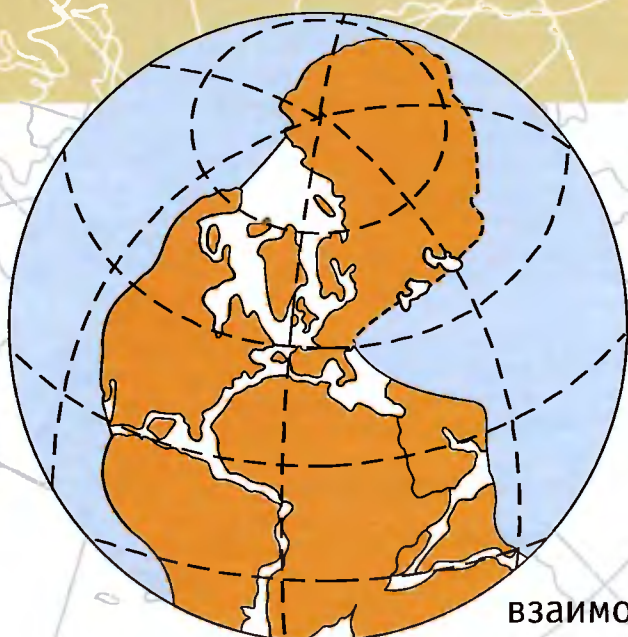


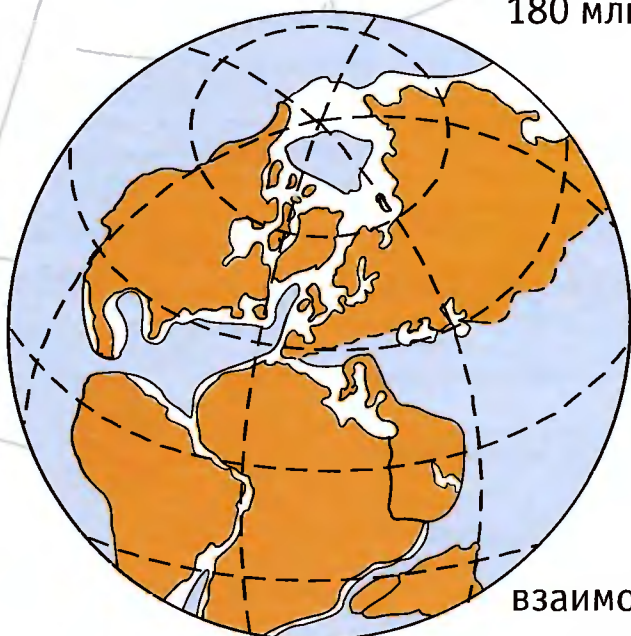
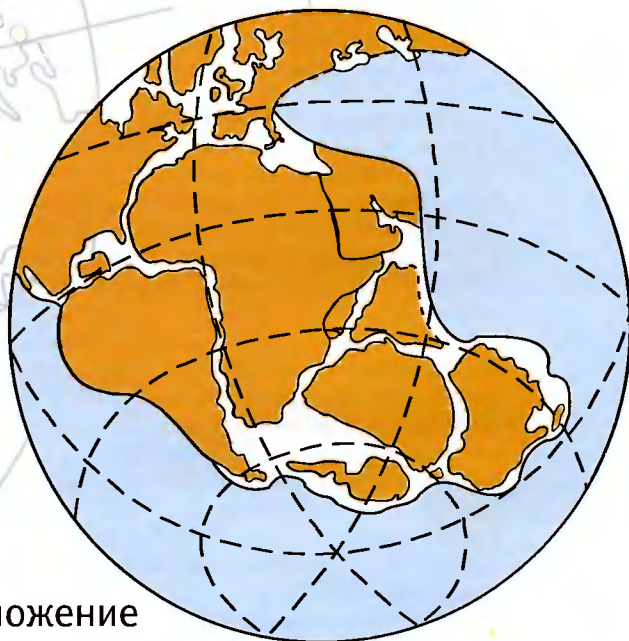
ГЛАВА 4

БЕСПОКОЙНАЯ ЛИТОСФЕРА

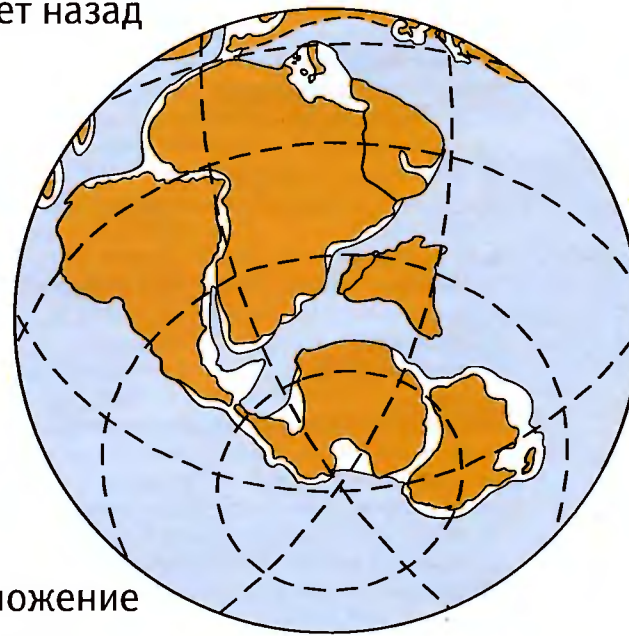
"Всегда ли, море, ты почило
В скалах, висящих надо мной?
Или неведомая сила,
Вражду с мирной тишиной,
Не раз твой образ изменила?"
А. Полежаев



взаимоположение
континентов
180 млн. лет назад

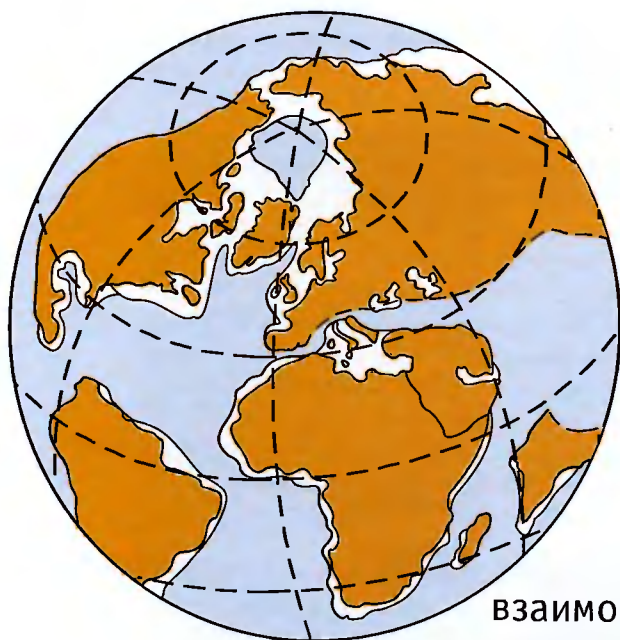


взаимоположение
континентов
120 млн. лет назад

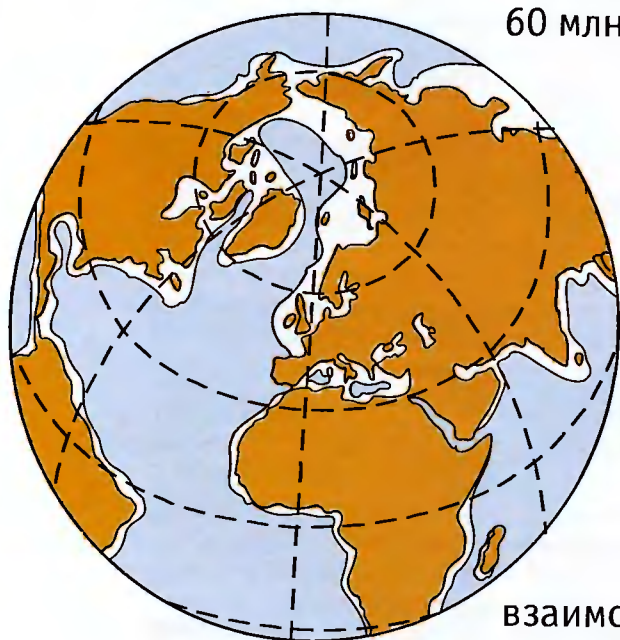
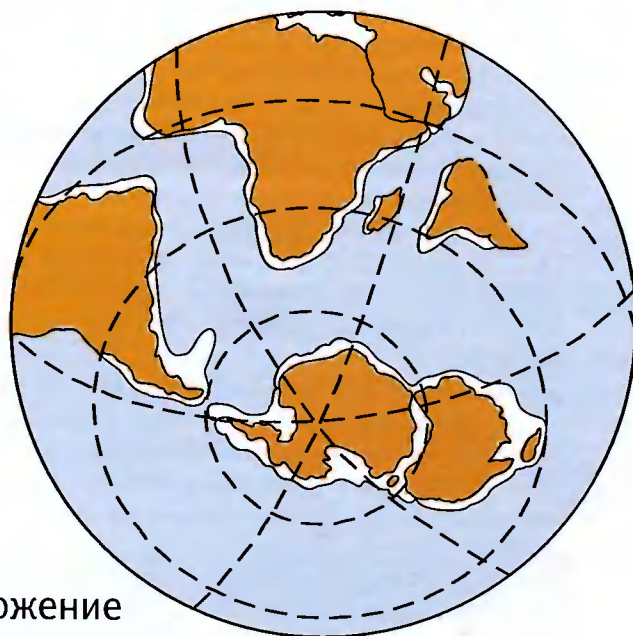


Литосфера, эта сравнительно жесткая внешняя скорлупа нашей планеты, отнюдь не является чем-то неизменным и застывшим, она вся охвачена интенсивным перемещением материала - тектоническими движениями. Благодаря им воздымаются высочайшие горы, сминаются в самые сложные и причудливые складки мощные толщи горных пород, происходят разрушительные землетрясения и даже меняется расположение континентов и конфигурация разделяющих их океанов. Естественно, у ученых давно возник вопрос, что же является первопричиной этих явлений, что выступает главной движущей силой, изменяющей лик нашей планеты. Эта глава и посвящена рассказу о том, как развивались научные представления о характере и причинах тектонической эволюции Земли - от ранней и кажущейся сегодня очень наивной гипотезы нептунизма до господствующей в современной науке теории тектоники литосферных плит.

