработкой концепции литосферных плит. Не удивительно, что В. А. Киркинский рассматривает эндогенные физико-химические механизмы в тесной связи с этой теорией, а побудительным моментом его построений является вопрос о природе сил, перемещающих колоссальные массы литосферных плит. Правда, одним из постулатов плитной тектоники является принцип постоянства радиуса Земли, в то время как исходным утверждением автора служит тезис о постепенном небольшом увеличении общего объема планеты во времени.

В основу новых представлений о физико-химических механизмах положены закономерности фазовых превращений глубинного вещества при высоких температурах и давлениях, соответствующих условиям в недрах Земли. В связи с этим привлекают внимание большая энергоемкость фазовых превращений, установленная экспериментально, высокая скорость протекания этих превращений в условиях мантии, наличие декомпрессионного эффекта в мантийных процессах и, как следствие, плавление и динамическое перемещение расплавов, повышение теплового потока в определенных тектонических зонах и т. п. Необходимо отметить высокий уровень формализации исходных представлений концепции, что создает предпосылки для последующих разработок численных решений широкого круга задач геотектоники.

Читателю будет весьма интересно сравнить с уже известными в литературе оригинальные представления В. А. Киркинского о механизмах континентального рифтогенеза и формирования активных переходных зон на границе континент — океан, как и объяснение целого ряда структурных особенностей Земли или напряженного состояния ее коры. Более частными и менее разработанными представляются выводы о природе распределения океанических и континентальных сегментов литосферы, трансгрессиях и регрессиях Мирового океана, климатических аномалиях, а также вопросы цикличности тектогенеза в связи с магматической деятельностью. Но и эта часть книги заинтересует читателя.

Не следует думать, что предложенный В. А. Киркинским механизм глобального тектогенеза устраняет все затруднения и является единственным источником тектонической активности. При дальнейшей разработке проблемы, по-видимому, следует в большей мере учитывать влияние планетарных источников энергии, а также особенности планетарного режима Земли и его аномалии. Но поиск ответов на коренные вопросы эволюции планеты, как и объяснение структурно-вещественных преобразований земной коры в области физико-химических превращений вещества в недрах планеты представляется плодотворным и перспективным.

Основной целью своей работы В. А. Киркинский полагает привлечение внимания к проблемам геодинамики в связи с разработкой механизма глобального тектогенеза. Можно надеяться, что предлагаемая читателю книга не останется незамеченной.

Б. М. Чиков

ПРЕДИСЛОВИЕ

Вопросы происхождения океанов и континентов, горных систем, рифтов и вулканов, причины цикличности тектогенеза всегда волновали исследователей. Выдвигались многочисленные гипотезы частного и общего характера, однако при решении этих проблем ощущался острый недостаток фундаментальных знаний о Земле.

За последние три десятилетия получен богатейший фактический материал по геологии океанических бассейнов, занимающих 2/3 поверхности планеты, что позволило составить представление о строении всей земной коры. Бурное развитие геофизики, геохимии, исследований по экспериментальной минералогии и петрологии при высоких температурах и давлениях способствовало расширению знаний о глубоких недрах нашей планеты. Таким образом, были накоплены данные об основных чертах строения Земли в целом и создались предпосылки для выявления общих закономерностей геологических процессов.

В начале 60-х годов Г. Хессом и Р. Дицем [Hess, 1962; Dietz, 1961] были высказаны оригинальные идеи о развитии океанических бассейнов, на новом уровне возродившие мобилистскую гипотезу А. Вегенера [Wegener, 1922]. Эти идеи явились мощным стимулом для последующих детальных исследований геологии Мирового океана и пересмотра основных постулатов теоретической геологии. В результате работ большой группы ученых разных стран к середине 70-х годов сформировалась система представлений о природе процессов, определяющих геологическое развитие Земли, названная тектоникой плит, или новой глобальной тектоникой. Основные положения новой концепции и анализ с ее позиций эволюции планеты изложены во многих обобщающих работах [Кропоткин, 1973; Хаин, 1973а; Кулон, 1973; Новая глобальная тектоника, 1974; Сорохтин, 1974; Ушаков, 1974; Пишон Ле и др., 1977; Ушаков, Галушкин, 1978, 1979, 1983; Уеда, 1980; Геофизика..., 1979; Зоненшайн, Савостин, 1979; Унксов, 1981; и др.]. Издана библиография работ по этой теме с 1961 по 1976 г., содержащая 1866 ссылок [Новая глобальная тектоника, 1982]. В настоящее время общее число публикаций, где рассматриваются различные аспекты новой глобальной тектоники, составляет несколько тысяч.

Наименее ясным до сих пор представляется вопрос о природе сил, которые приводят в движение огромные массы литосферных плит и перемещают их на сотни и тысячи километров по поверхности планеты. Насколько этот вопрос важен для тектоники плит, можно судить хотя бы по тому, что, несмотря на веские доказательства дрейфа континентов, выдвинутые А. Вегенером [Wegener, 1922], мобилистская гипотеза была подвергнута резкой критике именно из-за полной несостоятельности предложенного в то время физического механизма и в течение нескольких десятков лет была практически забыта.

В первых работах по новой глобальной тектонике физический механизм перемещения литосферных плит не был разработан и лишь в последующие 20 лет появились работы, рассматривающие эту проблему. Выяснение механизма, лежащего в основе тектоники плит, имеет принципиальное значение для теоретической и практической геологии.

Существующие гипотезы о природе сил, приводящих в движение плиты, и их критический анализ рассмотрены в разделе «Геодинамические аспекты новой глобальной тектоники».

Автором [Киркинский, 1975, 1977] был предложен простой физико-химический механизм, который может объяснить крупные горизонтальные перемещения литосферных плит и происхождение глобальных структур Земли. Положения этой концепции доложены на 27-м Международном геологическом конгрессе [Киркинский, 1984а] и опубликованы [Киркинский, 1984б, 1985]. В настоящей работе эти идеи излагаются более подробно и получают дальнейшее развитие.

Очевидно, что в небольшой по объему книге невозможно рассмотреть все стороны этой важной проблемы, особенно количественные ее аспекты, более того, решить такую задачу полностью можно только коллективными усилиями специалистов разных областей науки.

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ НОВОЙ ГЛОБАЛЬНОЙ ТЕКТОНИКИ

Основное внимание в настоящей работе уделено глубинным процессам и силам, определяющим движение вещества в Земле, т. е. проблемам, которые принято относить к геодинамике. В связи с этим в данном разделе рассмотрим три вопроса: основные положения новой глобальной тектоники; существующие представления о причинах глобального тектогенеза и их критический анализ; некоторые общие закономерности фазовых превращений в глубинах Земли, имеющие прямое отношение к проблемам геодинамики.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕКТОНИКИ ПЛИТ

Несмотря на многочисленные работы, посвященные новой глобальной тектонике, подавляющее большинство исследователей не формулируют строго ее положения, поэтому рамки этой концепции и ее постулаты довольно расплывчаты и у разных авторов различны. Многие из них связывают концепцию с каким-либо гипотетическим механизмом движений, что увеличивает эту неопределенность.

Для того чтобы предмет новой глобальной тектоники был более четко определен, автор сделал попытку выразить ее суть в виде нескольких положений, намеренно не включив в них предположения о конкретных глубинных механизмах движений.

Перечислим эти положения.

1. Литосфера Земли — внешняя, относительно жесткая и хрупкая оболочка планеты, включающая кору и часть верхней мантии, разделена на небольшое число плит, изостатически уравновешенных на пластичной астеносфере. Разделение на плиты не связано с разделением на океаны и материки.

2. Литосферные плиты испытывают горизонтальные перемещения относительно друг друга со скоростью порядка нескольких сантиметров в год. Перемещения плит могут быть описаны как их вращения вокруг определенных осей, общих для смежных плит. Скорость раздвига плит скачкообразно возрастает от полюсов разрастания к экваторам на параллельных последним трансформных разломах. Исходя из ориентации этих разломов, можно

Сравнение тектонических моделей

Геологические факты	Тектонические модели					
	Контракция	Рост континентов	Океанизация	Расширение Земли	Пульсация Земли	Тектоника плит
1	2	3	4	5	6	7
Подобие очертаний материков и границ их континентальных склонов восточной и западной окраин Атлантического океана, Австралии, Антарктиды и др.	—	—	—	?	+	+
Близкое сходство геологического строения и ископаемых форм жизни до позднего мезозоя Южной Америки и Африки, Северной Америки и Европы	—	—	—	+	+	+
Общность геологического строения, синхронность материкового оледенения на континентах Южного полушария и Индии в верхнем палеозое	—	—	—	—	+	+
Срединно-океанические хребты	—	—	—	+	+	+
Полосовые магнитные аномалии дна океана, параллельные рифтовым зонам	—	—	—	+	+	+
Закономерное увеличение возраста дна океанов по мере удаления от рифтовых зон, определенное по магнитным аномалиям и осадкам	—	—	—	+	+	+
Палеомагнитные данные по широте материков в древние геологические эпохи	—	—	—	—	+	+
Палеоклиматические условия на материках в древние эпохи, соответствующие реконструкциям их положения	—	—	—	—	+	+
Положение зон сейсмической активности на поверхности и в глубинах Земли, характер распределения напряжений в очагах землетрясений	—	—	—	—	—	+
Основные черты строения и развития геосинклиналей, орогенез	—	—	—	—	+	+
Трансформные разломы	—	—	—	—	?	+
Сопряженные гравитационные аномалии в сейсмофокальных зонах	—	—	—	—	?	+
Закономерное уменьшение теплового потока от рифтов к желобам	—	—	—	+	+	+
Приуроченность андезитового вулканизма к сейсмофокальным зонам	—	—	—	—	+	+
Наличие двух максимумов на кривой зависимости распространенности пород от содержания кремнезема	—	?	?	—	+	+
Парные метаморфические пояса	—	—	—	—	+	+
Орогенические пояса, региональные надвиги, характеризующие местное сокращение площади земной коры	+	+	—	—	?	+

1	2	3	4	5	6	7
Обогащенность калием континентальной коры по сравнению с океанической	—	?	?	—	+	+
Подводные горы и вулканические острова	—	—	—	+	+	+
Офиолитовые формации	—	—	—	?	+	+

Примечание. Знаком (+) отмечена возможность, а знаком (—) — невозможность объяснения данных геологических фактов, исходя из модели, знаком (?) отмечена неясность согласования модели с наблюдаемыми фактами.

построить согласованную кинематическую картину относительных движений плит в глобальном масштабе.

3. На границах литосферных плит концентрируется основная тектоническая, сейсмическая и магматическая активность планеты. Специфика этих процессов зависит от типа границ (раздвиг, сближение или сдвиг плит, континентальные или океанические участки смежных плит).

4. На границах раздвигания плит — рифтовых зонах происходит подъем из астеносферы разогретого мантийного материала с выплавлением из него базальтов, наращающих при кристаллизации края плит. Возраст базальтов увеличивается по мере удаления от рифта. Повышение теплового потока в рифтовых зонах ведет к образованию срединно-океанических хребтов. Постепенное охлаждение расплава и его кристаллизация приводят к увеличению мощности литосферных плит и углублению океанической впадины при удалении от рифтовой зоны.

5. При сближении плит океаническая часть одной из них может погружаться (субдуцироваться) под другую по наклонной плоскости — сейсмофокальной зоне Бенъофа. В надвинутой континентальной части плиты широко проявляются сбросы, складчатость, а также вулканизм и магматизм, преимущественно андезитового состава за счет частичного плавления материала погружающейся плиты.

6. Субдукция плит компенсирует процесс наращивания новой коры в рифтовых зонах, так что общий объем Земли остается приблизительно постоянным.

7. При столкновении континентальных частей плит сиалическая кора деформируется с образованием надвигов и шарьяжей, формируются орогенические пояса, что сопровождается тектономагматической активизацией на прилегающих участках континентов.

8. Геосинклинали зарождаются в океанических областях на границах с континентами. Геологическая история геосинклиналей связана с глобальным характером деформаций литосферы, обусловленных главным образом горизонтальными движениями литосферных плит.

9. Взаимные горизонтальные перемещения плит на протяжении по крайней мере последних нескольких сот миллионов лет являются определяющим фактором в геологической истории Земли.

В табл. 1 перечислены геологические факты, которые были логично объяснены с позиций новой концепции. Для сравнения показано, как они согласуются с представлениями, не допускающими значительных перемещений континентов, и гипотезами значительного расширения и пульсации Земли. Как видно из таблицы, ни одна из конкурирующих гипотез, кроме тектоники плит, не может объяснить всю совокупность важнейших черт строения Земли. В последующих разделах будет показано, что многие другие известные геологические характеристики планеты также невозможно или крайне трудно объяснить с фиксистских позиций.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРИЧИНАХ ГЛОБАЛЬНЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Как отмечалось выше, проблема глубинного механизма глобального тектогенеза — ключевая в тектонике плит. Со времени появления самых первых мобилистских идей высказан целый ряд гипотез о причинах крупномасштабных перемещений литосферных плит, которые можно расклассифицировать следующим образом*.

I. Термоконвекция [Holmes, 1931; Veining-Meinesz, 1962; Chandrasekhar, 1953; и др.]: а) в верхней мантии; б) в слоях В и С; в) во всей мантии.

II. Гравитационное погружение краев плит в зонах Беньофа [Elsasser, 1969, 1971].

III. Избыточное давление расплава в дайках рифтовых зон [Lliboutry, 1969].

IV. Активный диапиризм астеносферного материала в кору [Hales, 1969; Jacoby, 1970].

V. Гравитационная дифференциация Земли [Артюшков, 1968, 1970, 1979].

VI. Химико-плотностная конвекция во всей мантии [Сорохтин, 1972, 1974].

VII. Пульсационная гипотеза [Bucher, 1933; Обручев, 1940; Кропоткин, 1973; Кропоткин, Ефремов, 1983; Милановский, 1978, 1984б].

VIII. Модель латеральных фазовых переходов [Киркинский, 1975, 1977].

* Названия моделей авторами, как правило, не давались; сформулированные ниже краткие названия-характеристики, конечно, не могут отразить всего существа предложенных идей, но необходимы для удобства ссылок. Мы будем называть их также по фамилиям авторов, предложивших и обосновавших модели.

В последние годы появился ряд работ, в которых анализ сил, действующих на плиты, проводился исходя из наблюдаемого строения основных геологических структур без обсуждения по существу вопросов их происхождения.

Рассмотрим кратко перечисленные выше гипотезы. Для удобства изложения и анализа хронологический порядок не всегда будет соблюдаться.

В основу термоконвективных моделей положено представление о том, что литосферные плиты увлекаются потоками мантийного материала, подобными потокам в слое жидкости с градиентом температуры (конвекция Бенара — Рэлея). Идея о термоконвекции в глубинах Земли как возможной причине перемещения континентов активно развивалась А. Холмсом [Holmes, 1931, 1965], Г. Хиллсом [Hills, 1934], С. Пекерисом [Pekeris, 1935], Ф. Венинг-Майнесом [Veining-Meinesz, 1962], С. Чандрасекхаром [Chandrasekhar, 1953] и другими в качестве обоснования мобилизма А. Вегенера [Wegener, 1922], а затем принята в качестве теоретической основы тектоники плит в современном ее варианте [Dietz, 1961; Hess, 1962; Isacks e. a., 1968]. Впоследствии в работах ряда исследователей, среди которых были математики, механики, геофизики, возможность термоконвекции в мантии многократно обсуждалась [Knopoff, 1967; Tozer, 1969; Turcotte, Oxburgh, 1972; Richter, 1973; McKenzie, 1969; McKenzie, Weiss, 1975; Жарков, Трубицын, 1980; Жарков, 1983].

Как показали многочисленные исследования, наименьшую вязкость твердой Земли имеет верхняя мантия до глубины ≈ 400 км. Верхняя граница этой зоны находится на глубине ≈ 70 км под океанами и ≈ 200 км под континентами [Жарков, 1983]. Число Рэлея в этом маловязком астеносферном слое превосходит критическое значение, так что конвекция в нем принципиально возможна. Однако при обычной термической конвекции линейные размеры ячеек должны иметь величину того же порядка, что и мощность слоя (т. е. 200—300 км), реальные же размеры плит на 1—1,5 порядка больше. Это несоответствие пока не получило удовлетворительного объяснения. По мнению ряда исследователей (см., например, [Артюшков, 1979]), горизонтальные напряжения, передаваемые от предполагаемых потоков в астеносфере на плиты, недостаточны для перемещения последних. В настоящее время большинство специалистов считают, что конвекция в верхней мантии не может быть причиной перемещения литосферных плит, а сама индуцируется крупномасштабными движениями плит [Richter, 1973; Richter, Parsons, 1975].

Идея термоконвекции, охватывающей всю мантию вплоть до границы с ядром, была выдвинута А. Холмсом [Holmes, 1931] и обсуждалась учеными в разных вариантах. Важным аргументом в пользу этого предположения является примерное соответствие средних размеров литосферных плит толщине конвектирующего слоя, что согласуется с классической теорией Рэлея. Однако воз-

можная роль термоконвекции в нижней мантии как причины горизонтальных перемещений плит пока не доказана.

1. Конвекция в нижней мантии может начаться только при очень больших сверхадиабатических перепадах температуры. Такие перепады должны поддерживаться мощными внутренними источниками тепла, так как тепловая конвекция приводит к выравниванию температуры по адиабатическому закону [Геофизика..., 1979].

2. Резкое увеличение вязкости на глубинах более 700 км должно приводить к существованию раздельной конвекции в мантии ниже и выше этой границы [Жарков, 1983].

3. При длительно существующих потоках из нижней мантии под рифтовыми зонами перемещение последних на поверхности Земли должно приводить к их резкой асимметрии, что на самом деле не наблюдается.

Наиболее обоснованным вариантом термоконвекции является тепловая конвекция с пограничными слоями, охватывающая слои В и С мантии до глубин ≈ 700 км [Turcotte, Oxburgh, 1972; Гаврилов, Жарков, 1979, 1981; Жарков, 1983].

Верхние погранслои конвективных ячеек, согласно этой теории, отождествляются с литосферными плитами. Конвекция начинается с прогрева подошвы слоя на глубинах ≈ 700 км, в результате чего образуется нижний горячий погранслой. Градиент температуры в нем растет до создания конвективной неустойчивости. По мере распространения тепла вверх возникает восходящая струя горячего материала, которая, подходя к литосфере, прогревает и утоняет ее, что приводит к расколу последней. При подъеме перегретого материала по адиабате начинается выплавление базальтовой магмы. Направленный вниз поток отождествляется в этой модели с самой погружающейся плитой.

В литературе активно обсуждался вопрос, как влияют границы в слое С мантии, соответствующие фазовым превращениям, на конвекцию. Высказывалось мнение, что наличие таких границ должно препятствовать конвекции или видоизменить ее в многоэтажную. Ф. Рихтер [Richter, 1973] показал, что в зависимости от наклона линии фазового превращения на PT -диаграмме переходы на границах могут дестабилизировать и стабилизировать конвекцию, и в первом приближении влияние их на динамику потоков в мантии можно не учитывать.

Несмотря на значительное число теоретических работ, посвященных проблеме термической конвекции с погранслоями, вопрос о ней как возможном активном механизме крупномасштабных перемещений плит пока не ясен по следующим причинам.

1. По оценке В. Н. Жаркова и В. П. Трубицына [1980], время установления стационарной конвекции составляет $\approx 1,6 \cdot 10^9$ лет, а время одного оборота материала в конвективной ячейке $\approx 10^8$ лет. Следовательно, выводы, полученные для стационарной конвекции, не применимы в полной мере для анализа конвекции в мантии.

2. Теоретически рассматривалась только двумерная конвекция. Влияние трехмерности на форму конвективных ячеек не исследовано. Для сложной по форме плиты чрезвычайно трудно представить распределение восходящих и нисходящих потоков соответствующим ее границам.

3. В зонах восходящего потока — рифтах, как известно, происходит дифференциация мантийного материала с образованием более легкой базальтовой коры. Следовательно, в зонах субдукции в мантию должен погружаться более легкий материал (включая осадки), что не учитывается теорией термоконвекции.

4. Линейный характер рифтовых зон и их протяженность на тысячи километров очень трудно согласовать с формой восходящих термоконвективных потоков, которые в плане должны быть изометричны.

5. При перемещении рифтовой зоны над стационарным восходящим потоком ее строение со временем должно стать резко асимметричным, что не наблюдается даже для зон, испытывающих значительные смещения в результате взаимодействия плит.

6. Поступление разогретого материала с больших глубин в область рифта должно было бы приводить к общему подъему рельефа в этих областях. На самом деле, несмотря на образование срединно-океанических хребтов, уровень рельефа в целом понижается.

7. Наблюдения в областях современных континентальных рифтов (например, Байкальского), как отметил Е. В. Артюшков [1979], свидетельствуют об узкой локализации нагретого астеносферного материала. Если связывать такие рифтовые сводовые поднятия с подъемом горячего материала из верхней мантии, то при скоростях растекания, постулируемых теорией термоконвекции, ≈ 10 см/год за время существования рифта неоднородности мантии должна распространиться далеко за пределы поднятия, например для Байкальской рифтовой зоны, образовавшейся не менее 30 млн. лет назад, — на расстояние ≈ 3000 км.

Рассмотрим теперь модели, объясняющие перемещения плит гравитационной дифференциацией вещества Земли.

Е. В. Артюшков [1968, 1970, 1979] связывает тектонические процессы с гравитационной дифференциацией материала нижней мантии, в результате которой тяжелая фракция переходит в ядро, а легкий остаток поднимается в верхнюю мантию, нагреваясь за счет выделения потенциальной энергии. При дополнительной дифференциации в верхней мантии легкие компоненты всплывают, образуя срединно-океанические хребты или поднятия литосферы на кристаллических щитах. Неоднородности коры и линзы аномальной мантии создают в литосфере добавочные напряжения, которые вызывают вязкое растяжение коры и формирование рифтовых впадин. Дрейф литосферных плит происходит вследствие растекания линз аномальной мантии, расположенных под срединно-океаническими хребтами. Субдукция возникает в тех областях, где под холодной океанической литосферой располагается разуплотненная аномальная мантия.