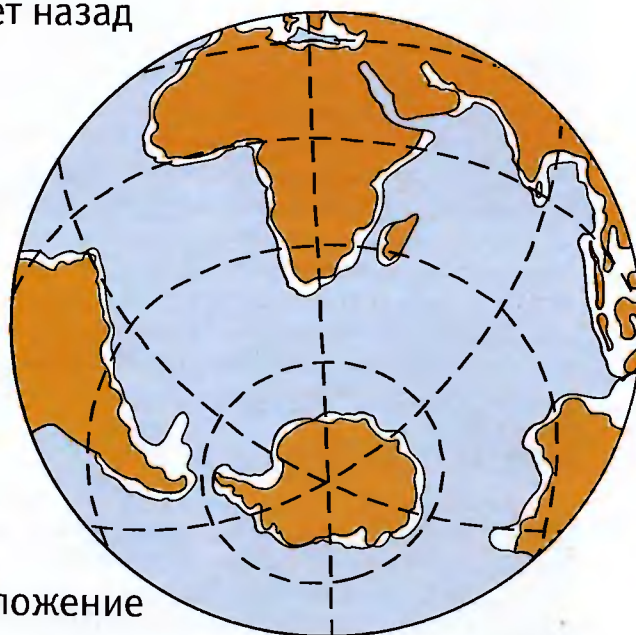
/Показано по данным Э. Ирвина/



взаимоположение
континентов
60 млн. лет назад



взаимоположение
континентов
в настоящее время



"МЕРТВАЯ" ЗЕМЛЯ НЕПТУНИСТОВ

*"Держа в руке живой и влажный шар,
Клубящийся и дышащий как пар,
Лоснящийся здесь зеленым, там костью,
Струящийся, как жидкий хрисолит,
Он говорил, указывая тростью:*

*Пойми земли меняющийся вид:
Материков живые сочетанья,
Их органы, их формы, их названья
Водами Океана рождены. ..."*
М. Волошин

Первой общей теорией тектонической эволюции нашей планеты стала концепция непутизма, разработанная в конце XVIII столетия немецким геологом, профессором Фрайбергской горной академии Абраамом Готлибом Вернером (1749-1817). Свое название она получила по имени древнеримского бога моря - Нептуна, так как отправным моментом этой концепции была идея о том, что изначально вся поверхность Земли была покрыта очень глубоким океаном, содержащим в своем составе огромные массы растворенных и взвешенных веществ. Впоследствии эти вещества выпадали в осадок, накапливались на дне первичного океана, уплотнялись, затвердевали и превращались в горные породы. Химический состав осадков со временем изменялся, и поэтому они давали начало самым разным горным породам. В дальнейшем уровень океана понизился, и наиболее возвышенные части дна выступили над водной поверхностью в виде островов и континентов.

Однако, уже в XVIII веке было хорошо известно, что горные породы земной коры хранят свидетельства крупных деформаций, которые они претерпели. Многочисленные складки и разломы со всей очевидностью указывают на интенсивные движения, имевшие место в земной коре. Что являлось причиной этих движений? Профессор Вернер и его сторонники объясняли их неравномерной просадкой того материала, который отложился на дне первичного океана. **Именно просадке горных пород отводилась в концепции непутизма роль главной движущей силы в тектоническом развитии Земли.**

Глубокие недра нашей планеты, находящиеся под слоем выпавших осадков, представлялись непутистам холодными и тектонически "мертвыми". Даже существование вулканов, казалось бы неоспоримо свидетельствовало о том, что недра нашей планеты весьма горячие, непутисты объясняли локальными подземными пожарами в угольных пластах, приводящими к местному расплавлению горных пород.

Горные породы, которыми сложено первичное твердое тело планеты, по мнению непутистов, нигде не выходили на поверхность, так как были повсеместно погребены под мощным слоем осадков, выпавших из вод древнего океана, покрывавшего всю земную поверхность. Все обнажающиеся на земной поверхности горные породы, по мнению Вернера и его последователей, являются либо непосредственно выпавшими из океанических вод химическими осадками, либо продуктами их переработки (например, механического переотложения). Осадочными породами считались даже граниты и базальты. При этом граниты рассматривались как наиболее ранние осадки, первыми отложившимися на дно океана. Все остальные породы считались отложившимися позже и этим непутисты объясняли тот факт, что в геологических разрезах граниты обычно лежат ниже остальных пород.

В настоящее время концепция непутизма кажется наивной и представляет интерес лишь с точки зрения истории познания. Однако в конце XVIII столетия она была доминирующей в науках о Земле, так как давала вполне логичную картину геологического развития планеты. Правда, концепция непутизма не могла объяснить, куда исчезли огромные объемы воды первичного океана, но зато, как казалось, хорошо согласовывалась с имевшимися в то время наблюдениями обнажений горных пород, особенно с наблюдениями, сделанными в Саксонии, где жил и работал сам Абраам Вернер. Выводы, сделанные для одной сравнительно небольшой территории, опрометчиво распространялись на всю поверхность земного шара.

ВСЕ ПОРОДЫ ОСАДОЧНЫЕ?

По мнению Вернера и его последователей Земля первоначально представляла собой твердое тело с сильно расчлененным рельефом, полностью затопленное очень глубоким океаном (а). Затем, из перенасыщенной различными веществами воды отложился мощный слой гранитных осадков, повсеместно перекрывший дно первичного океана (б). После выпадения гранитов состав растворенных в воде веществ изменился, а следовательно изменился и состав выпадающих осадков. Граниты, отложившиеся первыми, образовали своего рода фундамент для всех более поздних пород: известняков, солей, базальтов и многих других (в). В результате неравномерной

просадки и давления вышележащих слоев, толщи горных пород деформировались и приобретали складчатый облик (г). После опускания уровня океана некоторые наиболее возвышенные участки его дна выступили над поверхностью воды в виде островов и континентов (д). Повышенные участки суши подвергались эрозии за счет размыва реками. Перенесенный ими материал откладывался в нижерасположенных районах и образовывал толщи переотложенных осадочных пород (песчаников и др.). При этом в результате сноса вышележащих пород на поверхности суши обнажались все более и более глубокие слои первичных "осадков" вплоть до гранитов (е). Поднятия и опускания уровня океана, согласно теории Вернера, происходили неоднократно, что сопровождалось затоплением и осушением невысоких частей островов и континентов, а также размывом и отложением новых осадков.

МОРСКИЕ ПОРОДЫ НА СУШЕ

То, что многие участки суши некогда в прошлом были затоплены морем, хорошо понимали еще древние греки. Уже в VI в. до н.э. Ксенофан из Колофона (около 570 - после 478 гг. до н.э.) утверждал, что встречающиеся на суше вдали от берега морские раковины оказались там потому, что раньше эти участки находились ниже уровня моря. В III в. до н.э. Эратосфен обнаружил огромное количество морских раковин в Верхнем Египте - в 600 км от берега моря. Живший на стыке эр летоисчисления выдающийся древнеримский географ Страбон (63 гг. до н.э. - 23 н.э.) зафиксировал убедительный пример вертикального движения суши относительно уровня моря, происходящего прямо "на глазах" - город Спина, некогда бывший морским портом, уже во времена Страбона находился в 18 км от берега.

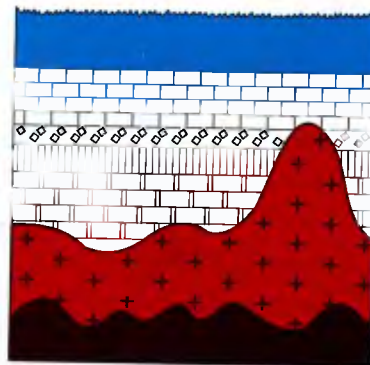
Древние, однако, не могли даже представить, насколько величественными могут быть вертикальные перемещения суши относительно моря. В настоящее время осадочные породы морского происхождения отмечены во многих высокогорных районах. Даже высочайшая вершина мира - гора Эверест (высота 8848 м) сложена породами, содержащими окаменелые раковины древних моллюсков.



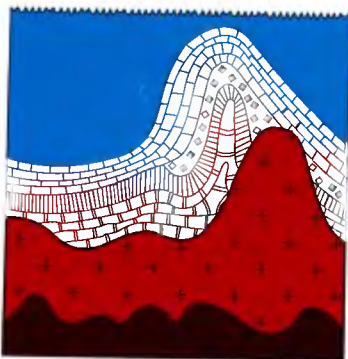
а)



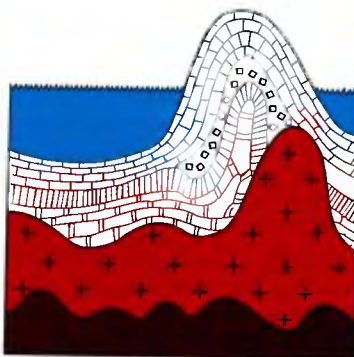
б)



в)



г)



д)



е)

ПЛУТОНИЗМ, ИЛИ ЖАРКИЕ НЕДРА ЗЕМЛИ

*"...Земля, к чему шутить со мною:
Одежды нищенские сбрось
И стань, как ты и есть, звездю,
Огнем пронизанной насквозь!"*
Н. Гумилев

В конце XVIII века почти одновременно с непутизмом в геологической науке начала складываться и совершенно иная концепция развития нашей планеты, получившая название "плутонизм". Основные положения новой гипотезы были сформулированы в 1785 году шотландским геологом-любителем Джеймсом Геттоном (1726-1795). Так же как и непутизм, новая концепция получила свое название от имени античного бога, но уже не бога моря, а бога подземного мира - Плутона. Название отражало и суть новой гипотезы: в отличие от непутистов, рассматривавших глубокие недра Земли просто как "мертвый" холодный фундамент, на котором происходило осаждение разнообразных горных пород, **сторонники концепции плутонизма считали, что недра нашей планеты очень горячие. Они утверждали, что именно внутренний жар Земли является первопричиной всего ее тектонического развития.** Действием внутреннего тепла плутонисты объясняли и вулканические извержения, и медленные вертикальные движения суши, и землетрясения.

В отличие от непутистов, которые считали граниты и базальты водными осадками, Геттон и его сторонники утверждали, что эти породы образовались в результате кристаллизации расплавленных магм. Плутонисты не отрицали возможности образования некоторых горных пород за счет химического осаждения из воды, но совершенно справедливо отмечали, что роль таких процессов сравнительно невелика. Подобным путем образуются лишь очень немногие типы горных пород, наиболее распространенными из которых являются известняки.

Естественно, между непутистами и плутонистами разгорелась ожесточенная научная дискуссия, и представители обеих геологических школ пытались добыть новые факты, которые свидетельствовали бы о правоте той или иной концепции. Решающие аргументы в пользу плутонизма были получены в начале XIX века немецким геологом Леопольдом фон Бухом (1774-1853), по иронии судьбы являвшимся одним из самых верных учеников Абраама Вернера. Фон Бух изучил потухшие базальтовые вулканы в Центральной Франции и пришел к выводу, что базальты, образующие там хорошо распознаваемые лавовые потоки, совершенно идентичны базальтам, описываемым Вернером в качестве осадков. Но самое главное, фон Бух обнаружил, что эти вулканы выросли на гранитном основании. Так как граниты считались непутистами самыми первыми осадками, то ниже них не могло быть никаких угольных пластов, с горением которых можно было бы связать образование вулканических лав. Оставалось только признать, что тепло, приводящее к плавлению горных пород и возникновению лав, поступает из глубоких недр планеты.

После открытий фон Буха число сторонников теории Вернера стало сокращаться, хотя дискуссия между непутистами и плутонистами, постепенно стихая, продолжалась еще более четверти века. В 1828 году французский горный инженер Пьер-Луи Кордье (1777-1861) провел специальные измерения в шахтах и установил, что температура земных недр очень быстро повышается с глубиной - в среднем на 1°C при погружении на каждые 33 метра, т.е. на 30°C на один километр. Спор между сторонниками непутизма и плутонизма, вошедший в историю науки как один из "великих геологических споров", закончился. Никто уже не сомневался в том, что недра земного шара очень горячие, и в большинстве выдвинутых с тех пор глобальных тектонических гипотез в качестве первопричины тектонического развития нашей планеты рассматривается ее внутреннее тепло. Однако на протяжении двух столетий в геологической науке не утихают споры о том, каким именно образом внутреннее тепло планеты приводит к мощнейшим тектоническим движениям в ее недрах.

Исследования, выполненные Пьером-Луи Кордье, показывали, что температура недр чрезвычайно быстро возрастает с глубиной, и если темп ее роста не меняется хотя бы в самых верхних слоях земного шара, то уже на глубине 40 км она должна была бы составлять 1200°C ! Как было известно из опытов в плавильных печах, при такой температуре любые горные породы превращаются в расплавы, поэтому многие ученые стали склоняться к мысли, что земные недра находятся в расплавленном состоянии. Отвергнутая идея о холодных тектонически мертвых недрах Земли на какое то время сменялась другой крайностью: представлялось, что под тонкой твердой внешней "литосферой" (каменной сферой) находится "пиросфера" (огненная сфера) - бездонный океан расплавленной магмы.

Такой вывод очень хорошо согласовывался не только с гипотезой магматических поднятий, но и с необычайно популярной в то время гипотезой Канта-Лапласа, связывавшей происхождение Земли с ее конденсацией из горячего газового облака. Наша планета, как тогда казалось, просто не успела полностью затвердеть. В результате остывания на поверхности первоначально расплавленного шара успела образоваться лишь тонкая каменная корка - литосфера, а внутри остался раскаленный расплав - пиросфера.

Однако вскоре представление о расплавленном состоянии земных недр было подвергнуто очень серьезной критике известным французским физиком Андре Мари Ампером (1775-1836). Он указал, что под действием притяжения Луны и Солнца в жидкой пиросфере должны были бы происходить сильные приливы. Воздымающееся и опускающееся в соответствии с движением приливных "горбов" расплавленное вещество пиросферы просто разрушило бы тонкую и хрупкую корочку литосферы, едва та начала бы формироваться. Образующиеся при этом обломки тонули бы в менее плотном расплаве, а вновь зародившаяся на остывающей поверхности расплава корочка ждала бы та же судьба. Таким образом, согласно доводам Ампера, внутренняя раскаленная область Земли - ее пиросфера, должна быть все-таки твердой.

ГИПОТЕЗА "МАГМАТИЧЕСКИХ ПОДНЯТИЙ"

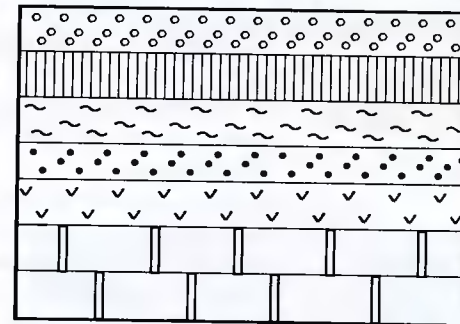
Джеймс Геттон, основоположник концепции плутонизма, и его ближайшие последователи понимали роль внутреннего тепла в тектоническом развитии Земли следующим образом: внутреннее тепло приводит к плавлению глубинных горных пород, а образовавшаяся магма внедряется в вышележащие слои земной коры и давит на залегающие выше горные породы. Если первоначально слоистые толщи горных пород залегают ровно (а), то под давлением магмы они сминаются в складки, а на поверхности образуются купола или вытянутые хребты (б). После того как эрозия в какой-то мере разрушит горные хребты, в их осевых частях обнажаются магматические (как правило, гранитные) "ядра" гор (в). Эта гипотеза получила название гипотезы магматических поднятий. Главной причиной тектонических движений в ней считалось давление расплавленных магм на вышележащие породы.

Гипотеза магматических поднятий, казалось бы, находила подтверждение в некоторых горных районах - например, в Альпах, и на Урале, где вдоль осей этих горных систем на дневную поверхность выходят крупные гранитные массивы. Однако вскоре было установлено, что со многими горными цепями никакие магматические породы пространственно не связаны, а некоторые из гранитных массивов, находящихся в осевых частях горных хребтов, как выяснилось, оказались более древними, чем вышележащие слоистые толщи, и поэтому внедрение этих гранитов не могло быть причиной смятия в складки еще не существовавших пород. Под давлением новых фактов гипотеза магматических поднятий потеряла свою убедительность, и ее сменили другие гипотезы.

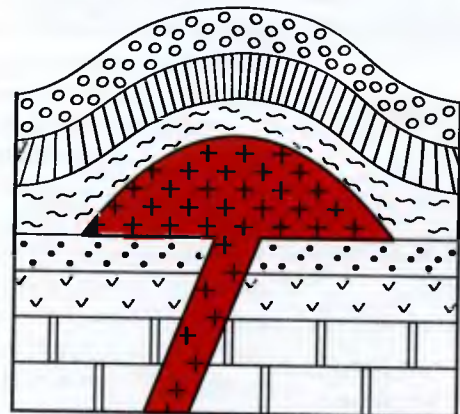
"КОНТРАКЦИОННАЯ" ГИПОТЕЗА

После гипотезы магматических поднятий долгое время наиболее популярной была так называемая "контракционная" гипотеза, которую предложил в середине XIX века французский геолог Леонс Эли де Бомон (1798-1874). Свое название эта гипотеза получила от слова "контракция", т.е. сжатие. В ней подразумевалось, что недра Земли хотя и очень горячие, но все же медленно остывают, что приводит к постепенному сжатию нашей планеты. Сравнительно жесткая земная кора вынуждена приспособливаться под новые уменьшающиеся размеры планеты, в результате чего слоистые толщи сминаются в многочисленные складки разных масштабов. Горы в контракционной гипотезе рассматривались, по существу, как самые крупные складки земной коры. Главной причиной тектонических движений в гипотезе Эли де Бомона считалось сжатие нашей планеты в результате ее остывания.

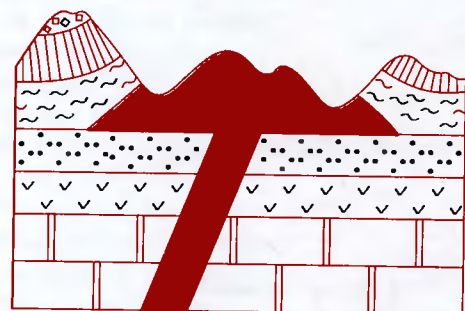
Контракционная гипотеза в разных модификациях просуществовала в науке почти целое столетие, но со временем и она столкнулась с труднопреодолимыми препятствиями. Было установлено, что горообразование далеко не всегда сопровождается образованием складок. Кроме того, геологи получили убедительные свидетельства, что некоторые области земной поверхности испытывают или испытывали в прошлом значительные растяжения. И, наконец, исчезла главная исходная посылка контракционной гипотезы - в настоящее время у науки нет никаких данных, которые свидетельствовали бы о существенном остывании нашей планеты. Несмотря на то, что Земля теряет тепло за счет излучения в космическое пространство, утверждать, что она остывает, нельзя, ведь в недрах нашей планеты происходит и генерация тепла (в первую очередь, за счет распада радиоактивных элементов, и, в меньшей мере, за счет кристаллизации железо-никелевых частиц в расплавленном ядре, а также за счет приливного трения). Тепловой баланс Земли окончательно не установлен, и не исключено, что недра планеты длительное время находятся в постоянном температурном режиме или даже несколько разогреваются.