Модель химико-плотностной конвекции предложена и активно развивается О. Г. Сорохтиным [1972, 1974; Геофизика..., 1979]; принята она и другими исследователями [Ушаков, 1974; Монин, 1977; Ушаков, Галушкин, 1978, 1979, 1983; Зоненшайн, Савостин, 1979]. Согласно этой модели, появление плотностных неоднородностей на границе ядро — мантия в результате сброса в ядро тяжелых компонентов приводит к восходящим потокам легкого материала до астеносферы, а далее по астеносфере — до зон субдукции, где вещество вновь погружается в мантию. Горизонтальный поток в астеносфере увлекает за собой литосферные плиты. В мантии формируются одно- или двухъячейные структуры, периодически сменяющие друг друга. Со сменой конвективных структур связываются тектонические циклы.

Несмотря на существенные различия моделей Е. В. Артюшкова и О. Г. Сорохтина, оба автора предполагают длительное существование потоков легкого вещества из нижней мантии к коре Земли. Рассматривая выше вопросы о термической конвекции, включающей глубокие горизонты Земли, мы приводили веские аргументы против того, что наличие таких потоков является причиной образования рифтовых зон, спрединга и перемещения литосферных плит. Ввиду важности вопроса повторим их применительно к концепциям гравитационного всплывания.

1. Протяженность рифтовых зон Земли на многие тысячи километров при малой ширине принципиально отличает их от типичной изометричной в плане формы диапиров и восходящих потоков при тепловой и химико-плотностной конвекции.

2. Характерные изломы по простиранию рифтовых зон нельзя объяснить структурой потоков легкого всплывающего материала.

3. Согласование относительных движений литосферных плит во времени невозможно без предположения о перемещении рифтовой зоны по поверхности геоида со скоростью порядка нескольких сантиметров в год. Таким образом, за миллионы лет рифт, образовавшийся над восходящим потоком разогретого вещества, должен сместиться на сотни и тысячи километров от него. Это неминуемо приведет к резкой асимметрии рифтового хребта, постепенному замедлению и остановке плиты, находящейся над восходящим потоком, так как часть последнего направлена не от рифта, а к рифту. Кроме того, общей закономерностью должно быть периодическое образование рифтовых трещин, параллельных первоначальной, что на самом деле происходит довольно редко.

4. При подъеме разогретого материала в области рифта и его последующем растекании следовало бы ожидать общего подъема уровня рельефа в этой области. На самом деле наблюдается противоположная картина — общее устойчивое понижение высоты рельефа в областях, примыкающих к рифтовому хребту, образование и постепенное углубление с возрастом океанической впадины.

Кроме того, остаются без ответа некоторые важные вопросы, относящиеся в большей мере к модели химико-плотностной конвекции. Почему разогретый и частично расплавленный материал,

пришедший в область рифта с глубин, полностью не изливается в этой зоне с образованием кристаллических пород, а совершает длительное путешествие через многие тысячи километров, преодолевая огромное сопротивление? Как согласовать реальное расположение рифтовых и сейсмофокальных зон со схемой одной и двухъячейстой конвекции? Например, у западного побережья Центральной Америки очень близко располагаются Тихоокеанская рифтовая зона и одна из самых ярко выраженных зон субдукции.

Перечисленные аргументы вместе с отмеченными в работах других исследователей, по мнению автора, показывают, что с помощью данных механизмов трудно объяснить крупные горизонтальные перемещения плит.

Рассмотрим теперь модели, связывающие причины горизонтальных тектонических движений с явлениями, происходящими в верхней мантии и литосфере.

В. Эльзассер [Elsasser, 1969, 1971] предположил, что силой, перемещающей плиты, является отрицательная плавучесть их краев в зонах Бенъофа, что вызывает разрыв плит в рифтовых зонах и возвратный поток вытесненного погружающейся плитой материала астеносферы к рифту. В работах [Minear, Toksöz, 1970; Turcotte, Schubert, 1971; Oxburgh, Turcotte, 1976] на основе решения динамической тепловой задачи для погружающейся плиты было показано, что при скоростях погружения, отвечающих скорости спрединга, плотность погружающейся части плиты больше на $0,5-0,1$ г/см³ по сравнению с окружающей мантией за счет более низкой температуры и повышения уровня границ перехода базальт — эклогит и оливин — шпинель. Модель Эльзассера была принята в качестве теоретической основы целого ряда последующих расчетных работ.

Однако данная модель вызвала ряд серьезных возражений.

1. Если погружающийся край увлекает за собой плиту, то последняя должна испытывать напряжения растяжения на большей части площади. На самом деле наблюдается обратная картина [Hast, 1969; Кропоткин, 1971].

2. Литосферная плита не может претерпеть изгиб до $30-50^\circ$ в зоне Бенъофа без образования трещин деформации и разрыва. Следовательно, погружающийся край плиты не будет тянуть за собой горизонтальную ее часть. Существование таких трещин отрыва было предсказано О. Г. Сорохтиным [1974] и доказано непосредственными сейсмическими наблюдениями в Курило-Камчатском глубоководном желобе [Tarakanov e. a., 1974; Sychev, Tarakanov, 1976].

3. Если ббльшая плотность материала плиты по сравнению с астеносферой имеет место только для погруженной части плиты, то неясна первоначальная причина ее заталкивания вглубь против архимедовых сил. Если же плотность плит по сравнению с астеносферой больше, то почему не наблюдается погружение их по всей площади?

5. Известно, что ряд литосферных плит, например Антарктическая, Африканская, Северо- и Южноамериканская, либо вообще не имеют зон субдукции, либо протяженность их очень мала. Наблюдаемые перемещения этих плит невозможно объяснить силами отрицательной плавучести погруженных в мантию краев.

Таким образом, несомненной заслугой В. Эльзассера является указание на силы, способствующие погружению плит в зонах Бенюфа, однако по изложенным выше причинам предложенная им модель не может быть принята.

Французский гляциолог Л. Ллибутри [Lliboutry, 1969] предположил, что причина дрейфа континентов заключается в накоплении частично расплавленного вещества в микротрещинах в астеносфере, их объединении в вертикальные макротрещины, гидростатическое давление в которых превышает литостатическое, что и обуславливает существование сил, направленных в стороны от рифтовой зоны, и спрединг. Согласно его модели, вертикальные дайки имеют глубинный резервуар в виде большого силла, поэтому после кристаллизации расплава в дайке внедряется новая порция магмы и цикл повторяется. По представлениям Л. Ллибутри, вынос тепла расплавом приводит к снижению верхней и нижней границ астеносферы в области рифта, таким образом избыточное гидростатическое давление расплава в дайке должно преодолевать вязкое сопротивление на границе литосферной плиты и астеносферного слоя и противодействовать силе тяжести. В его работе не даются количественные оценки основных сил, действующих на плиту.

Модель Л. Ллибутри нельзя считать реальной по ряду причин.

1. Даже из самых общих соображений трудно допустить, что избыточное давление расплава в дайке, имеющей мощность порядка десятков метров, перемещает плиты длиной несколько тысяч километров и толщиной 50—100 км.

2. Непонятно, почему расплав, находящийся в дайке под избыточным давлением 1—2 кбар (0,1—0,2 ГПа), не изливается на поверхность, реализуя таким путем напряжения.

3. Из-за теплоотдачи на стенки трещины расплав в дайках быстро охлаждается и кристаллизуется, что приводит к падению избыточного давления.

4. Непосредственным следствием данной модели являются чрезвычайно большие градиенты давлений вкострест простирания рифтовых зон, быстрое уменьшение горизонтальных напряжений вдали от рифта. Это противоречит данным сейсмологических наблюдений, измерений напряжений сжатия в плитах и гравитационным аномалиям в зонах субдукции.

5. Предположение о снижении уровня астеносферных границ в области рифта было опровергнуто прямыми измерениями методом поверхностных волн [Yoshii, 1973; Leeds, 1972; Forsyth, 1977].

А. Хэлс [Hales, 1969] первый обратил внимание на то, что литосферные плиты в рифтовых зонах гравитационно-неустойчивы

и могут соскальзывать с астеносферных поднятий под ними. На этой основе В. Якоби [Jacoby, 1970] предложил модель активных диапиров материала астеносферы в океаническую кору в результате которых формируются рифтовые поднятия и появляются силы, направленные в стороны от рифта. Совместное действие этой силы и отрицательной плавучести погружающегося края плиты, по его оценкам, может преодолеть вязкое трение на нижней границе плиты и в зоне субдукции. Погружающаяся часть плиты вытесняет материал мантии, что создает возвратный поток в астеносфере к рифту.

Модель Хэлса — Якоби — важный шаг в понимании механизма горизонтальных движений плит, однако самое слабое ее место — объяснение происхождения астеносферных поднятий в рифтовых зонах. Действительно, если допустить, что материал астеносферы менее плотен, чем плита, то непонятно хорошее выполнение законов изостазии практически на всей поверхности Земли. Вытянутые на тысячи километров узкие рифтовые зоны не имеют ничего общего по форме с обычно изометричными соляными и магматическими диапирами. С позиций этой модели трудно также объяснить изломы по простиранию рифтовых зон. Г. Шуберт и Д. Теркот [Schubert, Turcotte, 1972] попытались более строго проанализировать модель Хэлса — Якоби и получили несоответствие высот геоида и силы тяжести по профилю от рифта к зоне субдукции.

В работах П. Н. Кропоткина [1973] и Е. Е. Милановского [1978, 1984б] защищается идея пульсаций размера Земли, выдвинутая еще В. Бухером [Bucher, 1933] и В. А. Обручевым [1940]. П. Н. Кропоткин рассматривает пульсации в качестве источника горизонтальных движений литосферных плит в новой глобальной тектонике. В фазы расширения происходят утонение коры и ее разрыв в рифтовых зонах с внедрением даек и излиянием базальтов, а в фазы сжатия слои сминаются, кора поглощается в зонах Беньюфа. Однако авторы гипотезы не предложили удовлетворительного физического механизма, объясняющего пульсации размера планеты. Кроме того, в настоящее время и в прошлые эпохи рифтовые зоны, соответствующие областям растяжения, и зоны субдукции, отвечающие областям сжатия, существуют и существовали одновременно, что противоречит основам этой гипотезы.

Автором [Жиркинский, 1975, 1977] на основе анализа закономерностей фазовых превращений при высоких давлениях и температурах был предложен простой физико-химический механизм глобальных тектонических движений, подробнее рассмотренный в следующих разделах.

За последние годы выполнен ряд работ, в которых на основе теоретических оценок или анализа наблюдаемых направлений и скоростей перемещения литосферных плит рассчитаны действующие на них силы. Исходными для этих расчетов являлись рассмотренные модели В. Эльзассера, Л. Ллибутри, А. Хэлса —

В. Якоби, либо авторы брали за основу наблюдаемое в настоящее время строение лито- и астеносферы в рифтовых и сейсмофокальных зонах, не рассматривая по существу вопросов их происхождения.

Как будет показано ниже, проведенный в упомянутых работах анализ приложим и к предлагаемому нами механизму глобального тектогенеза.

Кратко перечислим основные результаты этих исследований. В 1975 г. практически одновременно и независимо были выполнены три работы [Forsyth, 1975; Solomon, Sleep, 1975; Harper, 1975], в которых соотношение сил, действующих на плиты, оценивалось исходя из наблюдаемых скоростей спрединга в рифтовых зонах.

Д. Форсайт и С. Уеда [Forsyth, Ueda, 1975] пришли к заключению о том, что «толкающие» силы, приложенные к плитам в рифте, и «тянущие» силы в зонах субдукции находятся в балансе с силами вязкого сопротивления астеносферы на дне и погружающихся краях плит. Несмотря на то, что по их расчетам сила отрицательной плавучести краев плит почти на порядок больше сил соскальзывания в рифтах, она в значительной степени скомпенсирована высоким сопротивлением материала мантии на глубинах ниже астеносферного слоя. Рассчитанная вязкость астеносферы под океаническими плитами оказалась равной $5 \cdot 10^{19}$ П, а под континентами $1 \cdot 10^{20}$ П, что согласуется с оценками, полученными по скоростям изостатических поднятий Фенноскандии, Канады, Западной Сибири и оз. Бонневиль в работах [Takeuchi, Hasegawa, 1965; McConnell, 1965, 1968; Walcott, 1972; Artyushkov, 1971; Lliboutry, 1974], дающими для вязкости под континентами величины от 10^{20} до 10^{21} П. Другие силы, например напряжение сдвига в трансформных разломах, играют меньшую роль в общем балансе.

С. Соломон и другие авторы [Solomon, Sleep, 1975; Solomon et al., 1975] пришли к заключению, что наиболее чувствительными к действующим силам являются не векторы относительных движений плит, а напряжения в них. По их мнению, на данной стадии нет модели, в которой сила в рифтах не была бы того же порядка, что и сила затягивания в зонах Беньофа.

В работах Дж. Харпера [Harper, 1975], исходя из оценок сил, вычисленных в плоских задачах на основе имеющихся данных по строению рифтовых зон и зон Беньофа, рассматривалось движение восьми основных литосферных плит. При допущении увеличения мощности океанических плит по мере удаления от рифтовых зон и большей вязкости астеносферы под континентами (что признается сейчас всеми исследователями) были получены направления и скорости перемещения плиты, отличающиеся от рассчитанных по строению зон спрединга не более чем в 0,8—1,4 раза. Учитывая приближенный характер модели, такое согласие следует признать очень хорошим.

Наиболее полный расчет конвекции, включающей литосферные плиты, для ньютоновской реологии астеносферы был проведен Ф. Рихтером [Richter, 1977]. Он оценил вклад всех основных сил, действующих на движущуюся плиту, и показал, что наилучшее совпадение с наблюдаемыми скоростями их движения и распределением напряжений в плите, погружающейся в зоне Беньофа, получается, если вязкость верхней мантии увеличивается с глубиной в 20 раз. При этом не должно наблюдаться корреляции между скоростями и площадями плит.

В работах Г. Шуберта и других [Schubert e. a., 1976, 1978; Juen e. a., 1978] в приближении локального подобия решалась плоская термомеханическая задача конвекции для случая, когда реологические свойства мантии отличались от ньютоновской жидкости и моделировались свойствами оливина при высоких температурах и давлениях. Авторы составили систему дифференциальных уравнений, включающих горизонтальный и вертикальный перенос тепла, вертикальную теплопроводность, выделение энергии при вязком течении материала, адиабатическое нагревание, последующее охлаждение и гравитационное всплывание. Были рассчитаны глубинные профили горизонтальных и вертикальных скоростей, температуры и сдвиговых напряжений в зависимости от возраста океанического дна. Результаты использованы для построения изотерм и линий течения в мантии при различных величинах возвратного потока в астеносфере. Данные расчетов согласуются с наблюдаемыми глубинами океана, если температура на глубине 100—200 км составляет 1400—1500°C и активационный объем крипа оливина равен 11 см³/моль, при этом значительная доля возвратного потока сосредоточена в астеносфере. Сдвиговые напряжения в основании жесткой литосферы составляют от одного до нескольких бар.

В работах С. В. Гаврилова и В. Н. Жаркова [1979, 1981] были рассчитаны термомеханические модели континентальной и океанической верхней мантии также для неньютоновской реологии исходя из определенных оценок зависимости сдвигового течения в мантии от глубины (включая эффекты фазовых переходов). Величина возвратного потока при этом не задавалась в виде граничного условия, а получалась в результате решения задачи. Для различных значений возраста плит вычислены профили температуры, касательных напряжений, скоростей, эффективной вязкости. Рассчитанные значения потока тепла, глубин океана по профилю от рифта к зонам субдукции, изменения высот геоида согласуются с реально наблюдаемыми значениями. Возвратный поток оказался сосредоточенным в верхней части слоя С мантии до глубин ≈ 700 км.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ГЛУБИНАХ ЗЕМЛИ

Отметим некоторые характерные черты фазовых переходов в мантии и коре Земли, которые имеют существенное значение для анализа причин глобальных тектонических процессов.

Положительные значения $dT_{\text{превр}}/dP$ для большинства фазовых превращений, превышающие по величине геотермобарический коэффициент в коре и мантии Земли [Киркинский, 1977]. Данная закономерность видна на изученных алюмосиликатных системах. В качестве примеров можно привести полиморфные переходы и реакции: $Ol \rightarrow Sp$; $Q \rightarrow Co \rightarrow St$; $An + Fo \rightarrow Crx + Orx + Sp \rightarrow Py$; $Crx \rightarrow Fo + St \rightarrow Sp + St \rightarrow Ilm$ и т. д.* Она подтверждается также топологически увязанными фазовыми PT -диаграммами систем $MgO - Al_2O_3 - SiO_2$ [Дорошев, Малиновский, 1974] и $CaO - Al_2O_3 - SiO_2$ [Дорошев и др., 1976].

Отсюда следует, что повышение геотерм практически всегда должно приводить к увеличению объема пород и, наоборот, охлаждение участка или зоны сопровождается возрастанием плотности минеральных ассоциаций и общим уменьшением объема пород.

Анализ смещения фазовых границ при изменении температуры в мантии Земли на основе современных экспериментальных данных проведен в работе В. Л. Барсукова и В. С. Урусова [1982], которые также пришли к выводу о преимущественно положительном наклоне большинства минеральных равновесий и о сопряженности увеличения объема мантии с повышением температуры.

Чрезвычайно большая энергетическая емкость фазовых превращений (т. е. способность запасать и выделять большие количества энергии). Многочисленные исследования петрологически важных систем доказали существование целого ряда последовательных реакций преобразования минералов и пород при изменении термодинамических параметров. Для реакций метаморфизма при образовании фации зеленых сланцев поглощение тепла оценивается в 25 ккал/кг, фации эпидотовых амфиболитов — в 50 ккал/кг, фации амфиболитов — в 70 ккал/кг. Плавление гранитов и базитов требует затраты около 70 и 100 ккал/кг соответственно [Ревердатто, 1970; Parker, Oldenburgh, 1973]. Столь же большие энергетические изменения связаны с фазовыми переходами в мантии Земли. Величины их можно оценить, например, по уравнению Клаузиуса — Клапейрона из экспериментально установленных наклонов линий фазового равновесия и данных по плотности минералов. Сводка термохимических данных о фазовых превращениях в мантии имеется в работе В. Л. Барсукова и В. С. Урусова [1982].

* Используются следующие обозначения: Sp — шпинель, Ol — оливин, St — стишовит, Co — коэсит, Q — кварц, Py — пироп, Crx — клинопироксен, Orx — ортопироксен, An — анортит, Fo — форстерит, Ilm — $(Mg, Fe)SiO_3$ — со структурой ильменита.

Очень важно, что породы, которые могут претерпевать фазовые превращения при изменении положения геозотерм, представляют собой целые оболочки Земли мощностью в сотни километров, следовательно, их общая энергетическая емкость огромна.

Высокие скорости фазовых превращений при термодинамических параметрах мантии. Как известно, скорость твердофазных реакций и полиморфных переходов находится в экспоненциальной зависимости от температуры. Распространенные представления о крайне низкой скорости реакций между кристаллическими веществами относятся к низким и средним температурам (до 500—700°C). Опыт многих экспериментаторов показывает, что при температурах выше 1000—1200°C большинство твердофазных реакций в силикатных системах протекает за несколько часов или суток. Повышение давления незначительно влияет на время достижения равновесия. Таким образом, можно ожидать, что времена, необходимые для достижения минеральных равновесий в условиях мантии Земли, значительно меньше в сравнении с продолжительностью обычных геологических процессов (исключая некоторые катастрофические явления, например землетрясения).

Буферирующая роль фазовых переходов. Наличие фазовых границ должно играть стабилизирующую роль по отношению к изменению температуры и давления во времени. Допустим, что по какой-либо причине существенно повысилась температура в определенном участке мантии Земли. Это должно вызвать возрастание теплового потока к поверхности. Повышенный поток приведет к перемещению фазовых границ в более глубокие горизонты, переходу пород высокого давления в минеральные ассоциации низкого давления. Такой переход поглощает большое количество тепла, и изменение теплового потока в вышележащих горизонтах резко ослабляется, что обуславливает высокую стабильность теплового потока Земли во времени и имеет существенное значение для оценки температурного режима планеты. Увеличение давления в некотором участке Земли за счет глобальных напряжений приведет к смещению фазовых границ в прилегающей области, но этот процесс сильно заторможен условиями стока или притока тепла, требуемого для осуществления соответствующих фазовых превращений.

Фазовые превращения при адиабатической декомпрессии. Обычно фазовые переходы в минералах и горных породах связывают с изменениями температуры; с ее увеличением происходят эндотермические превращения, а со снижением — экзотермические. Это относится как к плавлению и кристаллизации, так и к полиморфным превращениям и химическим реакциям. Однако столь же реально протекание таких переходов при изменении давления: например, плавление при снижении давления и кристаллизация при его повышении.

Изменения температуры в недрах Земли и планет происходят в основном за счет накопления энергии радиоактивного распада и гравитационной дифференциации. Эти процессы протекают

очень медленно, приводя к постепенному перемещению фазовых границ в глубинах или взаимному перемещению масс разной плотности в поле гравитации. В противоположность этому в твердой литосфере Земли при воздействии напряжений накапливается упругая энергия, которая может разряжаться при образовании трещин, смещении блоков пород относительно друг друга. В таких процессах происходят значительные и резкие изменения давления, что неминуемо приводит к фазовым превращениям. Особенно большое значение в геологии имеет декомпрессионное плавление.

Роль снижения давления в магматических процессах отмечалась рядом исследователей. Наиболее полный обзор работ по этой проблеме, термодинамический анализ фазовых превращений, сопряженных с декомпрессией в силикатных системах, содержащих H_2O и CO_2 , и их участия в формировании магм на глубинах континентальной коры и верхней мантии сделаны А. А. Кадиком и М. Я. Френкелем [1982].

Как будет показано далее, декомпрессионное плавление играет ключевую роль в механизме глобальных тектонических движений.

ГЛУБИННЫЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

МЕХАНИЗМ ГЛОБАЛЬНОГО ТЕКТОГЕНЕЗА

Анализ общих закономерностей фазовых превращений в глубинах Земли и опыт экспериментальной работы на аппаратах высокого давления позволили автору предложить новый физико-химический механизм крупномасштабных тектонических движений [Киркинский, 1975, 1977, 1984а, б, 1985]. Ниже этот механизм рассмотрен более детально и на его основе обсуждаются происхождение крупнейших тектонических структур и причины цикличности развития Земли.

1. Первая важная особенность предложенного механизма тектогенеза заключается в том, что образование глобальной системы рифтовых зон Земли объясняется не конвективными течениями материала мантии и не всплыванием легкого материала с больших глубин (из нижней мантии), а возникновением системы трещин разрыва в результате глобальных напряжений в литосфере.

Одной из возможных причин таких напряжений является постепенное, очень медленное увеличение общего объема Земли во времени; это следствие в основном двух процессов: распада радиоактивных элементов и гравитационной дифференциации. Оба процесса приводят к значительному выделению энергии и общему прогреву планеты. Так, по современным оцен-

кам общее количество энергии, выделившейся при распаде радиоактивных элементов за время существования Земли, составляет $0,41 \cdot 10^{38}$ эрг, а выделившейся за счет гравитационной дифференциации и образования ядра — $1,61 \cdot 10^{38}$ эрг по модели Кеонджяна — Монина [Кеонджян, Монин, 1976] и $1,46 \cdot 10^{38}$ эрг по модели Наймарка — Сорохтина [Геофизика..., 1979]. На непосредственный нагрев идет часть энергии, связанная с изобарическим распределением компонентов: $0,90 \cdot 10^{38}$ эрг для первой модели и $1,23 \cdot 10^{38}$ эрг — для второй. Несколько меньший, но все же заметный вклад ($\sim 0,26 \cdot 10^{36}$ эрг) дает энергия приливного торможения. Таким образом, за время существования планеты выделилось $(1,6 \div 1,9) \cdot 10^{38}$ эрг тепловой энергии [Геофизика..., 1979].

Вследствие низкой теплопроводности пород, особенно внешней литосферы, эта огромная энергия несомненно должна была бы приводить к постепенному разогреву внутренних частей Земли. Расчеты термической истории Земли проводились рядом исследователей (см., например, [Маева, 1967; Любимова, 1968; Ботт, 1974]). Несмотря на значительные неопределенности, связанные в основном с недостаточным знанием физических свойств пород при высоких давлениях и температурах, во многих из этих работ делается вывод о росте температуры в недрах на протяжении длительного времени развития Земли.

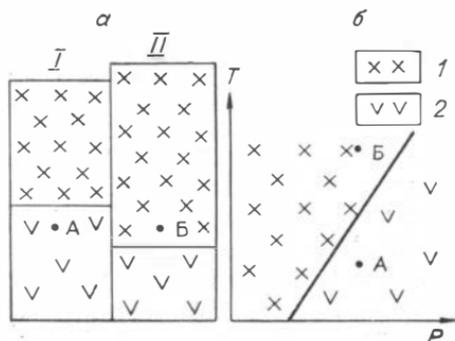
Следствием общего разогрева планеты должно быть термическое расширение составляющих ее минералов и общее увеличение объема. По расчетам Е. А. Любимовой [1968], возрастание температуры за период существования Земли должно было привести к увеличению ее радиуса на 50—100 км, а в настоящее время он увеличивается со скоростью около 3,5 см за 100 лет.

На основе анализа общих закономерностей фазовых равновесий при высоких давлениях и температурах было показано, что общее возрастание температуры в недрах Земли должно приводить к смещению большинства фазовых границ в мантии вглубь (рис. 1) [Киркинский, 1975, 1977]. Это вызывает дополнительное приращение размера планеты, которое по оценкам автора, основанным на измеренных значениях $T_{\text{превр.}}/P$ фазовых превращений в мантии, имеет тот же порядок величины, что и термическое расширение.

Рис. 1. Схема увеличения объема Земли при фазовых переходах, происходящих с ростом температуры.

а — смещение положения границы фаз низкого и высокого давления вглубь Земли с увеличением температуры, что сопровождается общим возрастанием объема (I — исходное, II — конечное положение); *б* — изменение положения участка, претерпевшего фазовое превращение на фазовой P - T -диаграмме (А — исходное, Б — конечное состояние).

1, 2 — фазы, устойчивые при высоких давлениях и низких температурах (1), при низких давлениях и высоких температурах (2).



В последние годы выполнены экспериментальные работы по исследованию фазовых равновесий основных химических компонентов при давлениях выше 15 ГПа. Это позволило провести более полные и точные расчеты объемных и термических эффектов фазовых превращений в переходном слое мантии [Барсуков, Урусов, 1982]. Результаты этих расчетов согласуются с нашим выводом о постепенном увеличении объема и поверхности Земли во времени и незначительно отличаются в количественном отношении.

Расширение планеты должно происходить также при плавлении материала верхней мантии и образовании астеносферного слоя. В результате плавления большинства силикатных минералов и пород объем увеличивается на 5—10%. Считается, что снижение скоростей упругих волн и сейсмической добротности в астеносфере обусловлено присутствием примерно 2—5% жидкой фазы [Рингвуд, 1972]. Следовательно, образование астеносферного слоя толщиной 100—200 км приведет к увеличению радиуса на 100—500 м и длины экватора или меридиана на 0,6—3 км.

Указывалась еще одна причина увеличения размера и объема Земли, связанная с гравитационной дифференциацией [Киркинский, 1975, 1977]. При формировании из первично-однородной Земли ядра, основная масса которого состоит из железа, силикатные минералы перемещаются в более высокие горизонты, что вследствие ряда фазовых превращений должно приводить к суммарному увеличению объема на 30—50%. В то же время полиморфные превращения железа и даже плавление во внешнем ядре, происходящие при его опускании к центру планеты, сопровождаются существенно меньшими объемными эффектами (не превышающими 10—15%). Даже если учесть адиабатическое сжатие планеты при образовании ядра, общий баланс объема будет положительным и даст приращение радиуса не менее десятков километров.

К сожалению, существуют значительные разногласия в отношении оценок термической истории планеты и скорости роста ядра в зависимости от принимаемых моделей и погрешностей экстраполяции физических свойств веществ на высокие температуры и давления. По этим причинам на основе такого подхода трудно ожидать быстрого прогресса в уточнении скорости увеличения размера Земли во времени. Однако возможен другой путь расчета. Для доказательства расширения Земли, начиная по крайней мере с палеозоя, автором [Киркинский, 1977] использовались расчеты С. Ранкорна [Runcorn, 1964], который на основе анализа ростовых колец в девонских кораллах определил количество дней в году (400 ± 10) и установил, что собственный момент инерции, т. е. без учета приливного замедления, увеличился с девона на 0,1—0,6%, что соответствует минимальной скорости приращения радиуса — 1—5 км за 10^8 лет. Истинная скорость увеличения размера Земли на самом деле выше, так как гравитационная дифференциация уменьшает момент инерции. Последующие палеонтологические измерения подтвердили эти расчеты

[Кузьмичева, 1982]. Данные расчеты согласуются с оценками объемных изменений за счет суммарного действия термического расширения, смещения фазовых границ и гравитационной дифференциации (см. выше).

Таким образом, два независимых способа оценки изменения объема планеты доказывают, что Земля, начиная по крайней мере со среднего палеозоя, претерпевает небольшое увеличение своего размера. Длина экватора за 100 млн. лет возрастает на первые десятки километров. Указанные расчеты в то же время доказывают неправомочность допущения значительного (на десятки процентов) увеличения радиуса Земли за период с начала мезозоя (см., например, [Чудинов, 1976; Carey, 1978; Гораи, 1984; и др.] — точки зрения, к которой постоянно возвращаются многие геологи, как альтернативе тектоники плит.

Скорость расширения Земли в более ранние периоды ее существования должна быть не ниже этих оценок, так как количество радиоактивных элементов было более высоким, гравитационная дифференциация — более интенсивной, а теплопроводность пород при более низких абсолютных температурах — пониженной.

Рассмотренный механизм медленного и постепенного расширения Земли основан на хорошо известных физико-химических законах и не требует привлечения каких-либо гипотез (например, допущения изменения во времени гравитационной постоянной).

Неминуемым следствием общего расширения планеты должно быть образование трещин разрыва во внешней жесткой, но хрупкой ее оболочке — литосфере, в ее наиболее слабых по прочности участках. Наглядными моделями такого процесса могут служить разрыв коры деревьев при их росте, образование трещин в коре плодов при их созревании или нагреве, растрескивание корочки при выпекании хлеба, разрушение сосудов высокого давления при превышении предела их прочности, появление трещин в эмали на металлических изделиях при нагревании и т. д.

Аналогичную природу, по всей видимости, имеют линейные структуры, цепочки кратеров, крупные трещины и грабены на изученных планетах солнечной системы и их спутниках (Марс, Венера, Меркурий, Луна и др.).

Однако общее увеличение размера Земли — далеко не единственная причина образования глобальной системы рифтовых трещин. Процессом, ведущим к нарушению целостности литосферной оболочки, может быть деформация поверхности планеты при изменении скорости вращения вследствие гравитационной дифференциации и перераспределения масс в радиальном направлении. Вероятной причиной образования рифтов является и изменение оси вращения Земли за счет как «земных», так и космических факторов. К земным можно отнести перемещение масс на поверхности (например, при крупных оледенениях). Спрединг океанического дна, являющийся, как будет показано далее, следствием рифтогенеза, в свою очередь приводит к перемещениям масс в горизонтальном направлении, что может повлечь измене-

ние направления оси вращения планеты и образование новых глобальных трещин. К космическим факторам поворота оси вращения относится гравитационное взаимодействие с другими космическими телами. «Спусковым крючком» раскрытия трещин могут быть приливные силы.

Принципиальной причиной образования глобальной системы рифтовых трещин Земли являются относительно малая толщина литосферы по сравнению с общим размером планеты (1—2% от радиуса Земли), ее жесткость и хрупкость. При протекании в недрах Земли различных физико-химических процессов, существование которых не вызывает сомнений, а также при гравитационном взаимодействии планеты с космическими объектами земная кора должна испытывать напряжения, приводящие к ее разрыву в ослабленных зонах.

2. Итак, под влиянием одной из рассмотренных выше причин в твердой литосфере Земли образуются глобальные трещины. Развитие трещин — процесс, протекающий весьма быстро (в геологическом масштабе времени); представление о его скорости можно получить по наблюдениям землетрясений.

При напряжениях растяжения трещины зарождаются у границы с пластичным материалом астеносферы и перемещаются в более высокие горизонты литосферы вплоть до поверхности, одновременно они развиваются в латеральном направлении. Трещины образуются в наиболее ослабленных и напряженных участках литосферы, однако их простирание не должно быть прямолинейным, так как на своем пути они встречают более прочные участки и могут их огибать. В рассматриваемой модели изломы по простиранию рифтовых зон являются естественным следствием неоднородности прочности литосферной оболочки.

Образование крупной трещины неминуемо приводит к тому, что пластичный материал астеносферного слоя, по составу отвечающий пиролиту [Рингвуд, 1972] или лерцолиту [Дмитриев, 1973] и содержащий первоначально 2—5% расплава, устремляется в свободный объем, что сопровождается его адиабатической декомпрессией. При этом происходит быстрое возрастание доли расплавленного материала, который в виде легкоплавких дериватов базальтового состава перемещается в верхние горизонты (рис. 2).

Увеличение доли расплава в исходном материале одновременно сопровождается дифференциацией последнего, так как менее

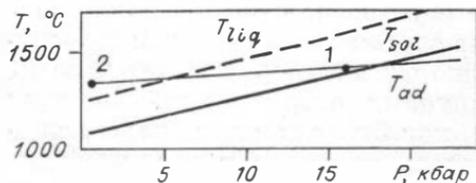


Рис. 2. Схема декомпрессии материала мантии Земли.

T_{sol} — линия солидуса астеносферного материала; T_{liq} — линия ликвидуса базальта; T_{ad} — адиабатическая температура; 1 — начальное положение вещества на P - T -диаграмме; 2 — положение вещества после декомпрессии.

вязкая и более легкая по сравнению с кристаллами жидкая фаза перемещается в высокие горизонты с большей скоростью. В результате создается градиент состава в вертикальном разрезе, что связано с увеличением в нижних горизонтах доли вкрапленников кристаллов минералов с наиболее высокими температурами плавления. Такой динамический процесс разделения по составу исходной породы, который можно назвать **декомпрессионной дифференциацией**, существенно отличается как от кристаллизационной дифференциации *in situ*, так и от фильтр-прессинга (выжимание расплава из гетерогенной смеси) тем, что протекает в резко нестационарных условиях и включает гидродинамические явления и фазовые превращения.

Соотношение долей расплавленного и кристаллического материала в дериватах определяется составом материнской породы и величиной декомпрессии (глубиной заложения трещины).

Дифференциация пород мантии, связанная с декомпрессионным плавлением и динамическим процессом перемещения расплава и кристаллов, является важным фактором образования различных пород основного состава, роль которого до сих пор не учитывалась.

3. Вследствие декомпрессионного плавления, подъема и излияния базальтовых расплавов повышается уровень изотерм в области рифта. Это связано со следующими факторами:

а) В верхние горизонты перемещается с большей скоростью горячий материал верхней мантии. Температура на глубине 100 км составляет 1350—1500°C [Forsyth, 1977; Жарков, 1983]. При адиабатическом снижении давления ее снижение незначительно: по оценке Д. Форсайта, подъем с глубины 100 км приводит к уменьшению температуры от 1365 до 1325°C. Следовательно, температура в верхней части литосферы при образовании базальтовых даек возрастает более чем на 1000°C;

б) При быстром движении гетерогенного по фазовому составу материала верхней мантии по раскрывающейся трещине и в прилегающей зоне астеносферы в область пониженного давления выделяется энергия вязкого трения (U), величина которой пропорциональна квадрату скорости движения (V) и вязкости η : $U = \eta V^2 / H^2$, где H — толщина слоя;

в) Увеличение доли жидкой фазы в материале мантии в результате декомпрессионного плавления приводит к общему снижению вязкости астеносферы в области рифта и значительному возрастанию конвективного переноса тепла из глубин.

Изменение теплопереноса при увеличении доли жидкой фазы в веществе астеносферы можно оценить следующим образом.

Рассмотрим классическую задачу Рэлея — Бенара, следуя В. Н. Жаркову и В. П. Трубицыну [1980].

Слой единичной толщины разбит на конвективные ячейки шириной $\frac{\lambda}{2} = \sqrt{2}$. Свободные граничные условия для двумерной конвекции:

$$z = 0: U_z = \frac{\partial U_x}{\partial z} = 0, \quad \Theta = 1;$$

$$z = 1: U_z = \frac{\partial U_x}{\partial z} = 0, \quad \Theta = 0;$$

$$x = 0, \quad x = \sqrt{2}, \quad U_x = \frac{\partial U_z}{\partial x} = \frac{\partial \Theta}{\partial x} = 0,$$

где U_x и U_z — скорости потока в направлении горизонтальной (x) и вертикальной (z) осей.

Число Рэлея для тепловой конвекции определяется выражением

$$Ra = \frac{\alpha g \Delta T d^3}{\nu \chi},$$

где α — коэффициент теплового расширения; g — ускорение силы тяжести; ΔT — изменение температуры на протяжении слоя; d — толщина слоя; ν — кинематическая вязкость.

Эффективность конвекции измеряется числом Нуссельта Nu (отношение теплового потока к тому потоку, который существовал бы в отсутствие конвекции). Число Нуссельта в размерной и безразмерной форме определяется соотношениями (см. [Жарков, Трубицын, 1980]):

$$\left. \begin{aligned} Nu &= \frac{d}{\chi \Delta T} \left(U_z T - \chi \frac{dT}{dz} \right) \\ Nu &= U_z \Theta - \frac{d\Theta}{dz} \end{aligned} \right\},$$

здесь χ — коэффициент температуропроводности; T — абсолютная температура; Θ — приведенная температура.

Для модели тепловой конвекции с пограничным слоем при больших числах Рэлея и Прандтля ($Pr = \frac{\nu}{\chi}$), развитой Д. Теркоттом и Е. Оксбургом [Turcotte, Oxburgh, 1972], $U_z = 0$ и $Nu = Ra^{1/3}$.

Изменение числа Рэлея при декомпрессионном плавлении определяется в основном изменением вязкости, так как остальные множители в формуле для Ra изменяются лишь на несколько процентов.

Исходная вязкость астеносферы под океанами имеет величину $10^{20} - 10^{21}$ П [Жарков, 1983], вязкость расплавов базальтов при температурах $1200 - 1300^\circ\text{C} \approx 10^3$ П [Справочник..., 1969], таким образом предельное уменьшение вязкости при плавлении может составить 17—18 порядков, а число Нуссельта, характеризующее теплоперенос, при этом может измениться на 5—6 порядков. Ясно, что реальное изменение вязкости вещества меньше, так как доля расплавленного материала снижается с глубиной. Тем не менее приведенные оценки указывают на возможность

чрезвычайно большого увеличения конвективного теплопереноса при частичном декомпрессионном плавлении.

Аналогичные оценки могут быть сделаны и для других моделей конвекции.

В. Н. Жарковым и В. П. Трубицыным [1980] рассмотрен случай, когда задана не разность температур на границах слоя, а тепловой поток на нижней границе. Граничные условия для скоростей при этом прежние, а для температуры они записываются в виде

$$\left. \begin{aligned} z = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial z} &= -\frac{q}{\kappa} \\ z = 1, \quad T &= 0 \end{aligned} \right\},$$

где q — фиксированный тепловой поток через нижнюю границу слоя; κ — коэффициент теплопроводности.

Если в формуле для числа Рэлея ΔT заменить на $\frac{qd}{\kappa}$, то все выведенные уравнения сохраняют свой вид, но вместо Ra в них войдет безразмерный параметр Rq :

$$Rq = \frac{g\alpha d^4 q}{\nu\chi^2 \rho_a c_p},$$

где ρ_a — плотность; c_p — теплоемкость при постоянном давлении.

Граничные условия для температуры имеют вид

$$\left. \begin{aligned} z = 0, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial z} &= -1 \\ z = 1, \quad \Theta &= 0 \end{aligned} \right\}.$$

Эффективность конвекции для этого случая характеризуется не изменением теплового потока, а изменением разницы температур между нижней и верхней границами слоя. Модифицированное число Нуссельта M при этом определяется соотношением

$$M = \frac{qd}{\kappa \Delta T}.$$

Число M — отношение разности температур между границами, необходимой для поддержания данного теплового потока в отсутствие конвекции, к существующей разности температур. Если Rq велико, т. е. пограничный слой достаточно развит, то

$$M = Rq^{1/4}.$$

Как и для задачи Рэлея — Бенара, Rq при увеличении доли жидкой фазы в материале изменяется за счет значительного уменьшения вязкости.

В пределе при полном плавлении пород число M , характеризующее интенсивность теплопереноса и вертикальный градиент температуры, может измениться на 4 порядка. Для реального

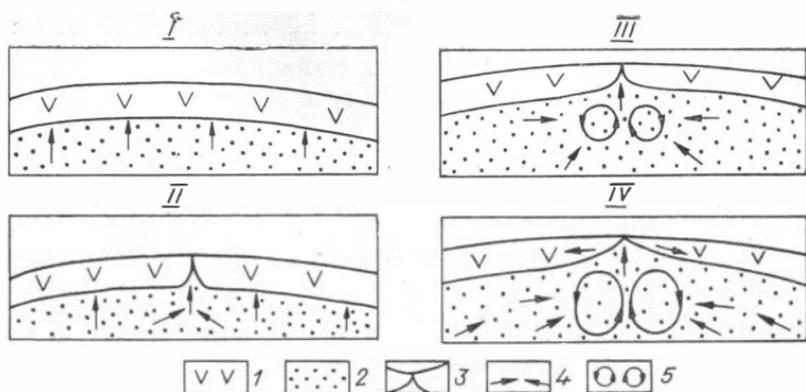


Рис. 3. Схема образования океанической рифтовой зоны.

I — исходное состояние: в результате увеличения объема мантии и взаимодействия Земли с другими космическими телами литосфера испытывает глобальные напряжения; II — разрыв литосферы под действием растягивающих напряжений, вещество астеносферы испытывает декомпрессионное плавление и устремляется в зону пониженного давления — рифтовую трещину; III — усиление конвективного теплопереноса в мантии под рифтовой зоной в результате увеличения доли жидкой фазы, что приводит к подъему верхней границы астеносферы в этой зоне; IV — сползание литосферных плит с астеносферных поднятий, выплавление новых порций базальтов при декомпрессии астеносферного материала, дальнейшее развитие тепловой конвекции, установление стационарного режима в рифтовой зоне.

1 — литосфера; 2 — астеносфера; 3 — рифтовая трещина; 4 — направление движений материала асте- и литосферы; 5 — конвективные течения.

случая частичного плавления преимущественно в верхних горизонтах астеносферы это изменение, конечно, существенно меньше, но возможность повышения верхней границы астеносферы за счет декомпрессионного плавления несомненна.

Аналогично можно продемонстрировать этот эффект и для конвекции с учетом внутреннего подогрева за счет радиоактивных источников и при горизонтальном градиенте температур.

г) Базальтовый расплав, находящийся вблизи поверхности Земли, постепенно кристаллизуется, выделяя значительную тепловую энергию (≈ 100 ккал/кг), что обеспечивает длительное сохранение повышенного теплового потока в рифтовой зоне.

Все перечисленные факторы в сумме приводят к значительному увеличению теплового потока, повышению положения изотерм в рифтовой зоне, образованию латеральных неоднородностей уровня астеносферы вкrest простирающихся рифтовых зон.

Принципиальная схема образования рифтовой зоны приведена на рис. 3.

В настоящее время созданы количественные модели строения литосферы в океанических областях, позволяющие рассчитать изменение толщины литосферных плит, уменьшение высот рельефа дна океана и величину теплового потока по мере удаления от рифтового хребта [Parker, Oldenburgh, 1973; Сорохтин, 1974; Davies, Lister, 1974; Lubimova, Nikitina, 1975]. Было показано, что толщина плит прямо пропорциональна $\sqrt{\tau}$ (квадратный корень абсолютного возраста коры), а уровень рельефа обратно пропорционален $\sqrt{\tau}$, что подтверждено при прямых геофизических изме-

рениях толщин литосферы в Тихом океане [Yoshii, 1973]. Такая зависимость, следующая из решения задачи остывания полупространства, хорошо выполняется до возраста 50 млн. лет. Отклонения от этих функций для более древних участков дна объясняются конвекцией в астеносфере [Копо, Yoshii, 1975], выделением энергии вязкого трения [Schubert e. a., 1975] и радиоактивным распадом [Forsyth, 1977].