а)



б)



в)

ДРЕЙФ КОНТИНЕНТОВ

*"...Здесь понимаешь: сроки коротки
И ненадежна наша твердь земная,
Где словно льды, плывут материка
И рушатся, друг друга подминая."*

А. Городницкий

В течение XIX-XX столетий было выдвинуто по меньшей мере два десятка моделей глобального тектонического развития Земли. Почти все они являлись плутонистскими по своей сути, т.е. рассматривали тепло земных недр в качестве первопричины тектонических движений. Однако сколько значительными были эти движения? Испытывают ли блоки земной коры значительные горизонтальные перемещения или же только вертикальные? В соответствии с ответом на эти вопросы **все гипотезы тектонического развития Земли могут быть разделены на две большие группы - фиксистские и мобилистские.** Общей чертой фиксистских гипотез является представление о том, что блоки земной коры не совершают существенных перемещений по поверхности планеты, занимая на ней фиксированное положение - отсюда и название этой группы гипотез. В гипотезах второй группы, напротив, подразумевается, что блоки земной коры по той или иной причине перемещаются в горизонтальном направлении на значительные расстояния, измеряемые тысячами километров. Блоки земной коры считаются подвижными, мобильными - отсюда и общее название второй группы гипотез - мобилистские.

Исторически фиксизм намного "старше" мобилизма. В каком-то смысле он существует столько времени, сколько человек вообще задумывается о планете, на которой живет. Это и неудивительно, так как с точки зрения нашего повседневного опыта совершенно естественно считать, что континенты являются неподвижными. Вопреки своему названию, фиксизм, как научное направление, отнюдь не представлял собой нечто застывшее и неизменное: он прошел долгую и сложную эволюцию, в ходе которой одни фиксистские гипотезы уступали свое место другим. Так, в начале XIX века фиксистская по своей сути концепция непутизма была сменена первой из плутонистских гипотез - гипотезой магматических поднятий, также фиксистской, которая, в свою очередь, в середине XIX века уступила место еще одной фиксистской гипотезе - контракционной. В XX веке контракционная гипотеза столкнулась с рядом непреодолимых трудностей и ее место заняли другие конкурирующие между собой фиксистские концепции, борьба между которыми не прекращается и в наши дни.

Однако в настоящее время фиксизм во всех его разновидностях уже не играет доминирующей роли в мировой геологической науке. Большинство исследователей сейчас придерживаются мобилистских представлений. Становление мобилизма происходило в очень острой научной борьбе, продолжавшейся в течение почти всего XX столетия. Первой мобилистской концепцией, бросившей вызов многовековым фиксистским догмам, была гипотеза, вошедшая в историю науки под названием гипотезы "дрейфа континентов". Автором этой гипотезы по праву считается выдающийся немецкий ученый Альфред Лотар Вегенер (1880-1930). Смутные догадки о том, что континенты могут перемещаться по поверхности планеты неоднократно высказывались и ранее, но именно Вегенеру, выполнившему поистине энциклопедический анализ имевшейся в начале XX века геологической информации, удалось придать этой идее форму стройной и очень эффективной концепции.

В своей гипотезе Вегенер утверждал, что **все континенты в далеком геологическом прошлом составляли единый суперконтинент, названный им Пангея. В дальнейшем этот огромный материк раскололся на несколько частей, которые в виде отдельных континентальных глыб "поплыли" по поверхности планеты в разные стороны.** В таком состоянии, по Вегенеру, Земля находится и в настоящее время - континенты и сейчас продолжают свой величественный дрейф по поверхности нашей планеты.

Свою гипотезу Вегенер выстроил, опираясь на ряд положений, важнейшими из которых являются следующие три:

- во-первых, проанализировав рельеф твердой поверхности Земли, Вегенер пришел к выводу, что изостатически уравновешенные континентальные глыбы, выступают над поверхностью дна океанов так, как если бы они плавали в мантийном материале наподобии айсбергов в воде;

- во-вторых, Вегенер показал, что контуры континентальных глыб хорошо подходят друг к другу, так что из них можно мысленно сложить единый суперконтинент. Это могло означать, что они когда-то действительно составляли единое целое;

- в третьих, оказалось, что при сложении Пангеи некоторые геологические структуры, начинающиеся на одних континентах, находят прямое продолжение на других континентах. Континенты в этом отношении подобны кускам разорванной газеты, при сложении которых совпадают не только их контуры, но и складываются в единый текст разделенные строчки.

Основы своей теории Вегенер впервые опубликовал в 1912 году, однако, вскоре началась Первая Мировая война, и поэтому ученые из других стран смогли широко познакомиться с идеями своего немецкого коллеги только после ее окончания. Став достоянием международной научной общности, эта гипотеза чрезвычайно быстро завоевала очень большую популярность.

КОНТИНЕНТЫ ПОДОБНЫ АЙСБЕРГАМ?

Высота надводной части плоских айсбергов составляет только около 10% от их общей толщины. Это определяется тем, что лед, из которого состоят айсберги, имеет плотность примерно на 10% меньшую, чем плотность воды, в которой айсберги плавают.

Средняя плотность горных пород континентальной коры примерно на 15% меньше, чем плотность непосредственно подстилающих кору мантийных пород. В то же время поверхность континентов имеет среднее превышение над поверхностью дна океанов около 5 км, что составляет примерно 15% от средней толщины континентальной коры. Иными словами, континентальные блоки возвышаются над поверхностью океанического дна так, словно они "плавают" в мантии.

В этой упрощенной модели не учитывается, что на положение поверхности океанического дна влияет как наличие водной массы, оказывающей на дно океана дополнительное давление, так и наличие океанической коры, которая сложена несколько менее плотными породами, чем верхние слои мантии. Однако, принимая во внимание, что эти противоположно направленные эффекты в значительной мере компенсируются, в первом приближении ими можно пренебречь.

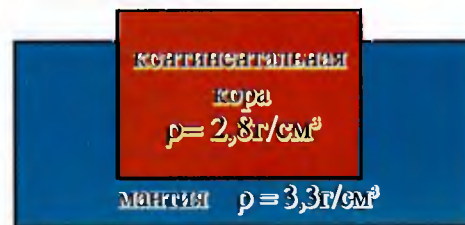
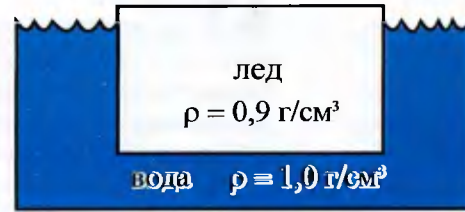
Заметим, что в настоящее время, довольно точно зная толщину континентальной коры, а также среднюю плотность материала континентальной коры и верхних слоев мантии, нетрудно прийти к аналогии между континентальными блоками, "плавающими" в мантии, и айсбергами, плавающими в воде. Однако в начале века эти параметры были известны весьма приблизительно, и Вегенер первоначально пришел к такой аналогии, основываясь на том, что поверхность твердого тела Земли имеет два резко преобладающих по частоте встречаемости уровня (+100 м на континентах и - 4700 м в океанических районах). Никто из ученых не мог найти этому удивительному факту удовлетворительного объяснения, до тех пор пока Вегенер не догадался, что "на материках, с одной стороны, и на дне океанических впадин - с другой, мы имеем дело с двумя различными оболочками земной коры, которые, образно выражаясь, ведут себя как открытая вода и большие ледяные поля". Вегенер был первым из ученых, кто постулировал наличие двух принципиально различных типов земной коры - океанической и континентальной, и эта блестящая догадка получила в дальнейшем убедительные подтверждения.

Аналогия между континентами и айсбергами произвела сильное впечатление на современников Вегенера, однако, забегая вперед, заметим, что она оправдывается лишь отчасти. В действительности, блоки континентальной коры отнюдь не плавают в мантии, а, наоборот, прочно скреплены с ее самыми верхними слоями. По-существу, в состоянии изостатического равновесия находятся не сами блоки континентальной и океанической коры, а соответствующие им по площади части континентальной и океанической литосферы, что, впрочем, приводит к такому же превышению поверхности континентов над поверхностью дна океанов, как и в айсберговой модели.

СОВМЕЩЕНИЕ КОНТУРОВ КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ГЛЫБ

Еще в 1620 году английский философ Фрэнсис Бэкон (1561-1626) обратил внимание на удивительное сходство очертаний атлантических берегов Африки и Южной Америки, отметив, что это нельзя считать простым совпадением. Позднее, в середине XIX века, были высказаны первые догадки, что эти два континента некогда составляли единый массив суши, в дальнейшем распавшийся на две расходящиеся в разные стороны части, но эти идеи не привлекли к себе серьезного внимания и были забыты. В 1910 году на сходство очертаний береговых линий по обеим сторонам Атлантики обратил внимание Альфред Вегенер, что и послужило для него первотолчком к созданию теории дрейфа континентов. Так как любая картографическая проекция в той или иной мере искажает контуры географических объектов, то Вегенер и его последователи совмещали контуры континентов, а точнее континентальных глыб, на глобусе. Гипотетические положения континентов в древние эпохи получили название "палеореконокструкций", или просто "реконструкций". В 1965 году английский геофизик Э. Буллард выполнил первые компьютерные реконструкции.

Заметим, что еще со времен Вегенера контуры совмещаемых континентальных глыб определялись не по береговым линиям, а по границам мелководных шельфов, так как последние, по-существу, являются притопленными краями блоков континентальной коры.



- | | | |
|----|----|--|
| а) | б) | - континентальные глыбы (а - современная суша; б - шельфы) |
| | | - разрывы |
| | | - перекрытия |
| | | - впадины |

ЗАБВЕНИЕ И ВОЗРОЖДЕНИЕ ИДЕЙ МОБИЛИЗМА

Гипотеза дрейфа континентов, выдвинутая Альфредом Вегенером, буквально потрясла весь научный мир и в течение двадцатых годов находилась в центре всеобщего внимания. Хотя Вегенеру не удалось объяснить, почему первичный суперконтинент раскололся на несколько фрагментов, и почему эти фрагменты стали расходиться по земной поверхности в разные стороны, но факты, приведенные немецким ученым, убедительно свидетельствовали о том, что единый суперконтинент действительно когда-то существовал. У гипотезы континентального дрейфа появилось много горячих сторонников, считавших доводы Вегенера бесспорными.

Однако у этой гипотезы появились и ярые противники, которые привели против нее несколько контраргументов. Во-первых, оставалось непонятным, какие исполинские силы могли привести в движение такие огромные объекты, как континенты. Это отмечал и сам Вегенер, однако он нисколько не сомневался, что со временем природу этих сил удастся понять. Разумеется, отсутствие объяснения какого-либо явления не может служить основанием для отрицания самого явления, тем не менее, вопрос о движущих силах континентального дрейфа оставался нерешенным.