4. *Более высокий уровень верхней границы астеносферы под рифтом и его постепенное снижение по мере удаления, связанное с остыванием, являются причиной возникновения латеральных сил в литосферной плите, направленных от рифтовой зоны.* Величину этих сил можно оценить исходя из высоты рифтовых хребтов над дном океана. По расчетам В. Якоби [Jacoby, 1970] и Ф. Рихтера [Richter, 1977], они составляют $\approx n \cdot 10^{15}$ дин/см⁻¹ (0,0n ГПа).

Таким образом, в рассматриваемой модели при общем растяжении литосферы большая ее часть находится в состоянии сжатия, и тем самым решается один из парадоксов, объясняемый некоторыми авторами [Кропоткин, 1973; и др.] пульсациями размера Земли.

Напряжения сжатия в литосфере определяют потенциальную возможность ее сколов. Прочность монолитных кристаллических пород на сжатие ($\approx 0, n$ ГПа) выше, чем рассмотренные горизонтальные силы от рифтовых хребтов, однако сколы в литосферной плите образуются по следующим причинам:

а) литосферная оболочка неоднородна: наряду с монолитными участками существуют механически ослабленные зоны;

б) масштабный фактор значительно уменьшает прочность пород, особенно при длительных нагрузках;

в) протяженность участка потенциального скола может быть в несколько раз меньше, чем рифтовой зоны, что приводит к многократному возрастанию напряжений, действующих от рифтового хребта (данный эффект аналогичен хорошо известному в технике высоким давлений принципу мультипликации усилия за счет уменьшения площади приложения давления);

г) вследствие оттока части материала астеносферы в область рифта дополнительно к горизонтальным силам сжатия возникает вертикальная сила изостатически нескомпенсированного веса плиты. Равнодействующая двух этих сил направлена по правилу сложения векторов под углом к горизонту и вызывает скол литосферной плиты.

Местами сколов должны быть в первую очередь границы океанической и континентальной коры. Действительно, океаническая литосфера может испытывать большие вертикальные опускания, обусловленные ее остыванием и оттоком материала подстилающей астеносферы. Пониженная плотность континентальной коры и очень слабо развитый слой астеносферы под ней значительно уменьшают возможность опускания континентальной литосферы по сравнению с океанической. Результатом должны быть появления значительных градиентов вертикальных сил и образование на

этих границах сколов — хорошо известных сейсмофокальных зон. Реже такие сколы возникают в тонкой океанической коре. Образование наклонных трещин в континентальной коре также возможно, но взаимные перемещения частей плиты по сколу в этом случае крайне ограничены из-за трудностей субдукции мощного сиалического слоя. Итак, преимущественная приуроченность зон Бенюфа к границам океанов и континентов имеет с точки зрения данных представлений естественное объяснение.

5. *Под действием горизонтальных сил, направленных от рифтовых хребтов, океаническая плита перемещается к зоне скола, где, встречая сопротивление другой плиты (обычно имеющей континентальную часть), претерпевает изгиб.* Как отмечалось выше, значительная деформация изгиба плиты должна приводить к образованию в ней трещин, перпендикулярных к плоскости скольжения и параллельных линии простирания трещин скола. Преодолевая сопротивление на своем торце, океаническая плита, часто расколота на отдельные фрагменты, погружается в астеносферу. Процессу погружения способствуют ее более низкая температура по сравнению с окружающими участками верхней мантии и повышение уровня фазовых границ перехода базальта в эклогит, оливина в шпинель и других, о чем уже говорилось выше. Погружение плиты вызывает появление избыточного давления в астеносфере и возвратный поток материала в ней, направленный к области рифта. Более подробно этот вопрос будет рассмотрен в разделе «Механизм субдукции литосферных плит и происхождение окраинных бассейнов».

6. *В рамках рассматриваемого механизма находят простое объяснение образование океанических впадин и их углубление с возрастом.* Действительно, постоянно идущий процесс изливания базальтов и наращивания новой океанической коры в рифтовых зонах требует непрерывного подтока материала астеносферы в область рифта. Для сохранения изостатического равновесия литосфера должна опускаться, чему способствуют также ее остывание со временем и накопление осадков. Процесс постепенного понижения уровня рельефа распространяется и на прилегающие пассивные континентальные окраины, что приводит к погружению типичной континентальной коры ниже уровня моря с образованием областей шельфа и мелководных морей типа Балтийского. Отсюда следует, что находки кислых магматических и метаморфических пород на дне океанов, рассматриваемые некоторыми исследователями как опровержение концепции тектоники плит, объясняются исходя из предлагаемого механизма тектогенеза.

Таким образом, рассмотренный механизм предполагает существование общего круговорота материала, сопряженного с фазовыми переходами: частичное плавление материала астеносферы при адиабатической декомпрессии, его кристаллизацию в зонах спрединга, горизонтальное перемещение литосферных плит от рифта за счет соскальзывания плиты с астеносферных поднятий, опускание плит в мантию в сейсмофокальных зонах, сопровождающееся

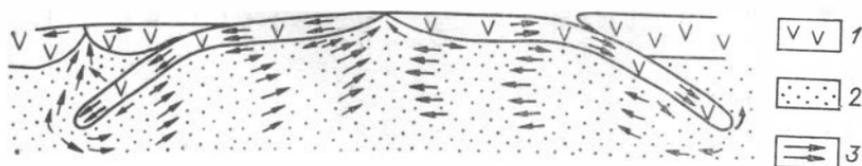


Рис. 4. Схема круговорота вещества в верхних оболочках Земли.

1 — литосфера; 2 — астеносфера; 3 — направление движения материала.

Стрелками показаны векторы движения материала лито- и астеносферы. Слева — ситуация в западной части Тихого океана с крайними морями, справа — активная окраина андийского типа, в центре — рифтовая зона. Соотношение вертикального и горизонтального масштабов не соблюдено.

полиморфными переходами и частичным плавлением пород, и обратный поток пластичного материала к рифту, сосредоточенный преимущественно в астеносфере (рис. 4).

Общий баланс всех сил, действующих на плиты, проанализирован в работах [Jacoby, 1970; Forsyth, Ueda, 1975; Solomon e. a., 1975; Harper, 1975; Schubert e. a., 1976; Richter, 1977; и др.]. Результаты доказывают, что силы гравитационного соскальзывания с астеносферных поднятий под рифтами и отрицательной плавучести погружающихся краев океанических плит достаточны для преодоления вязкого сопротивления плит на границе с астеносферой и в их погружающихся участках. При этом обеспечиваются наблюдаемые скорости и направления перемещения плит, а распределение в них напряжений соответствует фактически измеренным.

Еще раз подчеркнем, что в названных работах авторы исходили из уже сформированных глобальных геологических структур и не рассматривали по существу их происхождение и эволюцию. Показательно, что, решая термомеханические задачи, различные исследователи основывались на совершенно различных представлениях о генезисе структур.

В табл. 2 сопоставляются объяснения глобальных геологических процессов по предлагаемому механизму и другим моделям.

В рассмотренной концепции, впервые сформулированной автором на Международном симпозиуме по рифтовым зонам Земли в 1975 г., еще до появления основных работ с термомеханическими расчетами [Киркинский, 1975, 1977], главное внимание уделено физико-химическому механизму тектонических движений образования глобальных геологических структур планеты. Все независимо проведенные расчеты полностью согласуются с основными положениями предложенного механизма тектогенеза и могут рассматриваться как дополнительные количественные доказательства его справедливости.

Сопоставление объяснений геологических процессов с помощью различных предполагаемых механизмов тектогенеза

Геологический процесс	Термическая и химико-плотностная конвекция во всей мантии	Термическая конвекция, сосредоточенная преимущественно в астеносфере	Предлагаемый механизм
Заложение глобальной системы рифтов	Образование трещин в своде над потоком горячего материала из нижней мантии за счет сверхдиабатической разности температур или всплытия легкого материала после дифференциации от границы с ядром	Образование трещин в литосфере под действием конвективных течений в мантии и (или) погружения краев плит в сейсмофокальных зонах	Образование трещин под действием глобальных напряжений в литосфере за счет общего небольшого расширения планеты, а также изменения ее формы, оси и скорости вращения
Излияние базальтов в рифтовых зонах	Поступления мантийного материала к поверхности через трещины в литосфере в сводовой части над диапиром	а) Заполнение мантийным материалом пространства между раздвигающимися литосферными плитами б) Активный диапир создает подпятия в астеносфере	Декомпрессионное плавление астеносферного материала, заполнение глобальных разломов легкоплавкими дериватами мантийного материала
Образование срединно-океанических хребтов, повышенный тепловой поток в рифтовой зоне	Подъем горячего материала из нижней мантии	Поступление горячего материала астеносферы к поверхности зоны	Повышение локальной термоконвекции в астеносферной области, примыкающей к рифтовой зоне, перемещение легкоплавкого материала астеносферы к поверхности
Образование сейсмофокальных зон	а) Нисходящий конвективный поток охлажденного материала	Края плит обладают отрицательной плавучестью: тонут в	Сколы в литосферных плитах образуются под

	ла увлекает плиты вглубь б) Край плиты тонет в «аномальной» (разогретой и легкой) мантии [по Артюшкову, 1979]	мантии и увлекают за собой плиты	действием горизонтальных напряжений, возникающих за счет гравитационного сползания плит с астеносферных поднятий вблизи рифтовых зон
Перемещение плит	Волочение плит потоками астеносферного материала	Тонущие в сейсмофокальных зонах края плит увлекают плиты за собой, дополнительная сила создается за счет срединно-океанических хребтов	Гравитационное сползание плит с астеносферных поднятий, субдукции плит способствует большой плотности погруженной части плиты
Углубление дна океана с возрастом	Остывание плит	Остывание плит	Подток астеносферного материала в зону пониженного давления под рифтами, поддерживающийся за счет соскальзывания плит и декомпрессии
Круговорот материала	а) Одна, две или несколько конвективных ячеек, охватывающих всю мантию до ядра б) Нисходящий поток материала не локализован в отдельных регионах [по Артюшкову, 1979]	Термическая конвекция с пограничными слоями (верхний пограничный слой — литосферная плита)	Круговорот материала, внешне напоминающий термическую конвекцию
Перестройка системы движений плит	Смена эпох одноячейстой и двухъячейстой структур	а) Появление новых областей перегрева в мантии б) Появление новых зон погружения	Образование новых трещин в литосфере под действием глобальных напряжений

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ РИФТОВ

Рифтовые зоны на континентах описаны еще в конце прошлого столетия и названы грабенами [Suess, 1885] или рифтовыми долинами [Gregory, 1894]. В Международном тектоническом словаре [1979] дано следующее определение: «Рифт — впадина в рельефе регионального или глобального протяжения, образовавшаяся в результате заметного опускания вдоль сбросов примерно параллельного простирания, с которой связана сейсмическая и обычно вулканическая деятельность».

Благодаря своей доступности эти структуры интенсивно изучались, особенно в последние два десятилетия: проведено несколько международных конференций, посвященных континентальным рифтам, опубликованы оригинальные работы и составлена достаточно полная библиография по этой проблеме (см. [Основные проблемы..., 1977; Mechanism..., 1981; Континентальный рифтогенез, 1977; Processes..., 1983]).

Ряд обзорных статей приведен в окончательном отчете 4-й рабочей группы Международного геодинамического проекта «Геодинамика континентальных и океанических рифтов» под редакцией Г. Паульмаса [Continental..., 1982]. Отдельные тома посвящены таким важным континентальным рифтам, как Байкальский [Geodynamics..., 1978], Восточно-Африканская рифтовая система [Baker et al., 1972; East African..., 1972], Рейнский грабен [Approaches..., 1975] и др. Вышли в свет две обобщающие монографии Е. Е. Милановского [1976, 1983] по геологии рифтовых зон на континентах.

К 27-му Международному геологическому конгрессу опубликован обзор И. Рамберга и П. Моргана [1984], а также несколько докладов [Милановский, 1984; Логачев, Зорин, 1984; и др.]. Минеральные месторождения, связанные с рифтами, рассмотрены в недавно переведенной книге А. Митчела и М. Гарсона [1984].

Несмотря на обилие фактического материала по геологии современных и древних рифтов, вопросы генезиса этих структур и общие закономерности их развития являются предметом острой дискуссии. В обзорном докладе на 27-м Геологическом конгрессе И. Рамберг и П. Морган [1984, с. 78—79] нерешенными назвали следующие вопросы: «...почему одни рифты прекращают свое развитие, тогда как другие продолжают его вплоть до полного разрыва континентов? Почему одни рифты отличаются высокой магматической активностью, тогда как другие оказываются „сухими“? Следуют ли рифты некоторым прогнозируемым направлениям эволюции, каковы необходимые и ограничивающие рифтогенез факторы и т. д.?»

Представления о происхождении рифтов, несмотря на некоторые различия взглядов отдельных исследователей, можно описать двумя моделями: активного и пассивного рифтогенеза.

Модель активного рифтогенеза описана в ряде работ [Артемьев, Артюшков, 1968; Ramberg, 1971; Белоусов, 1975; Sengör, Burke, 1978; Артюшков, 1979; Zorin, 1981; Bott, 1981; Логачев, Зорин, 1984; и др.]. Согласно этой модели, причиной зарождения рифтов является подъем горячего материала мантии из глубин к границе с жесткой литосферой в восходящем потоке при термической конвекции или при всплывании легкого материала, претерпевшего гравитационную дифференциацию. Наличие аномально легкого и прогретого материала приводит к образованию свода в литосфере и утонению последней. При растекании диапира в стороны и гравитационном сползании литосферы с астеносферного выступа образуются сбросы и формируется центральный грабен — рифтовая долина. Этот процесс сопровождается внедрением даек и эффузивными излияниями преимущественно базальтового состава. Длительность развития рифта определяется временем существования восходящего потока из нижней мантии. После того как этот поток прекращает свое действие, материал охлаждается и наблюдается общее снижение уровня поверхности.

Описанный механизм был первой достаточно четко сформулированной физической моделью рифтогенеза и до сих пор наиболее популярен среди геологов.

Модель пассивного континентального рифтогенеза активно разрабатывалась сторонниками гипотезы расширения Земли [Cagey, 1978; Проблемы..., 1984]. По их представлениям, рифты образуются вследствие разрыва литосферной оболочки за счет увеличения объема земного шара.

Как отмечалось выше, одним из постулатов тектоники плит является приблизительное постоянство радиуса Земли во времени, поэтому вместо названной причины образования рифтовых трещин предполагаются региональные поля напряжений в литосфере, возникающие под действием конвективных потоков в мантии (см., например, [Burke, 1977; Baker, Morgan, 1981; Morgan, Baker, 1983; Рамберг, Морган, 1984]). Повышение теплового потока объясняется поступлением горячего материала в рифтовую трещину.

Каждая из двух описанных выше моделей объясняет существенные черты строения и развития рифтовых зон, но имеет некоторые слабые стороны.

Главным противоречием модели активного рифтогенеза является несоответствие линейных рифтов и обычно изометричной формы диапиров. Столь же трудно объяснить коленчатый в плане рисунок, характерный для многих рифтов. Не согласуются с этой моделью широкое развитие «сухих» рифтов (т. е. с очень бедными проявлениями магматизма), а также щелочной состав вулканитов и миграция магматической активности от периферии к осевой части рифтовой зоны. Было показано также, что только растягивающими напряжениями, вызванными ростом термального свода, нельзя объяснить наблюдаемое расширение рифтов [Mulugeta, 1982, цит. по: Рамберг, Морган, 1984].

Ограниченность модели пассивного континентального рифтогенеза проявляется в том случае, если образование трещин разрыва в литосфере связывается непосредственно с растеканием восходящих потоков из глубин мантии. Для такого механизма присущи все противоречия, указанные для модели активного рифтогенеза.

В соответствии с рассмотренной в предыдущем разделе концепцией глобального тектогенеза ниже будет описан механизм образования и развития континентальных рифтов, являющийся новым вариантом модели пассивного рифтогенеза.

1. Заложение рифтовых зон на континентах обусловлено глобальными и региональными напряжениями в литосфере, реализующимися в виде глубинных разломов в наиболее ослабленных ее участках и достигающих глубины астеносферы.

Причинами глобальных напряжений литосферы являются: общее медленное увеличение объема Земли вследствие гравитационного перераспределения химических компонентов и формирования ядра, а также термического расширения и смещения фазовых границ в мантии при разогреве;

изменение формы планеты и положения оси вращения в результате перераспределения материала в глубинах и на поверхности, а также гравитационного воздействия других космических тел.

Проявление глобальных напряжений на континентах более характерно для эпох их объединения в крупные материки — мегаконтиненты.

Значительно разнообразнее причины региональных напряжений в литосферных плитах:

трансформные разломы при их продолжениях на континентах; столкновения континентальных участков литосферных плит, вызывающие интенсивную орогению и поле напряжений в прилегающих участках континентов;

градиенты скоростей перемещения в литосферных плитах, обусловленные различным сопротивлением в их фронтальных частях и на границе с астеносферой;

напряжения вдвигаемых плит вблизи зон субдукции; перестройка поля напряжений при образовании новых океанических рифтов и смене направлений движения плит;

изменение соотношений вертикальных нагрузок в краевых прогибах вследствие денудации континентальных участков и интенсивного накопления осадков в прилегающих океанических областях;

латеральные потоки астеносферного материала и т. д.

Исходя из природы глубинных разломов, можно классифицировать континентальные рифты, однако выявление истинных причин разломов — обычно очень трудная задача.

Конкретное положение разломов определяется соотношением поля напряжений и механической прочности участков литосферы. В зависимости от тензора напряжений в жесткой литосфере дизь-

юнктивные нарушения имеют характер сброса, сбрососдвига, сдвига, надвига, трещины отрыва и т. д.

2. Образование крупного разлома в континентальной литосфере, зарождающегося на границе с пластичным материалом астеносферы, приводит к декомпрессии, что влечет за собой частичное плавление пород, находящихся вблизи точки солидуса. Легкоплавкие дериваты астеносферного материала преимущественно базальтового состава устремляются в зону трещиноватости, образуя дайки, интрузии, а нередко и вулканические эффузивы. Магматические проявления в континентальных рифтах очевидно интенсивнее, если образовались трещины отрыва, и значительно слабее в случаях чистого сдвига.

3. Перемещение горячего материала глубин в более высокие горизонты, выделение энергии вязкого трения и кристаллизации базальтов приводят к разогреву рифтовой зоны. Следствием декомпрессионного плавления материала астеносферы являются значительное снижение ее вязкости и увеличение конвективного переноса в участках астеносферы, прилегающих к рифту (см. расчеты в предыдущем разделе). Все эти факторы приводят к увеличению теплового потока в рифтовой зоне и повышению изотерм и верхней границы астеносферы в этой области. Уровень поверхности в области, прилегающей к рифту, повышается — образуются «термические» горы.

4. Перемещение астеносферного материала в зону пониженного давления области рифта влечет за собой общее опускание поверхности на флангах рифтовой зоны. Таким образом формируется контрастный рельеф: рифтовая долина (грабен) — термические горы — краевые прогибы. Пониженные участки заполняются осадками за счет разрушения гор, что приводит к их дальнейшему опусканию. Это обуславливает характерное гравитационное поле — широкую, с длиной волны порядка 1000 км отрицательную аномалию в редукции Буге с центральным седловидным максимумом шириной ≈ 100 км, осевой минимум последнего отвечает рифтовой долине.

5. Повышение кровли астеносферы под рифтовой зоной вызывает появление сил, направленных от рифта вкrest его простираения за счет гравитационной неустойчивости плит. Это способствует дальнейшему раскрытию рифта, так как силы действуют в том же направлении, что и растягивающие напряжения в данном участке литосферы. Силы, возникающие при соскальзывании плит с региональных астеносферных поднятий континентальных рифтовых зон, как правило, недостаточны для того, чтобы перемещать литосферные плиты с большими континентальными участками на значительные расстояния. Более вероятны локальные перемещения материала за счет деформации пород и образование зон скола и поддвига на флангах рифтовых зон.

6. Ввиду ограниченности перемещений литосферных блоков вблизи континентальных рифтов длительность развития последних определяется в основном временем существования тепловой

аномалии, возникшей вследствие образования рифта, и, как правило, составляет десятки миллионов лет. С остыванием внедрившихся интрузивных пород и ослаблением термоконвекции уровень поверхности постепенно понижается, а рельеф выравнивается. В результате охлаждения напряжения растяжения в земной коре сменяются на сжимающие, что может приводить к взбросам (часто по плоскостям ранее образованных сбросов), а также к деформации и складкообразованию. В рифтовой долине и в краевых прогибах на флангах рифтовой зоны накапливаются мощные толщи осадков. В заключительной стадии развития рифта уровень поверхности становится более низким в сравнении с первоначальным, так как из-за общего растяжения данного участка средняя толщина литосферы понижена, а интенсивный конвективный теплоперенос в этой области привел к более интенсивному охлаждению нижележащих участков мантии и отрицательной термической аномалии. Важным следствием этого является формирование синеклиз с их мощными пачками осадков над закончившимися свой цикл развития рифтовыми зонами.

Описанный выше механизм дает идеальную обобщенную модель образования и развития континентальных рифтовых зон. В конкретных случаях из-за особенностей геологического строения и различной природы глубинного разлома будет проявляться своя специфика. Так, возможно повторное и даже многократное раскрытие рифта после периода относительного покоя, как это имеет место, например, в грабене Осло [Ramberg, Larsen, 1978] и грабене Хорн в Северном море [Рамберг, Морган, 1984]. Это значительно усложняет историю развития данных структур.

На основе геологических и структурных критериев могут быть построены классификации рифтов (см., например, [Milanovsky, 1972, 1983; Burke, 1977]).

Описанный механизм происхождения континентальных рифтов принципиально отличается от модели активного рифтогенеза тем, что повышение теплового потока и образование рифтового грабена не связываются с подъемом диапира из мантии и его растеканием, а наоборот — глубинный рифтовый разлом, образовавшийся вследствие реализации глобальных и региональных напряжений в литосфере, — причина длительно существующей положительной термической аномалии в рифтовой зоне.

Не отрицая возможности образования отдельных рифтов благодаря подъему диапиров, автор считает, что геологи преувеличивают значение такого «активного» пути, и подавляющее большинство рифтов образуется по рассмотренному выше механизму.

Предложенный механизм существенно отличается и от обычно принимаемой модели пассивного рифтогенеза.

1. Образование глубинного разлома на континентах связывается не только с региональными, но и с глобальными напряжениями.

2. Рифтовые зоны могут формироваться при напряжениях растяжения и при глубинных сколах, сдвигах и сбрососдвигах.

3. Причиной повышенного теплового потока в современных рифтах является не только поступление горячего материала в область разлома, но и значительное усиление термической конвекции за счет увеличения доли жидкой фазы при декомпрессионном плавлении.

4. Расширение рифтов обусловлено как региональным растяжением литосферы, так и сползанием ее блоков с астеносферных сводов под рифтовыми зонами.

5. Инверсия напряжений в заключительную стадию развития рифтов объясняется не сменой знака регионального поля напряжений, а охлаждением термической аномалии, возникшей благодаря рифту.

Рассмотренный механизм согласуется с основными особенностями геологического строения и развития современных и древних континентальных рифтовых зон.

По сравнению с моделью активного рифтогенеза он лучше объясняет следующие факты: прогибание земной коры, предшествующее заложению рифтовых грабенов; пространственную приуроченность рифтов к механически ослабленным участкам литосферы; линейное (нередко с изломами) простираение и большую протяженность рифтов; широкое развитие рифтов с бедным магматизмом; складкообразование и взбросы на заключительной стадии развития рифтов; формирование синеклиз после завершения цикла развития рифтов; щелочной характер магматизма большинства континентальных рифтов, свидетельствующий о значительных глубинах зарождения магм.

Предложенный механизм лучше, чем модель растяжения земной коры и пассивного заполнения образовавшихся трещин магматическим материалом, согласуется с разнообразием геологического положения и историей развития рифтов; рифтогенезом на материках, находящихся преимущественно в условиях горизонтального сжатия; пространственной связью некоторых рифтов с орогенными поясами; ограниченностью рифтов по длине; наличием рифтовых зон со слабыми проявлениями магматизма; инверсией напряжений от растягивающих к сжимающим на заключительных стадиях развития.

МЕХАНИЗМ СУБДУКЦИИ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ И ПРОИСХОЖДЕНИЕ ОКРАИННЫХ БАССЕЙНОВ

Проблема происхождения краевых морей — характерной черты строения западной окраины Тихого океана — привлекает внимание многих исследователей.

Первые представления об их генезисе связаны с идеей погружения континентальных масс [Купел, 1935]. В качестве механизмов такого погружения предлагались: подкоровая эрозия [Lawson, 1932], орогеническое сжатие и коробление коры [Umbgrove, 1947] и океанизация континентальной коры [Белюсов,

1975]. С. Кэри [Carey, 1978] связывает образование окраинных бассейнов с общим растяжением коры, обусловленным увеличением размера Земли («ромбочазмы» — по его терминологии). А. Лоусон [Lawson, 1932] и Р. Диц [Dietz, 1954] рассматривали краевые бассейны как часть океанической коры, выделенную образовавшейся позже островной дугой.

В ранних мобилистских построениях А. Вегенер [Wegener, 1922] считал краевые бассейны следствием растяжения сиалической коры позади движущегося континента. Активные геофизические исследования, начавшиеся в 60-е годы, и становление концепции тектоники плит активизировали попытки выяснить природу этих структур.

Результаты геологических и геофизических исследований последних двух десятилетий изложены во многих работах (см., например, [Украины..., 1970; Кариг, 1974; Паккэм, Фалви, 1974; Хаин, 1973; Гнибиденко, 1979; Уеда, 1980; Гнибиденко, Хведчук, 1984; Хэйс, 1984; Шараськин, 1984; и др.]).

Появились веские доказательства того, что дно большинства краевых морей возникло в результате рифтинга [Murauchi, Den, 1966; Rodolfo, 1969; Van der Linden, 1969; Falvey, Talwani, 1969]. Это обстоятельство, казалось, противоречит основным постулатам тектоники плит, согласно которым области сейсмофокальных зон отвечают условиям сжатия плит, а не их растяжению и спредингу. С целью преодоления этого противоречия был выдвинут ряд гипотез.

I. Вторичные конвекционные ячейки [Holmes, 1965; Ueda, Vacquier, 1968]. Предполагается, что материал астеносферы над погружающейся в зоне Беньофа плитой увлекается вниз и создает малую конвективную ячейку, над восходящей ветвью которой кора растягивается. В тылу островной дуги образуется рифтовая зона, сопровождаемая спредингом.

В качестве главных возражений против такого механизма указывались: малая мощность астеносферы под континентальной литосферой (что препятствует образованию крупной конвективной ячейки), трудность сохранения пластичного материала в условиях бокового сжатия на границе плит, приуроченность зон рифтинга и высоких тепловых потоков непосредственно к тыловой части островной дуги, т. е. к области, где, согласно этой гипотезе, должен быть нисходящий, а не восходящий поток материала.

II. Вулканизм и интрузии магм в результате деформационного разогрева в зоне Беньофа [McKenzie, Sclater, 1968; McKenzie, 1969]. Деформационный разогрев проявляется в островной дуге на сравнительно небольших глубинах и, вероятно, имеет отношение к вулканическим проявлениям. Однако, как справедливо отмечает Д. Кариг [1974], сжижающиеся напряжения и связанные с ними деформации не могут проявляться на небольших глубинах вдали от зоны Беньофа, поскольку во фронтальной дуге и за ней фиксируются условия растяжения. На больших глубинах в условиях

высоких температур и давлений вещество становится пластичным и эффект деформационного разогрева должен быть мал.

III. Диапировая модель [Oxburgh, Turcotte, 1970; Кариг, 1974; Паккэм, Фалви, 1974]. Эта модель впервые предложена для объяснения высокого теплового потока окраинных бассейнов Е. Оксбургом и Д. Теркотом [Oxburgh, Turcott, 1970], допускаящими в качестве рабочей гипотезы существование перидотитового диапира. Модель подробно проанализирована Д. Каригом [1974] с учетом накопленного к тому времени геологического и геофизического материала. Растяжение коры позади островных дуг, по его мнению, является отражением активной инъекции вещества, а не пассивным следствием изменения конфигурации зоны Беньофа. Дж. Паккэм и Д. Фалви [1974] также независимо пришли к выводу о том, что в ходе активной фазы развития окраинного моря размягченная мантия (пиролит с выплавками базальта, выполняющими интерстиции) поднимается позади зоны Беньофа. Они предположили, что окраинные бассейны возникли как одна из форм перестройки и приспособления к новому полю напряжений, связанному с прекращением погружения между Индией и Евразией в результате столкновения этих континентов. При такой перестройке мантийный материал двигался к внешнему краю Евразийской плиты, что и привело к образованию окраинных морей вдоль западного побережья Тихого океана.

Диапировая модель хорошо объясняет высокий тепловой поток и небольшие положительные гравитационные аномалии в краевых морях. Она была принята многими геологами.

Наиболее уязвимое место этой модели — существование пластичного материала диапира в условиях больших горизонтальных сжимающих напряжений в областях сближения двух плит, на что обратили внимание Л. И. Лобковский и О. Г. Сорохтин [1979]. Они считают, что «под действием горизонтальных напряжений эффективно жидкое вещество диапира будет просто раздавлено и выдавлено на поверхность и под литосферу как паста из тубика, а разъединенные прежде фрагменты жесткой плиты вновь сомкнутся, приблизив островную дугу к континентальной окраине и сократив тем самым площадь краевого моря» [с. 190]. Происхождение окраинных морей объясняется авторами либо процессами сближения и столкновения друг с другом эшелонированных островодужных структур, в тылу которых при этом сохраняются реликтовые участки океанского дна, либо процессом образования новых островных дуг, «отшнуровывающих» прилегающие к континентам акватории океана; предполагается также возникновение под островной дугой и окраинным бассейном вторичной наведенной конвекции*.

* Эти представления близки взглядам А. Лоусона и Р. Дитца [Lawson, 1932; Dietz, 1954], с одной стороны, и А. Холмса, С. Уеды и В. В. Вакье [Holmes, 1965; Ueda, Vacquier, 1968] — с другой.

Эту модель трудно согласовать с молодым третичным возрастом большинства окраинных морей западной части Тихого океана и меньшей мощностью коры по сравнению с прилегающими участками океанической плиты.

Оригинальная гипотеза происхождения краевых морей выдвинута Л. П. Зоненшайном и Л. А. Савостиным [1979], предположившими, что *зоны субдукции практически неподвижны относительно движений плит*, так как погружающаяся плита как бы «заякоривается». Рассматривая дифференциальное движение литосферных плит относительно этих зон, они различают три возможных варианта:

1) нависающая (обычно континентальная) плита надвигается на границу поглощения, при этом образуется активная континентальная окраина андийского типа;

2) нависающая плита отодвигается от границы поглощения, в этом случае возникают условия растяжения и создаются окраинные моря;

3) взаимодействующие плиты скользят вдоль границы поглощения.

Образование окраинных морей западной части Тихого океана объясняется движением Евразийской плиты на запад относительно неподвижной зоны Бенъофа, что приводит к спредингу в тылу островных дуг.

Однако гипотеза Л. П. Зоненшайна и Л. А. Савостина вызывает серьезные возражения.

1. Движущим механизмом перемещения плит авторы считают конвективные потоки, охватывающие всю мантию; их нисходящие части заволакивают плиты в сейсмофокальных зонах. Выше при обсуждении моделей глобального тектогенеза было показано, что этот механизм по ряду причин неприемлем.

2. Допуская, что плиты перемещаются под действием потоков в мантии, трудно представить, что очень узкие области субдукции более консервативны по относительным движениям, чем огромные континентальные плиты (например, Евразийская), астеносферный слой под которыми развит сравнительно слабо.

3. С точки зрения предложенного механизма не ясно, почему краевые моря стали формироваться только с третичного времени, хотя основные направления движений плит были сходными в мезозое.

4. Как отмечают Б. В. Баранов и Л. П. Зоненшайн [1981], гипотеза дифференциальных движений нависающей плиты относительно заякоренной в мантии зоны субдукции не может объяснить быструю смену режимов спрединга в краевых бассейнах, поскольку в этом случае необходимо допускать резкие изменения скорости пододвигаемой плиты или направлений относительных движений плит.

В работе П. Молнара и Т. Атвотера [Molnar, Atwater, 1978] выдвинута еще одна модель, объясняющая происхождение окраинных бассейнов: *миграция дуги в сторону океана за счет погру-*

жения древней и холодной литосферы под собственным весом в мантию.

Эта модель, во-первых, противоречит фундаментальному факту изостатической уравновешенности плит на астеносфере и, во-вторых, совершенно не может объяснить быструю в геологических масштабах времени смену режимов спрединга в краевых морях.

Таким образом, несмотря на большое число гипотез, проблема происхождения окраинных бассейнов пока не получила удовлетворительного решения.

Предлагаемая ниже модель соответствует общему механизму глобального тектогенеза.

Согласно этому механизму, сейсмофокальная зона образуется в результате скола и заталкивания одной из плит под действием гравитационного сползания последней с астеносферных поднятий под рифтовыми зонами.

Субдукция плиты происходит с преодолением сил трения на контакте плит, а также вязкого сопротивления материала астеносферы и выталкивающих архимедовых сил. Край нависающей литосферной плиты приподнимается под действием погружающейся плиты, в результате чего над сейсмофокальной зоной могут образоваться крутопадающие трещины, приблизительно параллельные простиранию этой зоны. Из-за сложности напряженного состояния нависающей плиты возможно образование трещин другой ориентации, в первую очередь поперечных к простиранию сейсмофокальной зоны.

В тех случаях, когда образовавшиеся трещины достигают области астеносферы, давление резко падает и происходит декомпрессионное плавление материала мантии, при этом легкоплавкие базальтовые фракции устремляются в трещину.

Перемещение нагретого материала из глубин в более высокие горизонты, вязкое трение при его движении и резкое усиление конвективного переноса тепла за счет увеличения доли жидкой фазы в зоне трещин приводят к подъему изотерм и повышению уровня астеносферы под областью разлома. Таким образом формируется ослабленная зона, по которой в дальнейшем происходят новые подвижки и повторные периодические поступления базальтового материала.

Горизонтальная сжимающая сила, действующая при продолжающемся процессе сползания плит с астеносферных поднятий, в наклонной сейсмофокальной зоне имеет направленную вверх составляющую, которая является причиной сдвигово-взбросовых движений по ранее образовавшейся ослабленной зоне.

Механизм субдукции литосферной плиты в сейсмофокальной зоне, по мнению автора, имеет другой характер, чем это описано С. Уедой [1980], Л. И. Лобковским и О. Г. Сорохтиным [1979].

В результате взброса нависающая плита надвигается на погружающуюся и создает дополнительную нагрузку. Это приводит к образованию в погружающейся плите на границе с субгоризон-

тально лежащей ее частью трещин разрыва, падающих в сторону океана. Наклонно расположенная часть нижней плиты под действием избыточного веса нависающей плиты постепенно погружается, преодолевая вязкое сопротивление материала астеносферы. Во время субдукции плиты в ней происходят фазовые превращения, при прогреве отщепляются летучие и легкоплавкие компоненты (в особенности при метаморфизме и плавлении осадочного слоя) — все это увеличивает среднюю плотность погружающейся плиты по сравнению с окружающей более горячей астеносферой и способствует ее дальнейшему погружению (см., например, [Minear, Toksöz, 1970; Turcotte, Schubert, 1971; Oxburgh, Turcotte, 1976]).

Погружение плит должно приводить к повышению гидростатического давления в прилегающих участках астеносферы. Совместное опускание плиты и надвинутого на нее блока островной дуги продолжается до тех пор, пока избыточное давление нависающего блока от его изостатически нескомпенсированного веса не снизится до некоторой критической величины, при которой этот блок под действием повышенного давления в астеносфере резким скачком сдвигается на несколько метров вверх, преодолевая силы сцепления с нижележащей плитой, что проявляется в виде землетрясения. Одновременно в ослабленной зоне нависающей плиты в тылу островной дуги приоткрываются трещины, происходит декомпрессионное плавление материала и поступает новая порция базальтовых расплавов. За счет этого блок островной дуги перемещается не только вверх, но и в сторону океана. В целом движение блока проявляется в виде взброса по сейсмофокальной плоскости. Одновременно происходят смещения по поперечным к простиранию островной дуги разломам и приоткрытие трещин, по которым поступает вулканический материал. После взброса блока островной дуги, сопровождаемого сильным землетрясением, этот блок снова налегает на погружающуюся плиту и создает на нее дополнительное давление за счет изостатически нескомпенсированного веса. Весь цикл повторяется. Его средняя продолжительность для островных дуг западной окраины Тихого океана порядка ста лет.

Принципиальная схема строения зоны сочленения Тихого океана и Азиатского континента, согласно описанному механизму субдукции, приведена на рис. 5.

Рассмотренный механизм позволяет понять, почему при сильном сжимающем горизонтальном напряжении в тылу островной дуги образуется рифт, объяснить причины его периодического открытия и поступления базальтовых магм, перемещения островной дуги в сторону океана и разрастания окраинного бассейна.

Вулканические каналы должны быть приурочены преимущественно к пересечениям трещин взбросово-сдвигового характера. Их приоткрытие при движении блоков островной дуги вверх приводит к декомпрессии материала в сейсмофокальной зоне на глубинах, при которых достигаются условия частичного плавления.

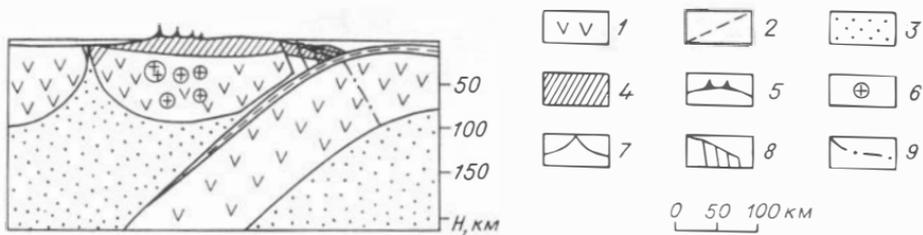


Рис. 5. Модель строения зоны субдукции литосферных плит в Курило-Камчатском районе.

1 — литосфера; 2 — океаническая кора; 3 — астеносфера; 4 — вулканогенно-осадочная толща; 5 — вулканы; 6 — диапиры пород известково-щелочного ряда; 7 — дайкообразное поднятие уровня астеносферы в области разлома надвинутой плиты; 8 — сбросы и взбросы; 9 — плоскость излома погружающейся плиты.

Периодические вулканические извержения связаны с возрастанием давления при погружении плит в промежутках между землетрясениями.

Данная модель согласуется с известными особенностями геологического строения и геофизических полей краевых морей: более молодым возрастом в сравнении с прилегающими районами океана, положительными гравитационными аномалиями, сходством геологического строения Японии и Камчатки с Азиатским континентальным побережьем, повышенным тепловым потоком, сложным профилем теплового потока, батиметрией и сейсмическими профилями дна окраинных морей, нечетко проявленными полосовыми магнитными аномалиями, миграцией зон вулканизма в сторону океана, блоковым строением островных дуг, наличием сбросовых, взбросовых и сдвиговых нарушений.

Выше уже рассмотрен закономерный ход неотектонических движений в островных дугах в связи с обсуждаемым механизмом субдукции: медленное опускание поверхности в спокойные периоды и скачкообразный ее подъем во время землетрясения.

С. Уеда [1980] дал следующее объяснение этому циклу: «...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».

Это объяснение и схема, приведенная на рис. 6, вызывают возражение, так как распрямление нависающей плиты после изгиба неминуемо должно вызывать эффективное соскребание осадков с погружающейся плиты, чего на самом деле не наблюдается.

Предложенный выше механизм также объясняет ход тектонических движений, но лишен указанных недостатков.

Особенно важным представляется вопрос о механизме погружения океанических осадков.

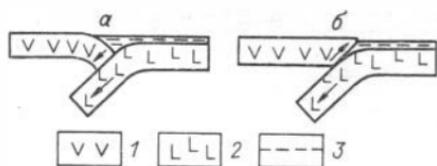


Рис. 6. Предполагаемый характер движений под островными дугами [по Уеда, 1980] (а — в период между землетрясениями, б — во время землетрясений).

1 — континентальная и 2 — океаническая плиты; 3 — океан.

Как известно, проблема погружения осадков была и до сих пор остается одним из основных аргументов при критике тектоники плит. Действительно, в условиях больших сжимающих напряжений в области контакта двух сближающихся плит можно было ожидать, что пластичные осадки будут соскабливаться с погружаемой плиты и накапливаться в районе глубоководного желоба. Однако этого часто не наблюдается: мощность осадков здесь не отличается от соседних океанических областей. Более того, как показали геофизические исследования и результаты опробования, осадки в области желобов не дислоцированы.

Для активной окраины восточного побережья Тихого океана эти факты объяснялись продвижением Американской плиты на запад, что приводит к надвигу ее на осадочный слой. Л. И. Лобковский и О. Г. Сорохтин [1979] обосновывают погружение осадков их засасыванием, подобным процессу смазки трущихся деталей в подшипниках. Решая задачу о течении вязкой жидкости между двумя движущимися жесткими поверхностями, они установили, что при вязкости осадков $\approx 10^{19}$ П толщина затягиваемого слоя ≈ 500 м.

Есть два серьезных возражения против такого объяснения. Во-первых, не учтено давление на пластичный слой, которое может составлять $\approx 0,1$ ГПа. Во-вторых, авторы приняли очень высокое значение для вязкости осадков (10^{19} П), которое может отражать свойства сильно метаморфизованных пород. Однако в области глубоководного желоба осадки еще не литифицированы и их вязкость ближе к величине $\approx 10^{15}$ П [Грунтоведение, 1973]. Обоснование повышения средней вязкости за счет выступов базальтового основания также не оправдано, так как последние применительно к рассматриваемой модели следует относить к жестким пластинам, а не к жидкости. Таким образом, даже если считать, что выбранная модель адекватна ситуации в зоне поддвига, толщина «засасываемого» слоя должна быть по крайней мере на порядок меньше, т. е. ≈ 50 м.

В рассмотренном нами механизме субдукции нависающий блок опускается вместе с погружающейся плитой, зажимая осадочный слой. Перемещение нависающего блока вверх и в сторону океана происходит, когда его вес изостатически почти уравновешен в астеносфере, т. е. когда сцепление с погружающейся плитой мало. В новом, более высоком положении блок островной дуги вновь зажимает осадочный слой, и цикл повторяется. Таким образом, осадки погружаются вместе с плитами, когда зажаты между ними. Относительное движение плит происходит в услови-

ях, когда их сцепление минимально. Этот механизм позволяет очень естественно объяснить процесс погружения осадков при субдукции океанической плиты под островные дуги. Логичное объяснение находит и пространственно-временное распределение сильнейших землетрясений. Как установлено трудами С. А. Федотова, К. Моги, Л. Сайкса, Х. Канамори (см. обзор [Уеда, 1980]), области очагов таких землетрясений образуют овалыные пятна, в грубом приближении параллельные островным дугам. Эти пятна выстраиваются в полосы с промежутками, в которые за время систематических наблюдений (40—50 лет) не происходило крупных землетрясений. Зоны более поздних землетрясений, как правило, не перекрывают друг друга, а заполняют эти промежутки. Такие особенности трудно объяснить с точки зрения обычно принимаемого механизма субдукции — скачкообразного проскальзывания поддвигаемой плиты вниз и под островную дугу по сейсмофокальной зоне. В этом случае должны происходить землетрясения огромной силы, охватывающие большой регион.