Во-вторых, теоретическими расчетами было показано, что перемещение блоков континентальной коры по поверхности мантии без наличия какой-либо "смазки" физически невозможно из-за неизбежно возникавшего бы при этом огромного трения. Выдвинутое мобилистами предположение, что в роли такой "смазки" выступают горные породы, расположенные на границе коры и мантии и находящиеся из-за высокой температуры в очень пластичном состоянии, не подтвердилось расчетами.

В-третьих, было установлено также, что в районах некоторых окраин континентов, особенно там, где развиты вулканические цепи, происходят землетрясения, очаги которых находятся на очень больших глубинах - в отдельных случаях до 700 км. Такая пространственная приуроченность явлений, происходящих столь глубоко в мантии, к совершенно определенным структурам, отчетливо выраженным на поверхности континентов (ныне называемым активными континентальными окраинами), не согласовывалась с представлением, что континенты свободно "плывут" по поверхности мантии, а, следовательно, не должны быть каким-либо образом связаны с ее глубинными зонами.

И, наконец, в-четвертых, критики гипотезы Вегенера отмечали и то, что в случае, если бы материки действительно "плыли" по поверхности мантии, то перед краями надвигающихся континентов мантийный материал должен был бы нагромождаться в виде крупных валов. Движение материков должно было бы приводить к так называемому "бульдозерному" эффекту, но ничего подобного на дне океанов не наблюдалось.

Возникшие перед гипотезой Вегенера проблемы многим ученым показались неразрешимыми, и хотя ни один из главных фактов, положенных в ее основу, не был опровергнут, дрейф континентов был объявлен мифом, фантастической выдумкой, не имеющей ничего общего с действительностью. Сам Вегенер в 1930 году погиб во время экспедиции в Гренландию, а его научные идеи через некоторое время потеряли почти всех своих сторонников. Несмотря на то, что в рамках фиксизма, подразумевавшего неподвижность континентов, никто, по существу, не мог каким-либо правдоподобным образом объяснить ни совпадение контуров континентальных глыб, ни продолжение геологических структур с одних континентов на другие, фиксистские гипотезы на три десятилетия вернули себе господствующее положение в геологической науке.

Ситуация стала меняться только в конце пятидесятых годов, когда были проведены широкие палеомагнитные исследования в разных регионах мира. Палеомагнитные методы предоставили ученым возможность определять, какое положение относительно географических полюсов планеты занимал тот или иной континент в прошлом. Правда, первоначальной целью этих исследований была отнюдь не проверка идеи о дрейфе континентов, которые считались неподвижными, а изучение характера движения полюсов по земной поверхности.

Результаты палеомагнитных исследований оказались совершенно неожиданными: пути движения полюсов планеты, определенные по данным с различных континентов, не совпадали! Интерпретировать это можно было лишь одним образом: допустить, что по поверхности планеты перемещаются сами континенты. Внимание научных кругов вновь оказалось привлечено к почти забытым представлениям Вегенера и его последователей.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПАЛЕОМАГНИТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В состав горных пород входят некоторые минералы, являющиеся сильными ферромагнетиками (прежде всего, магнетит Fe_3O_4). Каждое зернышко магнетита и других ферромагнитных минералов представляет собой маленький постоянный магнит, который во время своей кристаллизации намагничивается внешним магнитным полем (т.е. магнитным полем Земли в данной точке) и тем самым "запоминает" его.

К счастью для науки, "запоминание" магнитного поля происходит не мгновенно, а растягивается в медленно

остывающих магматических породах на десятки тысяч лет. За это время вследствие западного дрейфа (см. раздел 3.1) геомагнитное поле успевает совершить несколько "оборотов" вокруг земной оси, поэтому горная порода "запоминает" направление не на какой-либо из мгновенных магнитных полюсов, а направление на их среднее положение, соответствующее истинному географическому полюсу.

Для проведения палеомагнитных исследований отбираются образцы горных пород, при этом регистрируется их пространственная ориентация. Затем в лаборатории определяется направление собственного магнитного поля образцов, которое соответствует направлению из точки отбора образцов на истинный географический полюс для той геологической эпохи, в которую произошло образование горных пород.

Палеомагнитные исследования позволяют определить также и примерное расстояние до полюса. Дело в том, что изменения магнитного наклоения на земной поверхности носят закономерный характер, и от значения угла I (см. раздел 3.1) в принципе можно перейти к значению так называемой магнитной широты, т.е. выраженного в угловых градусах расстояния от магнитного экватора до места наблюдения. Так как медленно остывающие магматические горные породы "запоминают" земное магнитное поле, осредненное за длительный интервал времени, то от "записанного" в магнитной "памяти" горной породы среднего значения магнитного наклоения можно перейти к истинной географической широте места отбора образца в соответствующий геологический период. Заметим, что значение древней долготы с помощью палеомагнитных методов не определяется.

Установив направление, в котором находился географический полюс, а также расстояние до него, легко определить и в какой точке земной поверхности находился географический полюс в соответствующую геологическую эпоху. Ошибка таких определений при их многократном повторении на разных образцах составляет обычно всего лишь несколько дуговых градусов.

Разумеется, для выполнения палеомагнитных исследований необходимо, чтобы изучаемые горные породы или оставались недеформированными с момента своего образования, или чтобы деформации, если они происходили, можно было учесть и мысленно восстановить первичное положение пород.

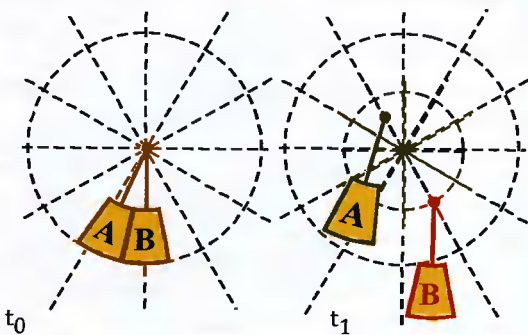
РЕЗУЛЬТАТЫ, КОТОРЫХ НИКТО НЕ ОЖИДАЛ

Магнитная "память" горных пород может сохраняться в течении сотен миллионов и даже миллиардов лет, и это позволяет проследить, как менялось положение географического полюса на земной поверхности вплоть до очень далеких геологических эпох. Например, для того, чтобы выяснить, где именно на поверхности нашей планеты находился ее северный полюс 500 миллионов лет назад, надо собрать результаты всех палеомагнитных исследований, выполненных для образцов этого возраста, нанести на карту все отдельные определения положения древнего полюса, а затем найти их среднее положение. То же самое можно сделать и для образцов, имеющих какой-либо другой возраст. В результате можно проследить как перемещался полюс по поверхности Земли в течение древних геологических эпох, прежде чем занял свое современное положение.

Совершенно неожиданно выяснилось, что траектории перемещения полюса по поверхности Земли, определенные по результатам палеомагнитных исследований, выполненных на разных континентах, оказались совершенно различными. Казалось бы, что все образцы одного возраста, независимо от того, в каком регионе они были отобраны, должны были бы показывать одно и то же положение древнего полюса, что, кстати, и наблюдается в пределах отдельных континентов. Несовпадение положений древних полюсов, определенных по образцам, отобранным на разных континентах, выглядело парадоксальным в рамках фиксистских теорий. Действительно, не могло же у Земли быть сразу несколько северных полюсов одновременно!

Кажущееся противоречие, однако, легко разрешалось в рамках мобилизма, что можно понять на следующем условном примере. В момент времени t_0 магнитная "память" горных пород континентов А и В зафиксировала положение древнего полюса относительно этих континентов. После этого оба континента, являющихся носителями магнитных "записей", переместились по земной поверхности, и поэтому положения древнего полюса, определенные по образцам, отобраным на разных континентах, в нынешний момент времени t_1 не совпадают.

Получила дополнительное подтверждение и идея существования в далеком прошлом крупных суперконтинентов. Установив для одной и той же древней эпохи значение географических широты в нескольких пунктах, можно в пределах отдельных современных континентов провести линии древних параллелей (но не меридианов!). При реконструкции суперконтинентов древние параллели, начинающиеся на одних современных материках, находили (с учетом ошибки определения) прямое продолжение на других.



ПОДКОРОВЫЕ ТЕЧЕНИЯ, МАНТИЙНАЯ КОНВЕКЦИЯ И РАЗРАСТАЮЩИЕСЯ ОКЕАНЫ

"Погоня за идеей - занятие столь же захватывающее, как и погоня за китом"
Генри Норрис Рассел

Результаты палеомагнитных исследований, полученные в конце пятидесятих годов, стали новым серьезным аргументом в пользу идеи перемещения материков по поверхности планеты. Внимание многих ученых вновь привлекла почти забытая гипотеза континентального дрейфа. Заметим, что за три десятилетия, прошедших после гибели Альфреда Вегенера, его оставшиеся очень немногочисленные последователи смогли наметить пути решения проблем, с которыми когда-то столкнулась гипотеза дрейфа континентов. В частности, многие аргументы против гипотезы Вегенера можно было снять, если допустить, что верхние слои мантии не остаются неподвижными, а подвержены медленным горизонтальным течениям. Эти гипотетические течения, происходящие под земной корой, получили название "подкорковых течений".

Сама по себе идея подкорковых течений в мантии была не нова: она была впервые высказана вне всякой связи с континентальным дрейфом еще до того, как Вегенер разработал свою гипотезу. Позднее, опираясь на эту идею, один из самых ярких сторонников Вегенера, южноафриканский геолог **Александр дю Тойт (1878-1948)** высказал предположение о том, что в мантии происходит **тепловая конвекция**, подобная той, что происходит в котле с подогреваемой жидкостью. Несмотря на то, что вещество мантии находится в твердом состоянии, конвективные движения в ней с физической точки зрения вполне допустимы. Ведь текут же, причем очень быстро, ледники: иногда скорость льда в горных ледниках может превышать 1 метр в сутки. Известно, что текут и стекла, правда, их течение становится заметным лишь спустя столетия. Поэтому в масштабах геологического времени, измеряемого десятками и сотнями миллионов лет, вполне можно допустить, что текут и породы мантии.