При описанном выше механизме взбросовое движение претерпевает сравнительно небольшой блок островной дуги, ограниченный с боков поперечными разломами, снизу — сейсмофокальной зоной, а со стороны континента — ослабленной субвертикальной, в которой близко к поверхности подходят базальтовые расплавы. Таким образом, крупные землетрясения, сопровождающие перемещения этих блоков, будут происходить в разное время и независимо друг от друга с периодичностью один раз в несколько десятилетий. Эти закономерности очень важны для прогноза сейсмической опасности в зонах перехода от океана к континенту.

Еще один важный вопрос, на который большинство существующих гипотез не дают ответа: почему окраинные моря существуют только в западной части Тихого океана и отсутствуют вблизи его восточного побережья?

По мнению автора, главная причина этого заключается в мощности погружаемой плиты. Если толщина ее существенно меньше, чем нависающей, в последней не образуются зоны разлома, а следовательно, не будет осуществляться описанный механизм рифтинга и формирования краевого бассейна. Именно такая ситуация имеет место на восточной окраине Тихого океана, где зона субдукции подходит очень близко к срединно-океаническому хребту, и поэтому молодая океаническая кора имеет небольшую толщину. При субдукции океанической литосферы с большой мощностью, как на западном побережье Тихого океана, на значительном расстоянии от рифтовой зоны, нависающая плита должна взламываться под действием погружаемой плиты, что сопровождается периодическим поступлением базальтового материала и формированием окраинного бассейна.

Если это объяснение верно, то по мере миграции рифтовых зон, появления новых и отмирания старых рифтов обстановка в областях субдукции могла изменяться. Действительно, окраинные моря, кроме Тасманова моря, имеют третичный возраст. В мезо-

зойскую эру, согласно палеорекострукциям [Зоненшайн, Савостин, 1979], в северной части Тихого океана существовала вторая зона рифтинга, следовательно, субдуцируемая плита на западном Тихоокеанском побережье была мало мощной. К эоцену эта рифтовая зона сместилась к северо-западу и поглотилась в областях субдукции Алеутской дуги и у побережья Северной Америки. С началом погружения более зрелой и мощной коры, вероятно, связано образование окраинных бассейнов и островных дуг западной части Тихого океана.

Положение рифтовых зон юго-восточной части океана также не было постоянным. Эти зоны в мезозое располагались на большем удалении от побережья Южной Америки, и тогда могли создаваться условия для образования краевых морей. Имеются указания на существование таких морей в мезозойскую эру [Ломизе, 1983; Обуэн, 1984]. Геологическая ситуация изменялась и у побережья Северной Америки. Приведем цитату из доклада Ж. Обуэна на 27-м Международном геологическом конгрессе [1984б]: «Если рассматривать ситуацию, сложившуюся к концу юры, когда как в Японии, так и в Калифорнии образовались метаморфические пояса высокого давления, то делается очевидным, что асимметрия Тихого океана была обратна нынешней. Обстановки Кордильер и Береговых хребтов находились на западе, соответственно в Китае и Японии, а островные дуги и окраинные моря располагались вдоль Северной Америки».

ХАРАКТЕРНЫЕ ЧЕРТЫ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКИ ЗЕМНОЙ КОРЫ, ОБЪЯСНЯЕМЫЕ ПРЕДЛОЖЕННЫМ МЕХАНИЗМОМ ТЕКТОГЕНЕЗА

Рассмотренный выше механизм глобальных тектонических процессов согласуется со всеми геологическими фактами, интерпретируемыми в рамках концепции тектоники плит (см. табл. 1). В то же время он позволяет более логично объяснить многие характерные черты строения и эволюцию глобальных геологических структур. Перечислим их без специальных пояснений.

1. Строение и развитие океанических участков литосферы и рифтовых систем:

глобальная система рифтовых зон; преимущественно меридиональное, линейное с изломами простираение большинства рифтов; большая скорость спрединга в приэкваториальных областях; срединное положение рифта в Атлантическом океане; близкое к симметричному строение большинства рифтовых зон; перемещение положения рифтовых зон относительно поверхности Земли во времени; формирование океанических впадин после образования рифтов и их углубление с возрастом,

- погружение пассивных континентальных окраин; распределение теплового потока в океанах.
2. Кинематика литосферных плит и распределение в них напряжений:
направления относительных перемещений плит; перемещение плит, не имеющих зон субдукции; обратная корреляция скоростей перемещения плит с площадями их континентальных частей; преобладающий характер напряжений сжатия в земной коре; одновременное существование зон растяжения и сжатия в литосфере; закономерности образования и развития континентальных рифтов.
 3. Строение активных океанических окраин:
преимущественная приуроченность сейсмофокальных зон к границам океанических и континентальных областей; пространственно-временное распределение сильных землетрясений в сейсмофокальных зонах; характер неотектонических движений во время землетрясений и в период между ними; малые мощности осадков в глубоководных желобах несмотря на высокие скорости седиментации; отсутствие смятия осадков перед островными дугами.
 4. Строение и закономерности развития островных дуг:
сходство геологического строения Японии и Камчатки с Азиатским континентальным побережьем; блоковое строение; широкое развитие сбросовых, взбросовых и сдвиговых нарушений; перемещение зон вулканизма в более молодые эпохи в сторону океана; периодическое усиление и ослабление вулканической деятельности; перемещение островных дуг в сторону океана.
 5. Геологические особенности и геофизические поля краевых морей:
более молодой возраст по сравнению с прилегающими районами океана; положительные гравитационные аномалии; сложный профиль теплового потока; батиметрия и сейсмические профили дна окраинных морей; нечетко проявленные полосовые магнитные аномалии; пространственная приуроченность краевых морей к западной части Тихого океана.

ЦИКЛИЧНОСТЬ ГЛОБАЛЬНОГО ТЕКТОГЕНЕЗА

Многие геологические явления и процессы, которые уже нашли объяснение на основе концепции тектоники плит, практически инвариантны к конкретному глубинному механизму горизонтальных перемещений плит, и мы не будем на них останавливаться. Рассмотрим некоторые принципиальные вопросы геологического строения и эволюции Земли, зависящие от механизма, приводящего в движение литосферные плиты. К ним относятся:

- 1) асимметрия распределения континентов и океанов на поверхности планеты в настоящее время и на протяжении большей части изученной геологической истории;

- 2) крупные тектономагматические циклы;
- 3) глобальные трансгрессии и регрессии моря;
- 4) крупные климатические изменения в истории Земли.

О ПРИЧИНАХ АСИММЕТРИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТИНЕНТОВ И ОКЕАНОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Неравномерность распределения океанических и континентальных участков на поверхности Земли является одной из наиболее характерных черт строения нашей планеты. Эта особенность была замечена после составления первых достаточно полных географических карт и особенно наглядно видна на глобусе. Многочисленные палеорекострукции, выполненные за последние 25 лет (см., например, [Новая глобальная тектоника..., 1974; Геофизика..., 1979; Зоненшайн, Савостин, 1979; и др.]), показывают, что асимметричное расположение материков и океанов на поверхности Земли имело место на протяжении большей части геологической истории.

Причины этой асимметрии обсуждались многими исследователями [Фурмарье, 1971]. Среди различных предположений отметим гипотезу океанизации, выдвинутую В. В. Белоусовым [1960], гипотезы значительного расширения Земли (см., например, [Egyed, 1957; Carey, 1978]) и ударного воздействия [Donn e. a., 1965].

Физико-химическая нереальность модели В. В. Белоусова неоднократно отмечалась в литературе. Неравномерное распределение легких компонентов в результате падения очень крупных астероидов можно допустить только на ранних этапах развития Земли, дальнейшие изменения положения континентов, определяемые по палеорекострукциям, требуют дополнительного объяснения.

Различные модели расширения Земли за последние годы вновь приобрели популярность у ряда геологов (см., например, [Чудинов, 1976; Проблемы..., 1984; Гораи, 1984]). В разделе «Механизм глобального тектогенеза» уже указывалось, что существующие в настоящее время надежные палеонтологические данные о закономерном изменении количества дней в году за последние 400 млн. лет вместе с расчетами приливного замедления вращения Земли под воздействием Луны однозначно свидетельствуют о том, что радиус планеты если и увеличивается, то крайне мало. Этого расширения совершенно недостаточно, чтобы объяснить происхождение океанических впадин за счет раскола единой континентальной коры на современные континенты. Таким образом, эта гипотеза, несмотря на некоторые привлекательные черты, не подтверждается фактическим материалом.

В работах [Holmes, 1931, 1965; Griggs, 1939; Hills, 1947; Veining-Meinesz, 1962] было высказано предположение о связи

распределения континентов на поверхности Земли с конвективными потоками в мантии, получившее активное развитие с возникновением концепции тектоники плит. Согласно этой идее, океанические участки связываются с восходящими конвективными потоками, «растаскивающими» континенты, и наоборот, крупные материки формируются над областями нисходящих мантийных течений. Образование новых рифтовых зон и раскол континентов обусловлены изменением характера конвекции в мантии — с одноячейстой на двух- и многоячейстую и появлением новых восходящих потоков (см., например, [Геофизика..., 1979]).

При обсуждении существующих представлений о причинах глобальных тектонических движений приводился целый ряд принципиальных аргументов против того, что литосферные плиты и континенты пассивно переносятся мантийными потоками при термической или химико-плотностной конвекции. Исходя из предложенного механизма глобального тектогенеза, автор по-другому объясняет закономерности распределения континентальных и океанических участков.

Как отмечалось, рифтовые зоны должны образовываться прежде всего в наиболее тонкой океанической литосфере. Под действием рассмотренных выше сил литосферные плиты перемещаются, при этом отдельные континенты могут сталкиваться. Из-за большой толщины и малой плотности континентальной коры их края не могут испытывать значительной субдукции, а деформируются с образованием складок, шарьяжей, надвигов и утолщением коры. Образовавшиеся орогенические пояса спаивают столкнувшиеся континенты в более крупные, а затем в гигантские. Такая преобладающая тенденция к объединению малых континентов, дополняемая их нарастанием за счет магматизма на вулканических островных дугах и активных окраинах андийского типа, а также формированием аккреционных призм — присоединением части осадков, соскобленных с погружающихся океанических плит, объясняет резко выраженную асимметрию распределения континентальных масс на протяжении большей части геологической истории, для которой выполнены палеогеографические реконструкции.

Образование мегаконтинентов сопровождается в то же время созданием в них больших напряжений и ослабленных зон в результате столкновений крупных материков. Такие зоны должны быть неустойчивы к глобальным напряжениям литосферы (причины неустойчивости подробно рассмотрены в разделе «Механизм глобального тектогенеза»), что должно привести к образованию новых рифтовых зон, расколу и развитию молодых океанов.

Важным фактором неустойчивости крупных континентов является экранирующая роль гранитно-осадочной коры, обогащенной радиоактивными элементами, в отношении теплового потока из глубин. Результатом этого должно быть смещение изотерм вверх, сопровождающееся фазовыми переходами с увеличением объема и повышением верхней границы астеносферы, что вызыва-

ет раскалывание гигантских материков и формирование новых рифтов.

Таким образом, преобладающей тенденцией в эволюции Земли должно быть нарастание материков и их объединение в мегаконтиненты. Менее продолжительны и значительно менее характерны периоды равномерного распределения материков на поверхности планеты. Такое объяснение асимметрии строения Земли принципиально отличается от предложенных ранее.

О ПРИЧИНАХ ЦИКЛИЧНОСТИ ТЕКТОНОМАГМАТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

Неравномерность тектономагматической активности во времени отмечалась давно. Накопленные данные по абсолютному возрасту магматических и метаморфических пород позволили придать наблюдениям более строгую количественную основу. Важным обобщением явилась схема периодизации тектонической истории, предложенная Г. Штилле в 1944 г. [1964]. В последующем этой проблеме был посвящен целый ряд работ [Войткевич, 1958; Sutton, 1963; Dearnley, 1966; Богданов, 1976; Тугаринов, Войткевич, 1970; Хаин, 1971, 1973; Салоп, 1973, 1982; Kröner, 1981; Борукаев, 1985; и др.].

Неоднократно дискутировался и такой вопрос: проявляются эпохи тектономагматической активности повсеместно или имеют локальное значение? С одной стороны, общая статистика возрастов изверженных пород и проявлений тектогенеза, казалось бы, говорит в пользу глобальных тектонических циклов, с другой — при более детальных сопоставлениях выявлены значительная растянутость во времени тектонических эпох (на десятки миллионов лет) даже в пределах одного орогенического пояса, несоответствие эпох активности в Европе, Америке и в Перитихоокеанском поясе Азии (см., например, [Борукаев, 1977, 1983; Обуэн, 1984]).

Большинство исследователей связывали выявленную периодичность с постепенным накоплением энергии, выделяющейся при распаде радиоактивных элементов, которая приводит к расплавлению пород мантии и активному диапиризму. После сброса тепла с магматическими расплавами процесс повторяется (см., например, [Holmes, 1965; Белоусов, 1975]). Однако с этих позиций не удается объяснить происхождение средних и кислых пород, которые нельзя получить частичным плавлением предполагаемого вещества мантии.

В рамках концепции тектоники плит принципиально были решены многие сложные петрологические вопросы, в частности происхождение базальтовых магм и пород известково-щелочного ряда [Грин, Рингвуд и др., 1968; и др.]. Периодичность тектономагматической активности в новой глобальной тектонике связывалась с изменением интенсивности конвекции в мантии. Так, Д. Теркот и К. Берк [Turcotte, Burke, 1978] связывают измене-

ния скоростей спрединга с периодом полного оборота конвективной ячейки. Основываясь на расчетах С. Чандрасекхара [Chandrasekhar, 1953], С. Ранкорн [Runkorn, 1964] предположил, что периоды резкого усиления тектонической активности отвечают временам перестроек структур тепловой конвекции от одно- к многоячейстой. Исходя из модели химико-плотностной конвекции, А. С. Монин и О. Г. Сорохтин [Геофизика..., 1979] объясняют тектономагматическую цикличность сменой одно- и двухъячейстых структур, при этом максимумы активности отвечают времени существования одноячейстых структур, приводящих в области нисходящего потока к скупиванию материков и образованию крупных континентов.

С точки зрения рассмотренного механизма глобального тектогенеза цикличность тектономагматической активности Земли имеет другое объяснение.

В предыдущем разделе отмечалось, что преимущественное образование рифтовых зон в океанических участках и невозможность значительного погружения континентов при их столкновении должны приводить к объединению материков с образованием мегаконтинентов. В эпохи преобладания центростремительных тенденций, в особенности при столкновениях крупных континентальных масс, наиболее интенсивно проявляются орогенические процессы с характерным для них преимущественно средним и кислым магматизмом и тектономагматической активизацией на платформах, сопровождаемой щелочным и ультраосновным магматизмом.

Важно, что с точки зрения рассматриваемого механизма возраст складчатости и магматизма близок только для тектонических поясов, образующихся при замыкании данного океана, и может отличаться для других геосинклинальных бассейнов.

При преобладании центробежных тенденций, т. е. распада крупных континентов на более мелкие, тектономагматическая деятельность носит более спокойный характер и проявляется в основном в зонах рифтов и субдукции. Для этих периодов характерен существенно базальтовый и андезитовый вулканизм. В начальные стадии раскрытия континентальных рифтов и распада континентов активно проявляется щелочной магматизм.

Проведенный автором [Киркинский, 1984а, б] анализ тектономагматической цикличности явился прямым следствием предложенного физико-химического механизма глобального тектогенеза. Выводы оказались полностью созвучны с обобщениями авторитетных геологов, представленными на 27-м Международном геологическом конгрессе [Пейве и др., 1984; Хаин, 1984; Обуэн, 1984а; и др.]. В подтверждение приведем лишь одну цитату: «Понятие орогенического цикла приемлемо, вероятно, только в региональном плане. Оно соответствовало уровню знаний, базировавшихся в основном на геологии Европы, где в течение фанерозоя серия последовательных эпизодов раскрытия и закрытия океана позволяла легко различать каледонский, герцинский и альпийский циклы. Изучение геологии в глобальном масштабе

сильно усложнило орогенический календарь. В настоящее время самое разумное — различать орогенические эпохи по их возрасту, рискуя обнаружить в будущем известную синхронность движения плит. Тогда настанет время заново определять орогенические циклы. Ибо желать во что бы то ни стало поместить все тектонические циклы на всем земном шаре в одни и те же рамки — значит замаскировать действительность, вместо того чтобы способствовать ее изучению» [Обуэн, 1984а].

СВЯЗЬ ТРАНСГРЕССИЙ И РЕГРЕССИЙ МИРОВОГО ОКЕАНА И КЛИМАТИЧЕСКОЙ ЦИКЛИЧНОСТИ С ГЛОБАЛЬНЫМ ТЕКТОГЕНЕЗОМ

Региональные изменения уровня моря можно наблюдать на геологических разрезах практически любого района Земли. Детальные подсчеты морских осадков при глобальных реконструкциях континентов показали, что колебания уровня Мирового океана имеют глобальный характер [Serkowski, 1976; Ронов и др., 1976; Vail e. a., 1978; Bond, 1979; и др.]. Большой интерес представляет выяснение причин крупных эвстатических колебаний [Schopf, 1974; Геофизика..., 1979; Шопф, 1982; Оллиер, 1984].

В большинстве современных работ причины этих явлений связываются со структурой и скоростями конвекции материала мантии.

Согласно представлениям К. Рассела [Russell, 1968], Дж. Хэйса и В. Питмана [Hayes, Pitman, 1973; Pitman, Hayes, 1973], в периоды наибольших скоростей конвекции и спрединга материал литосферных плит не успевает остыть, объем срединно-океанических хребтов возрастает, что вызывает повышение уровня Мирового океана и общее потепление климата. Противоположная тенденция должна наблюдаться при ослаблении мантийной конвекции. Изменения скоростей спрединга и тектонические циклы Д. Теркотт и К. Берк [Turcotte, Burke, 1978] связывают с периодом полного оборота конвективной ячейки, а А. С. Монин и О. Г. Сорохтин [Геофизика..., 1979] — кроме того, со сменой одно- и двухъячейстой структур конвекции, при этом максимумы тектонической активности отвечают времени существования одноячейстой структуры и крупных мегаконтинентов.

Рассмотренный в предыдущих разделах механизм глобального тектогенеза позволяет по-иному объяснить крупные колебания уровня Мирового океана и глобальные климатические изменения.

Периоды образования мегаконтинентов должны сопровождаться общей регрессией моря по следующим причинам.

1. Границы сталкивающихся материалов создают чрезвычайно большое сопротивление движению плит, что должно приводить к резкому замедлению скоростей спрединга, охлаждению океанической литосферы и снижению общего объема срединно-океаниче-

ских хребтов. Проведенные оценки [Шопф, 1982] показывают, что изменения средних скоростей спрединга на несколько сантиметров в год должны привести к понижению уровня Мирового океана на 100—200 м.

2. Орогенические процессы, проявляющиеся при столкновении материков, приводят к повышению средних высот континентов и, как следствие этого, к уменьшению их площади, покрытой морем.

3. При общей сравнительно мало протяженной границе континентов и океанов процессы сноса материала с материков и морского осадконакопления замедляются, средние глубины океанов увеличиваются, а уровень Мирового океана понижается.

4. Регрессия моря в результате трех перечисленных выше факторов, более резкое разделение океанов и континентов, а также повышение средней высоты последних приводят к общему похолоданию климата, расширению областей ледников в приполярных и горных областях и дальнейшему снижению уровня Мирового океана. (Как показывают расчеты [Шопф, 1982], образование ледников, сосредоточенных в Антарктиде, привело к снижению уровня моря на 80—150 м.)

5. Увеличение площади суши, расширение ледников в более низкие широты и увеличение сезонных снежных покровов вызывают повышение отражательной способности Земли (альbedo) и дальнейшее похолодание и регрессию моря. На степень проявления оледенения большое влияние оказывает нахождение континентальных масс вблизи полюсов [Ушаков, Галушкин, 1983].

Таким образом, суммарное действие всех рассмотренных факторов может привести к уменьшению уровня Мирового океана на первые сотни метров и увеличению площади континентов на десятки процентов.

После того, как на мегаконтинентах образуются новые рифтовые зоны и начинают формироваться молодые океаны, появляются факторы, изменяющие общую тенденцию и приводящие к повышению уровня Мирового океана, а также к постепенному потеплению климата.

1. Ввиду того, что перемещающиеся части расколовшегося гигантского континента на своих границах не встречают других материков, сопротивление движению на конвергентных границах относительно мало, а средняя скорость спрединга велика. Материал литосферы, образовавшийся в рифтовых зонах, не успевает сильно охладиться, объем срединно-океанических хребтов возрастает, что, как отмечалось выше, должно приводить к трансгрессии моря.

2. Формирование молодых неглубоких океанов приводит к относительному возрастанию площадей с малыми глубинами и общему увеличению площади, находящейся ниже уровня Мирового океана.

3. При преобладающей центробежной тенденции случаи столкновения континентальных масс редки, орогенез проявлен отно-

сительно слабо, поэтому начинают превалировать процессы эрозии материков, чему способствует также широкое развитие береговой линии. Это приводит к усиленному осадконакоплению и уменьшению разницы высот между континентами и океанами и вызывает дополнительную трансгрессию моря. (Как известно, при полном выравнивании рельефа современный объем воды в океанах достаточен для того, чтобы покрыть всю поверхность Земли толщиной в 3,8 км.)

4. Увеличение скорости спрединга и субдукции способствует интенсификации вулканических процессов, повышению выделения углекислого газа, потеплению климата в результате парникового эффекта. Этот эффект несколько ослабляется из-за буферного действия океанической воды, растворяющей избыточный CO_2 и связывающий его в карбонаты.

5. Увеличение площади, занятой морями, и парниковый эффект приводят к общему повышению средних температур, в особенности в высоких широтах, уменьшению площади ледников в приполярных и горных областях, снижению длительности сезонных снежных покровов, общему снижению альбедо и дальнейшему развитию трансгрессии.

Повышение уровня Мирового океана в результате воздействия всех рассмотренных факторов по приблизительным оценкам может составить первые сотни метров, что уменьшит площадь континентов на 40—60%, как это имело место в меловой период.