Представление о том, что вещество мантии охвачено конвективными движениями, которые в верхних ее слоях проявлены в виде горизонтальных подкорковых течений, позволяло разрешить по крайней мере три из четырех главных проблем, с которыми столкнулась гипотеза дрейфа континентов. Во-первых, не надо было объяснять невозможное с физической точки зрения движение блоков континентальной коры по поверхности мантии. В рамках гипотезы о подкорковых течениях представлялось, что континентальные глыбы просто пассивно "лежат" на поверхности мантии, которая движется сама. Во-вторых, не надо было объяснять и отсутствие "бульдозерного" эффекта перед надвигающимися континентами. Ведь согласно новой гипотезе материка и прилегающие к ним участки океанического дна, увлекаемые одними и теми же конвективными потоками, движутся по поверхности Земли с одной и той же скоростью, а, следовательно, они неподвижны друг относительно друга. И, наконец, в-третьих, появилось вполне приемлемое объяснение того, что именно приводит к движению материков - представлялось, что таинственной первопричиной, которая перемещает континенты по поверхности земного шара, является глобальная конвекция мантийного вещества.

Представление о существовании подкорковых течений в значительной мере парировало аргументы противников идеи континентального дрейфа, однако, оно требовало каких-то объективных подтверждений. Многим ученым стало понятно, что доказательства реальности подкорковых течений, мантийной конвекции и движения материков надо искать не на континентах, а на дне океанов.

Очень серьезным шагом на пути решения этих проблем стала гипотеза разрастания океанического дна, объяснявшая происхождение загадочных срединно-океанических хребтов, протянувшихся по океаническому дну на десятки тысяч километров. Эту гипотезу в самом начале шестидесятих годов выдвинул американский ученый **Гарри Хёсс**, который **связал существование срединно-океанических хребтов с наличием под ними восходящих потоков мантийной конвекции**. В соответствии с этими представлениями в мантии существуют глобальные охватывающие всю ее толщину конвективные ячейки, устойчивые в течение десятков миллионов лет. Восходящие конвективные потоки приносят из глубин мантии хотя и твердое, но очень горячее вещество. При подъеме к поверхности давление, которому оно подвергается, значительно снижается. Следствием уменьшения давления является частичное плавление этого очень горячего вещества. В результате в мантии на небольшой глубине образуется значительная по размерам область частично расплавленных горных пород. Так как образовавшийся расплав занимает больший объем, чем нерасплавленное мантийное вещество, находящееся на тех же глубинах, то вышележащие горные породы оказываются приподнятыми, что в рельефе океанического дна и находит выражение в виде срединно-океанических хребтов.

Приподнятые горные породы не выдерживают такой сильной деформации и раскалываются. Участки океанического дна, расположенные по разные стороны от образовавшейся зоны трещин, увлекаются растекающимися горизонтальными конвективными потоками мантийного материала и раздвигаются в разные стороны. Возникающие при этом зияния "залечиваются" базальтовыми магмами, внедряющимися из нижележащей области частично расплавленных мантийных пород - к этому, собственно, и сводится процесс новообразования океанической коры. Каждое новое раздвигание приводит к образованию новых зияний, быстро "залечивающихся" поступающими к поверхности порциями базальтовой магмы. Но-

вообразованная океаническая кора затем как на конвейере отодвигается в обе стороны от осевых зон срединно-океанических хребтов, уступая место новым порциям базальтовой магмы.

Этот гипотетический процесс разрастания океанического дна получил название "спрединга" (от английского глагола spread - расширять, распространяться). Предполагалось, что он может происходить в течении десятков и даже сотен миллионов лет, в результате чего возникают огромные площади очень однородной океанической коры, а сами океаны расширяются. Движение же континентов в рамках этой гипотезы представлялось как следствие разрастания разделяющих их океанов.

ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ РЕЛЬЕФА ДНА МИРОВОГО ОКЕАНА

Напомним, что океаническая кора покрывает около 60% земной поверхности (материковые отмели, занимающие в общей сложности около 10% поверхности земного шара, с точки зрения геологии к океаническим регионам не относятся). В пределах площади распространения океанической коры выделяются три главных типа физико-географических областей: океанические равнины, срединно-океанические хребты и глубоководные океанические желоба (расположение хребтов и желобов показано на карте литосферных плит в разделе 4.8). Океанические равнины представляют собой обширные участки океанического дна с преобладающими глубинами от 4 до 6 км. Рельеф дна в районах океанических равнин плавный, правда, он осложнен цепочками вулканов. Срединно-океанические хребты возвышаются над уровнем дна океанических равнин в среднем на 2-3 км. Изредка их вершины выступают над уровнем моря в виде небольших островов (о. Сан-Паулу, о. Вознесения и др.). Лишь в единичном случае срединно-океанический хребет образует крупный массив суши (Исландия). Срединно-океанические хребты составляют единую планетарную сеть общей длиной около 70 тысяч км. Наиболее протяженными срединно-океаническими хребтами являются: Срединно-Атлантический хребет, проходящий вдоль оси Атлантического океана и повторяющий изгибы его берегов; Индийско-Атлантический, Аравийско-Индийский и Австралийско-Антарктический хребты, соединяющиеся в середине Индийского океана и разделяющие его на три части; Тихоокеанско-Антарктический хребет и Восточно-Тихоокеанское поднятие (хребет), которые расположены на периферии Тихого океана, но ради единства терминологии также называются срединно-океаническими.

Глубоководные океанические желоба представляют собой длинные и узкие впадины на дне океанов и являются самыми глубокими участками поверхности нашей планеты (до 11 км). Чаще всего глубоководные желоба расположены на периферии океанов (например, Перуанско-Чилийский желоб - вдоль западного берега Южной Америки, или Японский желоб - вдоль восточных берегов Японского архипелага). Иногда глубоководные желоба, наоборот, расположены во внутренних частях океанов вдали от крупных массивов суши (например, Марианский желоб и желоб Кермадек-Тонга, расположенные вдоль одноименных островных дуг). При этом их всегда сопровождает вытянутая с одной стороны от желоба и параллельная ему цепочка небольших островов. Почти все глубоководные желоба расположены в Тихом океане. За его пределами известны только три желоба: Карибский и Скоша - в Атлантике, а также Зондский желоб в Индийском океане.

ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СРЕДИННО-ОКЕАНИЧЕСКИХ ХРЕБТОВ

Срединно-океанические хребты обладают рядом весьма необычных особенностей, долгое время не находивших объяснения. Во-первых, вдоль осевых линий некоторых из этих хребтов располагаются вытянутые, глубокие, узкие впадины, получившие название рифтовых долин. Такого рода долины совершенно не характерны для горных цепей суши. Во-вторых, в осевых зонах срединно-океанических хребтов часто происходят землетрясения слабой и умеренной силы. В-третьих, в этих осевых зонах был зарегистрирован необычно высокий тепловой поток, идущий из земных недр. И, наконец, в-четвертых, срединно-океанические хребты практически не выражены в гравитационном поле, т.е. они находятся в состоянии изостатического равновесия.

Гипотеза спрединга позволила объяснить все эти особенности. Раздвижение океанического дна постоянно приводит к образованию новых трещин, вдоль которых в дальнейшем и происходят многократные и неравномерные подвижки, сопровождающиеся землетрясениями. В некоторых случаях эти подвижки приводят к формированию столь своеобразных структур, как рифтовые долины. Высокий тепловой поток в осевых зонах срединно-океанических хребтов объясняется наличием вблизи поверхности крупной области очень горячих частично расплавленных мантийных пород, а также наличием многочисленных трещин, облегчающих передачу тепла из недр. Отсутствие гравитационного максимума над срединно-океаническими хребтами объясняется тем, что дополнительная масса самих хребтов компенсируется наличием под ними обширной зоны частично расплавленного мантийного вещества, характеризующегося пониженной плотностью.



РЕАЛЬНОСТЬ СПРЕДИНГА

*"Подай мне факт,
к чему мне фактик?
Дай факт,
чтоб он меня потряс!"
Е. Виокуров*

Гипотеза разрастания океанического дна была всего лишь экстравагантной гипотезой, однако вскоре после своего опубликования она получила самые серьезные объективные подтверждения. Из нее следовало, что **возраст коры в разных частях океанов должен быть различным: в осевых зонах срединно-океанических хребтов он должен быть минимальным, то есть близким к современному, а с удалением от хребтов он должен закономерно увеличиваться. Это чисто теоретическое положение гипотезы разрастания океанического дна вскоре было блестяще подтверждено фактами**, вначале косвенными методами - путем интерпретации ряда особенностей магнитного поля в Мировом океане, а затем, после проведения широкомасштабной программы бурения скважин на дне океанов, прямым определением возрастов океанических пород.

В настоящее время реальность спрединга доказана и прямыми высокоточными спутниковыми измерениями расстояний между континентами. Эти измерения, систематически проводящиеся американскими исследователями начиная с 1971 года, показали, что расстояния между опорными геодезическими пунктами, расположенными на разных континентах, действительно изменяются. При этом данные спутниковых измерений находятся в хорошем согласии с оценками скорости спрединга, выполненными на основании анализа возраста океанического дна.

ИНВЕРСИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Еще до того как Гарри Хёсс сформулировал гипотезу разрастания океанического дна, в ходе палеомагнитных исследований континентальных пород разного возраста было неожиданно обнаружено, что в течение геологической истории магнитное поле Земли многократно меняло свою полярность, т.е. южный и северный магнитные полюса скачкообразно менялись местами. Причины скачков полярности (инверсий) геомагнитного поля окончательно не выяснены (по-видимому, они как-то связаны с изменениями характера конвекции во внешнем ядре), но само чередование периодов прямого и обратного поля изучено очень хорошо. Последняя инверсия геомагнитного поля произошла 700 тысяч лет назад. Чередование периодов прямого и обратного магнитного поля за последние 30 млн. лет показано на диаграмме (черное - периоды прямой полярности, белое - периоды обратной полярности).

"МАГНИТНЫЕ ЛЕНТЫ" ИЗ ОКЕАНИЧЕСКИХ БАЗАЛЬТОВ

Океанические базальты, благодаря присутствию в своем составе такого сильномагнитного минерала как магнетит, во время кристаллизации фиксируют в своей магнитной "памяти" направление существовавшего в тот период магнитного поля Земли. Так как, согласно гипотезе спрединга, базальты после своего образования отодвигаются от осей спрединга, то базальтовый слой океанической коры можно рассматривать как своего рода магнитную ленту, на которой записана информация о магнитном поле Земли в древние эпохи. Сам процесс "записи" производится только в осевых зонах срединно-океанических хребтов - там, где в текущий момент времени происходит излияние лав и кристаллизация базальтов. После этого, благодаря спредингу "магнитная лента" отходит в сторону, а записанная на ней информация может сохраняться десятилетиями и даже сотни миллионов лет.

Так как магнитное поле Земли в течение геологической истории многократно претерпевало инверсии, когда северный и южный магнитные полюса внезапно менялись местами, то базальтовая "магнитная лента" океанической коры непременно должна зафиксировать в своей памяти инверсии геомагнитного поля - прямо и обратно намагниченные породы должны чередоваться в виде полос параллельных оси спрединга.

ПОЛОСОВЫЕ МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ В МИРОВОМ ОКЕАНЕ И ИХ ПРИРОДА

Как уже обсуждалось в разделе 3.1, основным компонентом магнитного поля, регистрируемого у поверхности Земли, является так называемое геомагнитное поле, генерируемое в ядре нашей планеты. Геомагнитное поле осложнено наложенными на него магнитными аномалиями, связанными с сильномагнитными горными породами земной коры. Если реальное магнитное поле в каком-либо месте сильнее, чем расчетное геомагнитное, то говорят о положительной магнитной аномалии, а если слабее - то об отрицательной.

Вопрос о природе положительных и отрицательных магнитных аномалий очень сложен и не может быть рассмотрен здесь даже самым беглым образом. В связи с проблемой спрединга заметим лишь, что океанические базальты являются сильномагнитными породами, а знак магнитных аномалий, которые с ними связаны, зависит от того, в эпоху какой полярности геомагнитного поля они образовались. Если базальты образовались в эпоху прямого поля, то современное геомагнитное поле будет усиливаться (положительные аномалии), если же базальты образовались в эпоху обратного поля, то современное геомагнитное поле будет ослабляться (отрицательные аномалии). Так как прямо и обратно намагниченные базальты чередуются в виде полос параллельных зонам спрединга, то и магнитное поле в Мировом океане имеет четко выраженный полосовой характер.

Полосовые магнитные аномалии были впервые обнаружены в конце пятидесятых годов XX века во время ге-

офизической съемки одного из участков на северо-востоке Тихого океана. В континентальных районах подобный характер магнитного поля никогда не отмечался и происхождение этих загадочных полос некоторое время оставалось совершенно непонятным. Но сразу после того, как в начале шестидесятых годов была предложена гипотеза разрастания океанического дна, английские ученые Фредерик Вайн и Драммонд Мэтьюз, а также, независимо от них, канадец Лоренс Морли, догадались, что происхождение полосовых магнитных аномалий связано со спредингом.

Вайн и Мэтьюз отметили также, что если спрединг действительно существует, то полосы магнитных аномалий должны быть симметричными относительно осей срединно-океанических хребтов. Ведь от этих осей одновременно отходят в противоположные стороны сразу две базальтовых "магнитных ленты". Так еще до начала программы глубоководного бурения появилась возможность экспериментальной проверки гипотезы спрединга. Специально проведенная с этой целью магнитная съемка одного из участков Срединно-Атлантического хребта (к юго-западу от Исландии) блестяще подтвердила прогноз Вайна и Мэтьюза - здесь также были обнаружены полосовые магнитные аномалии, и они оказались симметричными относительно оси хребта!

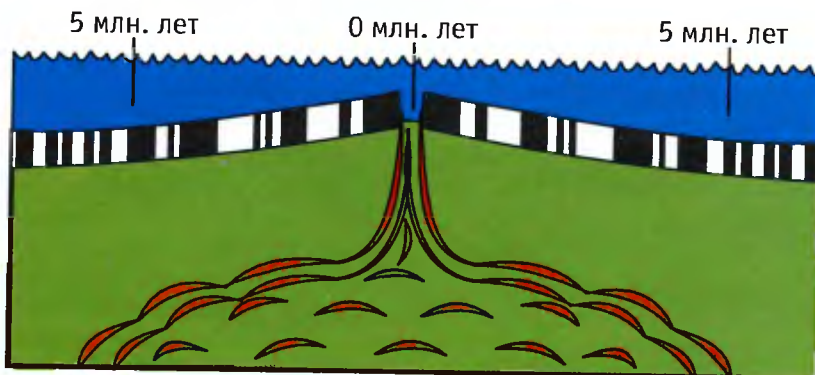
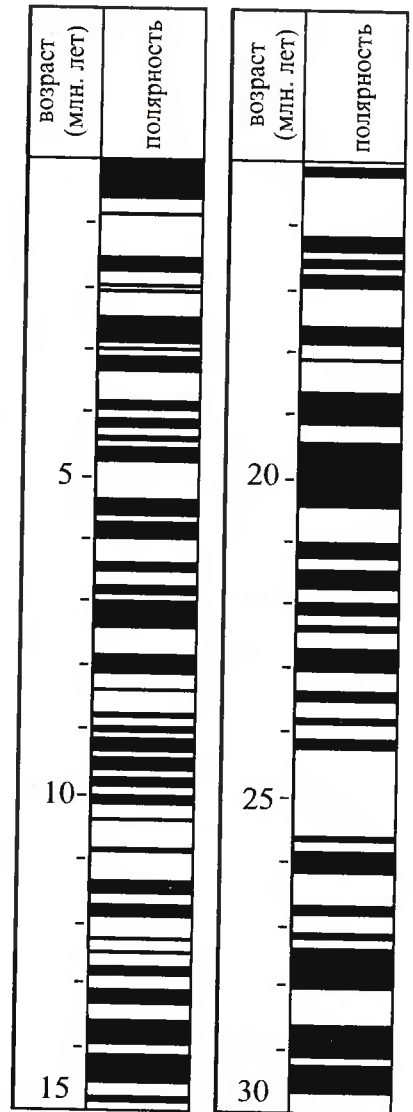
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗРАСТА ОКЕАНИЧЕСКОГО ДНА

К счастью для науки, природа предоставила удивительную возможность определять возраст конкретных участков океанической коры даже без отбора образцов слагающих ее горных пород. Для этого оказалось достаточным только произвести детальную съемку магнитного поля на изучаемом участке. Так как инверсии магнитного поля в течение геологического времени происходили без какой-либо видимой закономерности, то любой интервал времени продолжительностью несколько миллионов лет, как правило, характеризуется своим неповторимым сочетанием продолжительности периодов прямой и обратной полярности. Соответственно, образовавшаяся за это время океаническая кора характеризуется и своим неповторимым сочетанием ширины полос прямо и обратно намагниченных базальтов, а магнитное поле над этими участками коры - соответственным неповторимым сочетанием ширины положительных и отрицательных полосовых магнитных аномалий.

Сочетание ширины полос магнитных аномалий служит своего рода кодом возраста океанической коры, наподобие линейчатой маркировки на различных товарах. Это позволяет определять возраст конкретных участков океанической коры, лишь проведя над ними магнитную съемку с помощью надводных судов. Такой способ дает возможность за короткое время и при сравнительно небольших затратах получить очень детальную карту возраста океанической коры.

СКОРОСТЬ СПРЕДИНГА

Для того, чтобы рассчитать скорость спрединга надо выбрать точку с известными значениями возраста океанического дна, определить расстояние от этой точки до срединно-океанического хребта, а затем это расстояние разделить на значение возраста в исходной точке. Оказалось, что у разных срединно-океанических хребтов скорость спрединга различна. Так, в северной части Срединно-Атлантического хребта скорость двустороннего спрединга составляет около 30 мм/год, в то время как в центральной части Восточно-Тихоокеанского поднятия она превышает 160 мм/год. На первый взгляд, это ничтожно малые скорости, сравнимые разве что со скоростью роста человека, однако, простой расчет показывает, что даже в Северной Атлантике, характеризующейся весьма медленным спредингом, за миллион лет океаническое дно расширяется на 30 км. Если учесть гигантскую продолжительность геологических процессов, измеряемую десятками и сотнями миллионов лет, становится ясно, что разрастание океанического дна имеет огромные масштабы.



РОЖДЕНИЕ НОВОЙ ТЕОРИИ

"От теории как таковой может быть только один прок: она заставляет нас поверить во взаимосвязь явлений."
И. Гёте

К середине шестидесятых годов XX века в геологической науке имелось два противоречивших фиксистским догмам хорошо обоснованных положения - рассмотренные в предыдущих разделах факты указывали, во-первых, что континенты перемещаются друг относительно друга, а, во-вторых, что океаническое дно разрастается в осевых зонах срединно-океанических хребтов. Вместе с тем, оставалась нерешенной старая проблема мобилизма, а именно, приуроченность глубинных землетрясений к активным окраинам континентов. Кроме того, ученые, признавшие реальность разрастания океанического дна, должны были найти ответ и на два новых вопроса: на какой глубине происходит проскальзывание одних мантийных слоев относительно других, а также каким образом происходит компенсация приращения земной поверхности, образующейся в зонах спрединга.

Единой мобилистской теории тектонического развития Земли, которая бы увязала между собой частные тектонические гипотезы и объяснила все важнейшие процессы, происходящие на континентах и в океанах, еще не было. Это можно было сделать только в рамках качественно нового геологического мировоззрения, новой модели глобального тектонического развития Земли. Такой моделью стала родившаяся в середине шестидесятых годов теория тектоники плит.