Отмеченные закономерности эволюции Земли подтверждаются связью регрессий моря с периодами тектонической активности, а трансгрессий — с более спокойными этапами геологической истории, корреляцией времени существования гигантских материков с низким уровнем Мирового океана, а разобщенных континентов — с относительно высоким уровнем, преимущественной приуроченностью крупных оледенений к максимальным регрессиям, а периодов потепления — к крупным трансгрессиям.

Таким образом, рассмотренный физико-химический механизм тектогенеза позволяет объяснить причины крупных эвстатических колебаний уровня моря, тектономагматических и климатических циклов в истории Земли.

Конечно, реальная картина геологической эволюции литосферы сложнее описанной. Так, образование крупных рифтовых зон в принципе возможно не только на мегаконтинентах, но и в менее крупных материках (хотя и менее вероятно). При общей центробежной тенденции отдельные континенты также могут сталкиваться, что сопровождается явлениями орогенеза и тектономагматической активизации. Особенно сложен анализ климатических циклов. Климат планеты зависит не только от геологических, но и от космических факторов, в особенности от активности солнца. Большую роль в климатических изменениях играют океанические и атмосферные течения, зависящие от конкретной картины распределения океанов и континентов, состава и загрязненности атмосферы пылевыми частицами. Эти и многие другие факторы

создают возможность появления климатической цикличности и эвстатических колебаний моря меньших масштабов.

Чередование эпох существования гигантских материков и разобщенных континентов и климатические изменения, как уже неоднократно отмечалось (см., например, [Hayes, Pitman, 1973; Pitman, Hayes, 1973; Barnes, 1980; Ушаков, Галушкин, 1983]), играют огромную роль в количественном и качественном изменении биологических форм и эволюции жизни и по существу являются определяющими в выделении геологических периодов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Критический анализ показал неудовлетворительность существующих представлений о глубинных причинах тектогенеза и происхождении крупнейших геологических структур. Предлагается новый механизм глобальных тектонических процессов, суть которого можно кратко сформулировать в виде следующих основных положений.

1. Образование мировой системы рифтов связано с разрывом литосферы в областях ее наименьшей прочности при глобальных напряжениях в результате общего небольшого расширения планеты, а также изменения ее формы и оси вращения. Постепенное увеличение размера Земли может быть связано с объемным расширением при разогреве, перемещением фазовых границ в оболочках Земли вглубь, частичным плавлением пород в астеносфере, ростом ядра и обусловлено главным образом выделением радиогенного тепла и гравитационной дифференциацией. Изменение формы планеты и оси ее вращения является результатом гравитационного воздействия других космических тел и перераспределения материала в ее глубинах и на поверхности.

2. При образовании трещин разрыва в литосфере давление в нижележащем астеносферном слое резко снижается, адиабатическая декомпрессия приводит к выплавлению наиболее легкоплавких дериватов материала этого слоя — базальтов, заполняющих трещины с образованием даек и изливающихся на поверхность.

3. Подток в рифтовые зоны нагретого материала из более глубоких горизонтов, вязкое трение при его течении, возрастание конвективного переноса тепла благодаря увеличению доли жидкой и газовой фазы, выделение тепла при кристаллизации базальтов, приводят к возрастанию теплового потока, повышению уровня изотерм и верхней границы астеносферы в прилегающих к рифту областях и в целом коррелирующему с этой границей уровню рельефа.

4. Излияние базальтов в рифтовой зоне и создание градиента давления вызывают перемещение по направлению к ней материала из прилегающих участков астеносферы и, как следствие этого, — к общему опусканию рельефа и углублению океанического дна на флангах рифтовых зон, что может сопровождаться погру-

жением в океанические области континентальных участков с спайческим материалом.

5. Латеральные неоднородности уровня астеносферы, связанные с повышением ее верхней границы вдоль рифтовых зон, обуславливают существование горизонтальных сил сжатия в литосфере, направленных от рифтов вкrest их простираения. Напряжения сжатия в литосфере создают потенциальную возможность ее сколов, которая чаще всего реализуется на границах океанических континентальных участков по плоскости, падающей под континент. Реже крупномасштабные сколы образуются в океанической коре и еще более редко — в континентальной.

6. Благодаря сколам в литосфере гравитационная неустойчивость плит в рифтовых зонах реализуется путем их соскальзывания с астеносферных поднятий и погружения по сейсмофокальной зоне. Дальнейшей субдукции плит и преодолению сил трения способствует большая плотность погружающейся части плиты за счет меньшей ее температуры и повышения уровня фазовых границ по сравнению с окружающей астеносферой. Стационарные скорости перемещения плит зависят от сопротивления на их сближающихся краях и от вязкости подстилающей астеносферы. В связи с этим большое значение имеют наличие континентальных участков и столкновение последних на границах плит.

7. Горизонтальные градиенты давления в астеносфере создают поток пластичного материала в ней от зон субдукции к рифтам, т. е. противоположно движению плит, при этом обеспечивается длительно идущий процесс поступления базальтов к поверхности и наращивания молодой коры в рифтовых зонах. Таким образом, осуществляется общий круговорот материала, сопряженный с фазовыми переходами: верхняя часть потока представляет собой литосферную плиту, движущуюся от рифтовой зоны с увлекаемым ее материалом пограничного слоя астеносферы, и возвратный поток материала в нижележащих слоях астеносферы и частично в слое С мантии. В процессе циклического обращения материала происходит его постепенная геохимическая дифференциация с накоплением легких, легкоплавких и летучих соединений в континентальной коре, гидро- и атмосфере.

Рассмотренный механизм глобального тектогенеза согласуется со всеми геологическими фактами, объясняемыми в рамках концепции тектоники плит, и позволяет лучше понять такие важнейшие черты геологического строения Земли, как асимметрия распределения континентов и океанов на поверхности планеты в настоящее время и на протяжении большей части геологической истории, характерные особенности положения и строения рифтовых и сейсмофокальных зон, углубление дна океанов с возрастом и др.

В имеющихся моделях континентального рифтогенеза обнаруживаются существенные недостатки. Предложенный механизм развития рифтов на континентах сочетает элементы «пассивной» и «активной» моделей и более полно согласуется с геологическими наблюдениями.

Суть новой модели субдукции литосферных плит заключается в следующем. Погружение океанической плиты по сколу вызывает приподнимание нависающей плиты и образование в ней крутопадающих трещин, приблизительно параллельных простиранию сейсмофокальной зоны, а также трещин других ориентаций. Это приводит к декомпрессионному выплавлению из материала астеносферы базальтов, заполняющих трещины, повышению теплового потока и верхней границы астеносферы в области разлома. Приподнятый фронтальный край нависающей плиты создает избыточное давление и вызывает дальнейшее погружение океанической плиты, чему способствуют также фазовые превращения в последней. В момент, когда вес блока нависающей плиты будет изостатически скомпенсирован, под действием повышенного давления в астеносферном слое происходит ее взброс по сейсмофокальной зоне с приоткрытием ранее образованной зоны разлома в тылу островной дуги и поступлением в нее нового базальтового материала. Цикл повторяется с периодичностью в несколько десятков лет. Рассмотренный механизм субдукции позволяет объяснить погружение океанических осадков на глубины, образование зон спрединга и окраинных бассейнов в тылу островных дуг и периодическое приоткрывание вулканических каналов, несмотря на общие сжимающие напряжения в зоне перехода от континента к океану. Закономерный ход неотектонических движений в островных дугах и пространственно-временное распределение крупнейших землетрясений соответствуют данному механизму погружения литосферных плит в сейсмофокальной зоне.

Предложенная модель рифтинга в тылу островных дуг и формирования окраинных бассейнов согласуется со всеми характерными чертами геологического строения и геофизических полей краевых морей.

Исходя из новых представлений, можно дать ответ на основные аргументы, выдвигавшиеся против концепции тектоники плит.

С помощью механизма глобального тектогенеза объясняется крупномасштабная цикличность развития Земли, связанная с закономерной сменой: объединение малых континентов в гигантские — последующий раскол последних с образованием молодых океанов. Эпохи объединения континентов сопровождаются активизацией орогенических и магматических процессов на платформах, регрессией моря, общим похолоданием климата. Эпохи преобладающей тенденции к распаду крупных континентов отличаются более спокойным тектоническим развитием, трансгрессией моря и общим потеплением климата. Для этих периодов характерны магматические породы щелочно-земельного ряда и вулканогенные серии.

Эпохи тектонической активизации не являются глобальными.

Таким образом, крупные тектономагматические циклы и эвстатические колебания уровня Мирового океана, а также периодические значительные изменения климата на Земле тесно связаны с механизмом, приводящим в движение литосферные плиты.

ЛИТЕРАТУРА

- Алексеев А. С., Бондаренко П. М., Шарапов В. Н. Геодинамические модели сейсмофокальных зон // 27-й Международный геологический конгресс: Тез. докл.— М.: Наука, 1984.— Т. 3.— С. 100.
- Артемов М. Е., Артюшков Е. В. О происхождении рифтовых впадин// //Изв. АН СССР. Сер. геол.— 1968.— № 4.— С. 58—73.
- Артюшков Е. В. Гравитационная конвекция вещества в недрах Земли// //Изв. АН СССР. Физика Земли.— 1968.— № 9.— С. 3—17.
- Артюшков Е. В. Дифференциация по плотности вещества Земли и связанные с ней явления//Изв. АН СССР. Физика Земли.— 1970.— № 5.— С. 18—30.
- Артюшков Е. В. Происхождение больших напряжений в земной коре// //Изв. АН СССР. Физика Земли.— 1972.— № 8.— С. 3—25.
- Артюшков Е. В. Геодинамика.— М.: Наука, 1979.— 327 с.
- Баранов Б. В., Зоненшайн Л. П. Геодинамика и позднекайнозойская эволюция переходной зоны от Тихого океана к Азиатскому континенту// //27-й Международный геологический конгресс: Доклады.— М.: Наука, 1984.— Т. 7: Тектоника.— С. 37—42.
- Барсуков В. Л., Урусов В. С. Фазовые превращения в переходной зоне мантии и возможные изменения радиуса Земли//Геохимия.— 1982.— № 12.— С. 1728—1743.
- Белоусов В. В. Развитие земного шара и тектогенез//Сов. геология.— 1960.— № 7.— С. 3—27.
- Белоусов В. В. Тектоносфера Земли: идеи и действительность//Проблема глобальной тектоники.— М.: Наука, 1973.— С. 60—99.
- Белоусов В. В. Основы геотектоники.— М.: Недра, 1975.— 263 с.
- Богданов А. А. Тектоника платформ и складчатых областей.— М.: Наука, 1976.— 340 с.
- Борукаев Ч. Б. Схема общей периодизации тектонической истории Земли// //Геол. и геофиз.— 1977.— № 12.— С. 3—11.
- Борукаев Ч. Б. Кратонизация//Геол. и геофиз.— 1983.— № 7.— С. 15—21.
- Борукаев Ч. Б. Структура докембрия и тектоника плит.— Новосибирск: Наука, 1985.— 190 с.
- Ботт М. Внутреннее строение Земли.— М.: Мир, 1974.— 373 с.
- Войткевич Г. В. Единая геохронология докембрия//Природа.— 1958.— № 5.— С. 77—79.
- Гаврилов С. В., Жарков В. Н. Исследование устойчивости термомеханической модели континентальной верхней мантии//Изв. АН СССР. Физика Земли.— 1979.— № 12.— С. 13—19.
- Гаврилов С. В., Жарков В. Н. Построение термодинамической модели океанической верхней мантии//Изв. АН СССР. Физика Земли.— 1981.— № 4.— С. 3—13.
- Геофизика океана/Под ред. О. Г. Сорохтина.— М.: Наука, 1979.— Т. 2: Геодинамика.— 416 с.
- Гнибиденко Г. С. Тектоника дна окраинных морей Дальнего Востока.— М.: Наука, 1979.— 163 с.
- Гнибиденко Г. С., Хведчук И. И. Основные черты геологии Охотского моря// //27-й Международный геологический конгресс: Доклады.— Т. 6,

- ч. II: История и происхождение окраинных и внутренних морей.— М.: Наука, 1984.— С. 12—19.
- Гораи И. М. Эволюция расширяющейся Земли.— М.: Недра, 1984.— 109 с.
- Грин Д. Х., Рингвуд А. Э. и др. Петрология верхней мантии.— М.: Мир, 1968.— 335 с.
- Грунтоведение. Учебник. 4-е изд./Е. М. Сергеев, Г. А. Голодковская, Р. С. Зиамиров и др.— М.: Изд-во МГУ, 1977.— 387 с.
- Дмитриев Л. В. Геохимия и петрология коренных пород средних океанических хребтов: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук.— М.: ГЕОХИ, 1973.— 45 с.
- Дорошев А. М., Малиновский И. Ю. Топологический анализ системы $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ —Экспериментальные исследования по минералогии (1972—1973 гг.).— Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1974.— С. 81—86.
- Дорошев А. М., Малиновский И. Ю., Калинин А. А. Топологический анализ системы $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ на базе экспериментальных данных// Экспериментальные исследования по минералогии.— Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1976.— С. 39—45.
- Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли и планет. 2-е изд.— М.: Наука, 1983.— 415 с.
- Жарков В. Н., Трубицын В. П. Физика планетных недр.— М. Наука, 1980.— 448 с.
- Зоненшайн Л. П., Савостин Л. А. Введение в геодинамику.— М.: Недра, 1979.— 311 с.
- Кадик А. А., Френкель М. Я. Декомпрессия пород коры и верхней мантии как механизм образования магм.— М.: Наука, 1982.— 120 с.
- Кариг Д. Происхождение и развитие окраинных бассейнов Тихого океана// Новая глобальная тектоника.— М.: Мир, 1974.— С. 266—287.
- Кеонджян В. П., Монин А. С. Расчеты эволюции недр планеты // Изв. АН СССР. Физика Земли.— 1976.— № 4.— С. 23—28.
- Киркинский В. А. Фазовые переходы в глубинах Земли и рифтогенеза // Проблемы рифтогенеза.— Иркутск, 1975.— С. 23—24.
- Киркинский В. А. О возможном механизме рифтогенеза и образования дна океанов//Основные проблемы рифтогенеза.— Новосибирск: Наука, 1977.— С. 78—82.
- Киркинский В. А. Физико-химический механизм глобальных геодинамических процессов//27-й Международный геологический конгресс: Тез. докл.— М.: Наука, 1984а.— Т. 5.— С. 312—314.
- Киркинский В. А. Происхождение глобальных структур и природа цикличности развития Земли.— Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1984б.— 44 с.
- Киркинский В. А. О физико-химическом механизме глобальных тектонических процессов // Геол. и геофиз.— 1985.— № 4.— С. 3—14.
- Континентальный рифтогенез/ Под ред. С. М. Зверева и Н. А. Логачева.— М.: Сов. радио, 1977.— 107 с.
- Кропоткин П. Н. Напряженное состояние земной коры по измерениям в горных выработках и геофизическим данным//Проблемы теоретической и региональной тектоники.— М.: Наука, 1971.— С. 238—253.
- Кропоткин П. Н. Динамика земной коры//Проблемы глобальной тектоники.— М.: Наука, 1973.— С. 27—59.
- Кропоткин П. Н., Ефремов В. Н. Новая геодинамическая модель // Проблемы движений и структурообразования в коре и верхней мантии.— М.: Изд-во МГУ, 1983.— С. 21—22.
- Кузьмичева Е. И. Кораллы как геологические часы//Природа.— 1982.— № 10.— С. 18—25.
- Кулон Ж. Разрастание океанического дна и дрейф материков.— Л.: Недра, 1973.— 250 с.
- Лобковский Л. И., Сорохтин О. Г. Строение зон поддвига литосферных плит и происхождение окраинных морей. Деформации литосферных плит в зонах поддвига // Геофизика океана/Отв. ред. О. Г. Сорохтин.— М.: Наука, 1979.— Т. 2: Геодинамика.— С. 183—203.

- Логачев Н. А., Зорин Ю. А.** Строение и стадии развития Байкальского рифта // 27-й Международный геологический конгресс: Доклады.— М.: Наука, 1984.— Т. 7: Тектоника.— С. 126—134.
- Ломизе М. Г.** Тектонические обстановки геосинклинального вулканизма.— М.: Недра, 1983.— 194 с.
- Любимова Е. А.** Термика Земли и Луны.— М.: Наука, 1968.— 277 с.
- Маева С. В.** О термической истории Земли // Изв. АН СССР. Физика Земли.— 1967.— № 3.— С. 3—17.
- Милановский Е. Е.** Рифтовые зоны континентов.— М.: Недра, 1976.— 280 с.
- Милановский Е. Е.** Некоторые закономерности тектонического развития и вулканизма Земли в фанерозое (проблемы пульсации и расширения Земли) // Геотектоника.— 1978.— № 6.— С. 3—16.
- Милановский Е. Е.** Рифтогенез в истории Земли (Рифтогенез на древних платформах).— М.: Недра, 1983.— 280 с.
- Милановский Е. Е.** Эволюция рифтогенеза в истории Земли // 27-й Международный геологический конгресс: Доклады.— М.: Наука, 1984а.— Т. 7: Тектоника.— С. 126—134.
- Милановский Е. Е.** Пульсационная гипотеза геотектоники, ее становление и значение для понимания закономерностей развития Земли // Научное наследие М. А. Усова и его развитие.— Новосибирск: Наука, 1984б.— С. 107—141.
- Митчел А., Гарсон М.** Глобальная тектоническая позиция минеральных месторождений.— М.: Мир, 1984.— 196 с.
- Монин А. С.** История Земли.— Л.: Наука, 1977.— 228 с.
- Новая глобальная тектоника (тектоника плит):** Пер. с англ. под ред. Л. П. Зоненшайна и А. А. Ковалева.— М.: Мир, 1974.— 471 с.
- Новая глобальная тектоника (тектоника плит):** Библиография (1961—1976) / Сост. Ч. Б. Борукаев, Д. Х. Гик. Отв. ред. И. В. Лучицкий.— Новосибирск, 1982.— Ч. I.— 176 с.; Ч. II.— 208 с.
- Обручев В. А.** Пульсационная гипотеза геотектоники // Изв. АН СССР. Сер. геол.— 1940.— № 1.— С. 2—30.
- Обузн Ж.** На поиски критериев орогенических подразделений // 27-й Международный геологический конгресс: Доклады.— М.: Наука, 1984а.— Т. 7: Тектоника.— С. 15—19.
- Обузн Ж.** Тектоника складчатых поясов Тихоокеанского кольца. О некоторых, так называемых классических аспектах перитихоокеанской тектоники // 27-й Международный геологический конгресс: Доклады.— М.: Наука, 1984б.— Т. 7: Тектоника.— С. 43—47.
- Окраины континентов и островные дуги /** Под ред. У. Х. Пула.— М.: Мир, 1970.— 368 с.
- Оллиер К.** Тектоника и рельеф.— М.: Недра, 1984.— 460 с.
- Основные проблемы рифтогенеза /** Отв. ред. Н. А. Логачев.— Новосибирск: Наука, 1977.— 217 с.
- Паккэм Дж., Фалви Д.** Гипотеза образования окраинных морей западной части Тихого океана // Новая глобальная тектоника.— М.: Мир, 1974.— С. 288—314.
- Пишон Ле К., Франшто Ж., Боннин Ж.** Тектоника плит.— М.: Мир, 1977.— 288 с.
- Проблемы расширения и пульсаций Земли /** Под ред. П. Н. Кропоткина и др.— М.: Наука, 1984.— 191 с.
- Пейве А. В., Книппер А. К., Марков М. С. и др.** Закономерности формирования континентальной коры в фанерозое (к проблеме тектонического районирования материков) // 27-й Международный геологический конгресс: Доклады.— М.: Наука, 1984.— Т. 7: Тектоника.— С. 3—7.
- Рамберг И., Морган П.** Физическая характеристика и направления эволюции континентальных рифтов // 27-й Международный геологический конгресс: Доклады.— М.: Наука, 1984.— Т. 7: Тектоника.— С. 78—109.
- Ревердатто В. В.** Фации контактового метаморфизма.— М.: Недра, 1970.— 270 с.

- Рингвуд А. Е. Состав и эволюция верхней мантии // Земная кора и верхняя мантия.— М.: Мир, 1972.— С. 7—26.
- Ронов А. Б., Хаин В. Е., Балуховский А. Н. и др. Изменение распространенности объемов и скоростей накопления осадочных и вулканогенных отложений в фанерозое (в пределах современных материков) // Изв. АН СССР. Сер. геол.— 1976.— № 12.— С. 5—12.
- Салоп Л. И. Общая стратиграфическая шкала докембрия.— Л.: Недра, 1973.— 309 с.
- Салоп Л. И. Геологическое развитие Земли в докембрии.— Л.: Недра, 1982.— 343 с.
- Сорохтин О. Г. Дифференциация вещества Земли и развитие тектонических процессов // Изв. АН СССР. Физика Земли.— 1972.— № 7.— С. 55—66.
- Сорохтин О. Г. Глобальная эволюция Земли.— М.: Наука, 1974.— 184 с.
- Справочник физических констант горных пород / Под ред. П. Кларка.— М.: Мир, 1969.— 543 с.
- Тектоника Курило-Камчатского глубоководного желоба / Отв. ред. П. М. Сычев.— М.: Наука, 1984.— 180 с.
- Тугаринов А. И., Войткевич Г. В. Докембрийская геохронология материков.— М.: Недра, 1970.— 432 с.
- Уеда С. Новый взгляд на Землю.— М.: Мир, 1980.— 214 с.
- Унксов В. А. Тектоника плит.— Л.: Недра, 1981.— 288 с.
- Усов М. А. Структурная геология.— М.— Л.: Госгеолиздат, 1940.— 135 с.
- Ушаков С. А. Физика Земли.— М.: ВИНТИ, 1974.— Т. 1: Строение и развитие Земли.— 269 с.
- Ушаков С. А., Галушкин Ю. И. Литосфера Земли (по геофизическим данным). Ч. 1—3 // Итоги науки и техники. Физика Земли.— М.: ВИНТИ, 1978.— Т. 3.— 272 с.; 1979.— Т. 4.— 223 с.; 1983.— Т. 7.— 226 с.
- Фурмарье П. Проблемы дрейфа континентов.— М.: Мир, 1971.— 255 с.
- Хаин В. Е. Региональная геотектоника. Северная и Южная Америка, Антарктида, Африка.— М.: Недра, 1971.— 548 с.
- Хаин В. Е. О новой глобальной тектонике // Проблемы глобальной тектоники.— М.: Наука, 1973а.— С. 5—26.
- Хаин В. Е. Общая геотектоника.— М.: Недра, 1973б.— 510 с.
- Хаин В. Е. Окраинно-континентальные и межконтинентальные геосинклинальные пояса: сопоставление особенностей развития // 27-й Международный геологический конгресс: Доклады.— М.: Наука, 1984.— Т. 7: Тектоника.— С. 60—63.
- Хэйс Д. Окраинные моря Юго-Восточной Азии: их геофизические характеристики и структура // 27-й Международный геологический конгресс: Доклады.— М.: Наука, 1984.— Т. 6, ч. II: История и происхождение окраинных и внутренних морей.— С. 30—43.
- Чудинов Ю. В. Расширение Земли как альтернатива «новой глобальной тектоники» // Геотектоника.— 1976.— № 4.— С. 16—37.
- Шарапов В. Н., Симбирева И. Г., Бондаренко П. М. Структура и геодинамика сейсмофокальной зоны Курило-Камчатского региона.— Новосибирск: Наука, 1984.— 199 с.
- Шараськин А. Я. Строение и тектономагматическая эволюция дна Филиппинского моря // 27-й Международный геологический конгресс: Доклады.— М.: Наука, 1984.— Т. 6, ч. II: История и происхождение окраинных и внутренних морей.— С. 44—57.
- Шопф Т. Палеоокеанология.— М.: Мир, 1982.— 311 с.
- Штилле Г. Избранные труды.— М.: Мир, 1964.— 887 с.
- Approaches to Taphrogenesis/Ed. J. H. Illies, K. Fuchs.— Stuttgart: Schweizerbart, 1975.— 460 p.
- Artyushkov E. V. Mechanism of continental riftogenesis // Tectonophysics.— 1981.— V. 73, N 1.— P. 9—14.
- Artyushkov E. V. Rheological properties of the crust and upper mantle according to data on isostatic movements // J. Geophys. Res.— 1971.— V. 76, N 5.— P. 1376—1390.

- Baker B. H., Mohr P. A., Williams L. A. J.** Geology of the Eastern rift system of Africa // *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.*— 1972.— V. 136, N 1.— P. 67.
- Baker B. H., Morgan P.** Continental rifting: progress and outlook // *Eos.*— 1981.— V. 62, N 27.— P. 585—586.
- Barnes Ch. W.** Earth, time and life.— N. Y.— Toronto: John Wiley and sons, 1980.— 583 p.
- Bond G.** Speculations on real sea-level changes and vertical motions of continents at selected times in the Cretaceous and Tertiary Periods // *Geology.*— 1979.— V. 6, N 4.— P. 247—250.
- Bott M. H. P.** Crystal doming and the mechanisms of continental rifting // *Tectonophysics.*— 1981.— V. 73, N 1.— P. 1—8.
- Bucher W. H.** The deformation of the Earth's crust. An inductive approach to the problem of diastrophism.— Princeton: University Press, 1933.— 518 p.
- Burke K.** Aulacogenes and continental break-up // *Ann. Rev. Earth and Planet. Sci.*— 1977.— V. 5.— P. 371—396.
- Carey S. W.** The expanding Earth.— Amsterdam — L.— N. Y.: Elsevier Publ. Comp., 1978.— 460 p.
- Chandrasekhar S.** The onset convection by thermal instability in spherical shells // *Phil. Mag.*— 1953.— V. 44, N 350.— P. 233—241.
- Continental and oceanic rifts** // Ed. G. Palmason. 1982.— 309 p. (Amer. Geophys. Union, Geodynam. Ser. V. 8).
- Davies E. E., Lister C. R. B.** Fundamentals of ridges crest topography // *Earth Planet. Sci. Lett.*— 1974.— V. 21, N 4.— P. 405—413.
- Dearnley R.** Orogenic fold-belts and hypothesis of Earth evolution // *Phys. Chem. Earth.*— 1966.— V. 7, N 1.— P. 1—114.
- Dietz R. S.** Marine geology of northwestern Pacific: Description of Japanese bathymetric chart 6901 // *Bull. Geol. Soc. Amer.*— 1954.— V. 65, N 12.— P. 1199—1224.
- Dietz R. S.** Continent and ocean basin evolution by spreading of the sea floor // *Nature.*— 1961.— V. 190, N 4779.— P. 854—857.
- Donn W. L., Donn B. D., Valentine W. G.** On the early history of the Earth // *Bull. Geol. Soc. Amer.*— 1965.— V. 76, N 3.— P. 287—306.
- East African rift**/Ed. R. W. Girdler.— Amsterdam — L.— N. Y.: Elsevier.— 179 p. (Tectonophysics.— 1972.— V. 15, N 1/2. Spec. issue).
- Egyed L.** A new dynamic conception of the internal constitution of the Earth // *Geol. Rundschau*, 1957.— V. 36.— S. 101—121.
- Elsasser W. M.** Convection and stress propagation in the upper mantle // *The application of modern physics to the Earth and planetary interior*/Ed. J. K. Runcorn.— L.— N. Y.— Sydney — Toronto: Wiley Interscience, 1969.— P. 223—246.
- Elsasser W. M.** Sea-floor spreading at thermal convection // *J. Geophys. Res.*— 1971.— V. 76, N 5.— P. 1101—1112.
- Falvey D. A., Talwani M.** Gravity map and tectonic fabric of the Coral sea // *Geol. Soc. Amer. Ann. Meeting.*— November 1969.— Abstr.— V. 7.— P. 62—63.
- Forsyth D. W.** The evolution of the upper mantle beneath mid-ocean ridges // *Tectonophysics.*— 1977.— V. 38, N 1—2.— P. 89—118.
- Forsyth D. W., Uyeda S.** On the relative importance of the driving forces of plate motion // *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*— 1975.— V. 43, N 1.— P. 163—200.
- Geodynamics of the Baikal rift zone**/Ed. N. A. Logachev, P. A. Mohr.— Amsterdam — L.— N. Y.: Elsevier.— 105 p. (Tectonophysics.— 1978.— V. 45, N 1. Spec. issue).
- Graben problems**/Ed. J. H. Illies, K. Mueller.— Stuttgart: Schweizerbart, 1970.— 316 p.
- Gregory J. W.** Contributions to the physical geography of British East Africa // *Geograph. Journ.*— 1894.— V. 4, N 3.— P. 290—315.
- Griggs D.** A theory of mountain-building // *Am. J. Sci.*— 1939.— V. 237, N 9.— P. 611—650.

- Hales A. J.** Gravitational sliding and continental drift // *Earth Planet. Sci. Lett.*— 1969.— V. 6, N 1.— P. 31—34.
- Harper J. F.** On the driving forces of plate tectonics // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*— 1975.— V. 40, N 3.— P. 465—474.
- Hast N.** The state of stresses in the upper part of the Earth's crust // *Tectonophysics.*— 1969.— V. 8, N 3.— P. 169—211.
- Hayes J. D., Pitman W. C.** Lithospheric plate motion, sea level changes and climatic and ecological consequences // *Nature.*— 1973.— V. 246, N 1.— P. 18—22.
- Hess H. H.** History of ocean basins // *Petrology Studies. A volume to honor of A. F. Buddington.*— N. Y.: Geol. Soc. Am.— 1962.— P. 599—620.
- Hills G. F. S.** The graniting and basaltic areas of the Earth's surface // *Geol. Mag.*— 1934.— V. 71.— P. 275.
- Hills G. S. F.** The formation of continents by convection.— L.: E. Arnold and Co.— 1947.
- Holmes A.** Radioactivity and Earth movements // *Trans. Geol. Soc. Glasgow.*— 1931.— V. 18, N 5—6.— P. 559—606.
- Holmes A.** Principles of physical geology. 2nd ed.— L.: Nelson and Sons.— 1965.— 1288 p.
- Isacks B., Molnar P.** Distribution of stresses in the descending lithosphere from a global survey focal mechanism solutions of mantle earthquakes // *Rev. Geophys. Space Phys.*— 1971.— V. 9, N 1.— P. 103—174.
- Isacks B., Oliver J., Sykes L. R.** Seismology and the new global tectonics // *J. Geophys. Res.*— 1968.— V. 73, N 18.— P. 5855—5899.
- Jacoby W. R.** Instability in the upper mantle and global plate movements // *J. Geophys. Res.*— 1970.— V. 75, N 29.— P. 5671—5680.
- Knopoff L.** Thermal convection in the Earth's mantle // *The Earth's Mantle / Ed. T. T. Gaskell.*— L.— N. Y.: Acad. Press, 1967.— P. 171—196.
- Kono Y., Yoshii T.** Numerical experiments on the thickening plate model // *J. Phys. Earth.*— 1975.— V. 23, N 1.— P. 63—75.
- Kröner A.** Precambrian crustal evolution and continental drift // *Geol. Rundsch.*— 1981.— Bd 70, H. 2.— S. 412—428.
- Kuenen Ph. H.** The Snellius Expedition, Geological Results.— Utrecht: Kemink en zoon, 1935.— V. 5, pt. 1.— 124 p.
- Leeds A. R.** Lithospheric thickness in the western Pacific // *Phys. Earth Planet. Inter.*— 1972.— V. 26, N 4.— P. 515—535.
- Lliboutry L.** Sea floor spreading continental drift and lithosphere sinking with an asthenosphere at melting // *J. Geophys. Res.*— 1969.— V. 24, N 27.— P. 6525—6541.
- Lliboutry L.** Rheological properties of lithosphere // *Tectonophysics.*— 1974.— V. 24, N 1.— P. 13—29.
- Lubimova E. A., Nikitina V. N.** On heat flow singularities over mid-ocean ridges // *J. Geophys. Res.*— 1975.— V. 80, N 2.— P. 232—243.
- McConnell R. K., jr.** Viscosity of the mantle from relaxation time spectra of isostatic adjustment // *J. Geophys. Res.*— 1968.— V. 73, N 22.— P. 7089—7105.
- McKenzie D. P.** Speculations on the consequences and causes of plate motions // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*— 1969.— V. 18, N 1.— P. 1—32.
- McKenzie D. P., Roberts J. M., Weiss N. O.** Convection in the Earth's mantle: towards a numerical simulation // *J. Fluid Mech.*— 1974.— V. 62, N 3.— P. 465—538.
- McKenzie D. P., Selater J. G.** Heat flow inside the island arcs of the northwestern Pacific // *J. Geophys. Res.*— 1968.— V. 73, N 10.— P. 3173—3179.
- McKenzie D. P., Selater J. G.** The evolution of the Indian ocean since cretaceous // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*— 1971.— V. 24, N 5.— P. 437—528.
- McKenzie D., Weiss N.** Speculations about the thermal history of the Earth // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*— 1975.— V. 42, N 1.— P. 131—174.
- Mechanism of graben formation / Ed. J. H. Illies.**— Amsterdam — L.— N. Y. Elsevier.— 266 p. (*Tectonophysics.*— 1981.— V. 73, N 1—2. Spec. issue).

- Milanovsky E. E.** Continental rift zones: Their arrangement and development // *Tectonophysics* — 1972.— V. 15, N 1.— P. 65—70.
- Milanovsky E. E.** Some problems of rifting in the Earth's history // *Tectonophysics*.— 1983.— V. 94, N 1—4.— P. 599—607.
- Minear J. W., Toksöz M. N.** Thermal regime of a downgoing slab and new global tectonics // *J. Geophys. Res.*— 1970.— V. 75, N 8.— P. 1397—1419.
- Molnar P., Atwater T.** Interarc spreading and cordillerian tectonics as alternatives related to the age of subducted oceanic lithosphere // *Earth Planet. Sci. Lett.*— 1978.— V. 41, N 3.— P. 330—340.
- Morgan P., Baker B. H.** Introduction — processes of continental rifting // *Tectonophysics*.— 1983.— V. 94.— P. 1—10.
- Murauchi S., Den N.** Origin of the Japan Sea.— Tokyo: Univ. of Tokyo, 1966.— 153 p.
- Oxburgh E. R., Turcotte D. L.** Thermal structure of island arcs. // *Bull. Geol. Soc. Am.*— 1970.— V. 81, N 6.— P. 1665—1688.
- Oxburgh E. R., Turcotte D. L.** The physico-chemical behaviour of the descending lithosphere. // *Tectonophysics*.— 1976.— V. 32, N 1/2.— P. 107—128.
- Parker R. L., Oldenburgh D. W.** Thermal model of ocean ridges // *Nature. Phys. Sci.*— 1973.— V. 242, N 122.— P. 137—139.
- Pecoris C. L.** Thermal convection in the interior of the Earth // *Mon. Not. Roy. Astr. Soc. Geoph. Suppl.*— 1935.— V. 3.— P. 343—352.
- Pitman W. C., Hayes J. D.** Upper Cretaceous spreading rates and the great transgression // *Geol. Soc. Am. Ann. Meeting Abstr. and Program, Boulder, Colorado.*— 1973.— V. 5, N 7.
- Processes of continental rifting** / Ed. P. Morgan, B. H. Baker — Amsterdam — L.— N. Y.: Elsevier.— 680 p. (*Tectonophysics*.— 1983.— V. 94, N 1 — 4. Spec. issue).
- Ramberg I. B., Larsen B. T.** Tectonomagnetic evolution // *Norg. geol. unders*, 1978.— Bd 337, N 1.— S. 55—73.
- Richter F. M.** Convection and the large-scale circulation of the mantle // *J. Geophys. Res.*— 1973.— V. 78, N 35.— P. 8735—8745.
- Richter F. M.** On the driving mechanism of plate tectonics // *Tectonophysics*.— 1977.— V. 38, N 1—2.— P. 61—88.
- Richter F. M., Parsons B.** On the interaction of two scales of convection in the mantle // *J. Geophys. Res.*— 1975.— V. 80.— P. 2529—2541.
- Rodolfo K. S.** Bathymetry and marine geology of the Andaman Basin and tectonic implication for Southeast Asia // *Geol. Soc. Am. Bull.*— 1969.— V. 80, N 7.— P. 1203—1230.
- Runcorn S. K.** Changes in the Earth's moment of inertia // *Nature.*— 1964.— V. 204, N 4961.— P. 823—825.
- Runcorn S. K.** Dynamical processes in the deeper mantle // *Tectonophysics*.— 1972.— V. 13, N 5—6.— P. 623—637.
- Russell K. L.** Oceanic ridges and eustatic changes in sea level // *Nature.*— 1968.— V. 218, N 5144.— P. 861—862.
- Schopf T. I. M.** Permo-Triassic extinctions: relation to sea-floor spreading // *Journ. of Geology.*— 1974.— V. 82, N 1.— P. 129—143.
- Schubert G., Froidevaux C., Yuen D. A.** Oceanic lithosphere and asthenosphere: thermal and mechanical structure // *J. Geophys. Res.*— 1976.— V. 81, N 19.— P. 3525—3540.
- Schubert G., Turcotte D. R.** One dimensional model of shallow-mantle convection // *J. Geophys. Res.*— 1972.— V. 77, N 5.— P. 945—951.
- Schubert G., Yuen D. A., Turcotte D. R.** Role of phase transitions in a dynamic mantle // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*— 1975.— V. 42, N 2.— P. 705—735.
- Schubert G., Yuen D., Froidevaux C. e. a.** Mantle circulation with partial shallow return flow: effects on stresses in oceanic plates and topography of sea floor // *J. Geophys. Res.*— 1978.— V. 83B, N 2.— P. 759—766.
- Sengör A. M. C., Burke K.** Relative timing of rifting and volcanism of Earth and its tectonic implications // *Geophys. Res. Lett.*— 1978.— V. 5, N 10.— P. 419—421.

- Sepkovski J. J., jr.** Species diversity in the Phanerozois: species-area effects // *Paleobiology*.— 1976.— V. 2, N 3.— P. 298—303.
- Solomon S. C., Sleep N. H.** Some simple physical models for absolute plate motion // *J. Geophys. Res.*— 1974.— V. 79, N 17.— P. 2557—2567.
- Solomon S. C., Sleep N. H., Richardson R. M.** On the forces driving plate tectonics: Interference from absolute plate velocities and intraplate stress // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*— 1975.— V. 42, N 2.— P. 769—801.
- Suess E.** *Das Anlitz der Erde*.— Prag: Tempsky.— 1985.— B. 1.— 778 p.
- Sutton J.** Long-term cycles in the evolution of the continents // *Nature*.— 1963.— V. 198, N 4882.— P. 731—735.
- Sychev P. M., Tarakanov R. Z.** Some inferences on the upper mantle structure and deep processes occurring in the north-west Pacific // *Canad. J. Earth Sci.*— 1976.— V. 13, N 12.— P. 1725—1729.
- Takeuchi H., Hasegawa Y.** Viscosity distribution within the Earth // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*— 1965.— V. 9, N 5.— P. 503—508.
- Tarakanov R. S., Un K. C., Sukhomlinova R. J.** Spatial distribution regularities of hypocentres of the Kuril-Japan region // *Japan-USSR Symposium*.— Tokyo, 1974.
- Tozer D. C.** Towards a theory of thermal convection in the mantle // *The Earth Mantle* / Ed. T. F. Gaskell.— L. — N. Y.: Acad. Press, 1969.— P. 325—353.
- Turcotte D. L., Burke K.** Global sea level changes and the thermal structure of the earth // *Earth Planet. Sci. Lett.*— 1978.— V. 41, N 3.— P. 341—346.
- Turcotte D. L., Oxburgh E. R.** Mantle convection and the new global tectonics // *Ann. Rev. Fluid Mech. Palo Alto, Calif.*— 1972.— V. 4, N 1.— P. 33—68.
- Turcotte D. L., Schubert G.** Structure of the olivine-spinel phase boundary in the descending lithosphere // *J. Geophys. Res.*— 1971.— V. 76, N 32.— P. 7980—7987.
- Ueda S., Vacquier V.** Geothermal and geomagnetic data in and around the island arc of Japan // *The Crust and Upper Mantle of the Pacific Area*. *Geophys. Monograph. 12* / Ed. L. Knopoff.— Washington, Am. Geoph. Union: William Byrd Press, 1968.— 522 p.
- Umbgrove J. H. F.** *Pulse of the Earth*.— Hague: Martinus Nijhoff, 1947.— 358 p.
- Vail P. R., Mitchum R. M., jr., Thompson S. III.** Seismic stratigraphy and global changes in sea level. P. 4: Global cycles of relative changes in sea level // *Seismic Stratigraphy: Applications to Hydrocarbon Exploration*. *Amer. Assoc. of Petrol. Geol. Memoir 26* / Ed. C. E. Payton.— 1978.— P. 83—97.
- Van der Linden W. J. M.** Extinct mid-ocean ridges in the Tasman Sea and in the Western Pacific // *Earth Planet. Sci. Lett.*— 1969.— V. 6, N 6.— P. 483—490.
- Veining-Meinesz F. A.** Thermal convection in the Earth's mantle // *Continental drift* / Ed. S. K. Runcorn.— N. Y.— L.: Acad. Press, 1962.— P. 145—176.
- Walcott J. R.** Late quaternary vertical movements in eastern north America: quantitative evidence of glacio-isostatic rebound // *Rev. Geophys.*— 1972.— V. 4, N 1.— P. 10.
- Wegener A.** *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane*.— Braunschweig: Druck und Verlag von Friedr. Vieweg und Sohn Akt. Ges., 1922.— 141 S.
- Yoshii T.** Upper-mantle structure beneath the north Pacific and the marginal seas // *J. Phys. Earth*.— 1973.— V. 21, N 3.— P. 313—328.
- Yuen D. A., Tovish A., Schubert G.** Local non-similarity boundary layers for olivine rheology // *J. Geophys. Res.*— 1978.— V. 83B, N 2.— P. 745—758.
- Zorin Yu. A.** The Baikal rift: an example of the intrusion of asthenospheric material into the lithosphere as the cause of disruption of the lithospheric plates // *Tectonophysics*.— 1981.— V. 73, N 1.— P. 91—104.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От редактора	3
Предисловие	5
Геодинамические аспекты новой глобальной тектоники	7
Основные положения тектоники плит	—
Существующие представления о причинах глобальных тектонических процессов	10
Закономерности фазовых превращений в глубинах Земли	20
Глубинные физико-химические механизмы тектонических процессов	22
Механизм глобального тектогенеза	—
Механизм образования и развития континентальных рифтов	36
Механизм субдукции литосферных плит и происхождение окраинных бассейнов	41
Характерные черты структуры и динамики земной коры, объясняемые предложенным механизмом тектогенеза	50
Цикличность глобального тектогенеза	51
О причинах асимметрии распределения континентов и океанов на поверхности Земли	52
О причинах цикличности тектономагматической активности	54
Связь трансгрессий и регрессий Мирового океана и климатической цикличности с глобальным тектогенезом	56
Заключение	60
Литература	63

Виталий Алексеевич Киркинский

**МЕХАНИЗМ И ЦИКЛИЧНОСТЬ
ГЛОБАЛЬНОГО ТЕКТОГЕНЕЗА**

Утверждено к печати
Институтом геологии и геофизики СО АН СССР

Редактор издательства *Е. И. Тимофеева*
Художественный редактор *М. Ф. Глазырина*
Художник *В. А. Тельных*
Технический редактор *Т. Н. Драгун*
Корректоры *Н.М. Горбачева, В. В. Борисова*

ИБ № 30236

Сдано в набор 01.08.86. Подписано к печати 19.01.87. МН-02205. Формат 60×90¹/₁₆.
Бумага типографская № 1. Обыкновенная гарнитура. Высокая печать. Усл. печ. л.
4.5. Усл. кр.-отт. 4.8. Уч.-изд. л. 5.2. Тираж 1000 экз. Заказ № 292. Цена 80 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука», Сибирское отделение,
630099, Новосибирск, 99, Советская, 18.
4-я типография издательства «Наука», 630077, Новосибирск, 77, Станиславского, 25.