Сравнительно просто был решен вопрос о глубине, на которой происходит проскальзывание одних слоев мантии относительно других. К началу шестидесятых годов XX века благодаря сейсмическим исследованиям уже было хорошо известно о наличии в верхней части мантии так называемой зоны низких скоростей (см. разделы 3.3 и 3.5), которая интерпретируется как зона, в которой мантийные породы частично расплавлены. И хотя доля расплава в этой зоне оценивается всего лишь в 1%, но этого вполне достаточно, чтобы находящееся там вещество могло играть роль "смазки", по которой и осуществляется скольжение одних слоев относительно других. Более того, расчеты показывают, что к сравнительно быстрому пластическому течению способны и породы, в которых частичное плавление еще не началось, но которые очень близки к этому состоянию. Из этого следует, что зона материала способного к сравнительно быстрому пластическому течению (астеносфера) должна быть несколько шире, чем зона, в которой породы частично расплавлены (зона низких скоростей). **Таким образом, расположенная в верхней части мантии астеносфера вполне подходит на роль слоя "смазки", по которой скользит лежащая выше жесткая литосфера.** Заметим, что сами термины "астеносфера" и "литосфера" появились в науках о Земле еще в XIX веке, но в шестидесятые годы XX века они приобрели новое смысловое значение.

Итак, литосфера может "скользить" по астеносфере. Правда, если бы литосфера представляла собой единую жесткую оболочку, сплошность которой нигде не была бы нарушена, то континенты, перемещаясь относительно астеносферы, оставались бы неподвижными друг относительно друга. **Изменение взаимного положения континентов друг относительно друга можно объяснить, только допустив, что они принадлежат разным фрагментам литосферы, каждый из которых совершает самостоятельное перемещение по астеносфере. Такие отдельные фрагменты получили название "литосферных плит".**

Установить контуры литосферных плит, во всяком случае в первом приближении, не составляло большого труда. Ведь перемещение плит друг относительно друга должно было приводить к частым землетрясениям на их границах, а к этому времени пространственное распределение очагов землетрясений, происходящих на нашей планете, было уже хорошо изучено. Оказалось, что **эпицентры землетрясений образуют на карте Мира достаточно отчетливые линии, которые делят всю земную поверхность на несколько отдельных областей. Границы этих областей и были интерпретированы как контуры литосферных плит.**

Не заставил себя долго ждать и ответ на вопрос о компенсации приращения земной поверхности. Заметим, что ежегодное приращение поверхности океанического дна в зонах спрединга составляет около 3,5 км², и, соответственно, точно такая же площадь земной поверхности должна была одновременно где-то и исчезать. Анализ всей имевшейся геолого-геофизической информации показал, что единственными участками где это, в принципе, могло бы происходить, являются зоны глубоководных океанических желобов. Помимо очень характерных форм рельефа дна, **зоны глубоководных желобов отличаются от всех остальных океанических и континентальных областей рядом геологических и геофизических особенностей, позволяющих предполагать, что в них происходит погружение одних плит под другие.** Этот гипотетический процесс получил название "субдукция" (от английского слова subduction - погружение). Неизбежным следствием субдукции должно было быть исчезновение части земной поверхности. Таким образом, проблема компенсации ее приращения в зонах спрединга представлялась решенной.

В рамках представлений о глобальных мантийных конвективных ячейках, основы которых были заложены еще Александром дю Тойтом, считалось, что субдукция литосферных плит происходит там, где расположены нисходящие ветви мантийных конвективных потоков. Согласно этой модели расположение зон субдукции на земной поверхности, так же как и расположение зон спрединга, целиком контролируется конфигурацией конвективных ячеек в мантии.

В свете гипотезы субдукции, наконец-то, получала объяснение и проблема глубинных землетрясений на активных окраинах континентов. Давно было известно, что активные континентальные окраины пространственно сопряжены с параллельными им глубоководными океаническими желобами, и теперь становилось ясно, что происходящие здесь землетрясения связаны просто с погружениями одних плит под другие. Так как **плита, погружающаяся в мантию не может сразу же каким-то образом раствориться в ней, то передний край плиты должен проникать на весьма большие глубины (несколько сотен километров), что и является причиной происходящих здесь глубинных землетрясений.**

Так, в середине шестидесятых годов XX века была в главных чертах намечена новая теория тектонического развития нашей планеты, получившая название "тектоника плит".

ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГЛУБОКОВОДНЫХ ОКЕАНИЧЕСКИХ ЖЕЛОБОВ

Важнейшей особенностью зон глубоководных желобов является их сейсмичность. Именно в этих зонах происходят наиболее сильные и наиболее глубинные землетрясения на нашей планете. При этом очаги землетрясений всегда находятся с одной и той же стороны от желоба, а именно, со стороны суши - т.е. континента или островной дуги.

Самое же интересное заключается в том, что глубина очагов землетрясений с удалением от желоба последовательно увеличивается, причем все очаги располагаются примерно на одной плоскости, наклоненной под континент или под островную дугу. Мысленное продолжение этой плоскости вверх пересекает поверхность дна океана как раз там, где располагается глубоководный желоб. Эти закономерности были впервые обнаружены японским сейсмологом Вадати перед самым началом Второй Мировой войны, но широкое признание они получили только после работ американского ученого Хьюго Бенюффа, проведенных в конце сороковых годов. По именам своих первооткрывателей, плоскости, к которым тяготеют очаги землетрясений, называют зонами Вадати-Бенюффа.

Большинство желобов при изображении на карте имеет форму дуги, которая вогнутой стороной обращена к ближайшей суше - континенту или цепочке островов. Склоны желобов, расположенные со стороны суши, всегда круче, чем обращенные к открытому морю, т.е. желоба в профиле асимметричны.

Еще одной характерной чертой почти всех зон желобов является наличие цепочки действующих вулканов с той же стороны от желоба, с которой располагаются континенты или островные дуги. Помимо характерных форм рельефа, сейсмичности и вулканизма зоны желобов обладают еще рядом геологических и геофизических особенностей, которые здесь не рассматриваются.

Различные гипотезы, объяснявшие явления, происходящие в пределах единых тектонических систем "активная континентальная окраина - глубоководный океанический желоб", а также само образование этих систем, существовали и до появления теории тектоники плит. Все эти гипотезы во многом опирались на различные труднопроверяемые допущения, как правило, были весьма сложны и, в целом, довольно малоубедительны, поэтому мы не будем останавливаться на их обзоре. Теория тектоники плит, напротив, объясняет эти явления очень просто и наглядно.

С позиций теории тектоники плит зоны желобов - это участки земной поверхности, где происходят процессы субдукции. Заметим, что субдукции подвергаются океанические участки плиты, тогда как континентальные участки, напротив, остаются "на плаву": блоки континентальной коры имеют сравнительно низкую плотность и играют роль легких "поплавков", которые не дают соответствующим плитам "утонуть" в нижерасположенной мантии. Зона субдукции может разделять и две океанические плиты, при этом субдуцировать будет только одна из них, а другая останется на поверхности.

В обоих случаях, подвергающаяся субдукции плита перед тем как "нырнуть" под другую, прогибается, чем и обусловлено существование желобов в рельефе дна. Субдукция неизбежно сопровождается землетрясениями, при этом плоскость на которой сосредоточены их очаги (зона Вадати-Бенюффа), представляет собой границу между верхней поверхностью погружающейся плиты и наклонным нижним краем плиты, остающейся "на плаву".

В рамках представления о субдукции плит получило свое объяснение и присутствие вулканических цепочек, расположенных параллельно оси желоба со стороны прилегающей суши: погружение одной плиты под другую сопровождается выделением за счет трения большого количества тепла, что приводит к образованию очагов расплавленной магмы над наклонной поверхностью, разделяющей две взаимодействующие плиты. Эти магмы, достигая по разломам земной поверхности, и формируют вулканы, расположенные, как правило, по всей длине зоны субдукции.

Скорость погружения одних плит под другие в различных зонах субдукции оценивается от 5 мм/год до 95 мм/год. В целом, чем выше скорость субдукции, тем более глубокими являются соответствующие желоба, тем глубже в мантию прослеживаются зоны Вадати-Бенюффа, тем интенсивнее протекают вулканические процессы.



Так что же такое литосферная плита? Плита - это достаточно крупный фрагмент жесткой литосферы, который в первом приближении можно считать единым монолитом, не претерпевающим внутренних деформаций. Плита "скользит" по подстилающей ее астеносфере, она непрерывно наращивается в зонах спрединга, и, наоборот, поглощается в зонах субдукции. Движение плит предопределяет перемещение находящихся на них континентов и связанное с этим изменение формы океанов.

Так как важнейшие изменения внешнего облика нашей планеты происходят благодаря движению плит, то с динамической точки зрения, именно плиты (а не континенты и океаны) следует считать главными структурными элементами земной поверхности. Вместе с тем, в масштабе геологического времени конфигурация плит очень изменчива. Границы плит, как будет рассмотрено в разделе 4.10, могут меняться, например, вследствие смещения зон спрединга. Конфигурация плит может изменяться и за счет их раскола. В то же время несколько плит могут прекратить всякие перемещения друг относительно друга и, таким образом, вести себя как единая плита. Некоторые исследователи, в частности, считают, что Североамериканская и Южноамериканская плиты в настоящее время практически неподвижны друг относительно друга, и поэтому их следует рассматривать в качестве единой Американской плиты. Этот конкретный пример, правда, остается дискуссионным, но сама по себе возможность "срастания" нескольких плит в одну не вызывает сомнений. Наконец, общая конфигурация плит претерпевает изменения и за счет того, что некоторые из них полностью поглощаются в зонах субдукции. Такая судьба в недалеком будущем ожидает две крошечных плиты Хуан-де Фука и Горда, расположенные на северо-востоке Тихого океана.

ПЛИТЫ БОЛЬШИЕ И МАЛЫЕ

Современные мобилисты выделяют на нашей планете семь крупных и несколько малых литосферных плит. К крупным плитам относятся Тихоокеанская (около 110 млн. км²), Африканская (около 80 млн. км²), Евроазиатская (около 70 млн. км²), Североамериканская, Антарктическая и Индоавстралийская (каждая примерно по 60 млн. км²), а также Южноамериканская (около 40 млн. км²). Остальные плиты значительно меньше и все вместе занимают площадь около 30 млн. км², что составляет лишь 6% от общей поверхности земного шара. Самой крупной из малых является плита Наска (около 15 млн. км²).

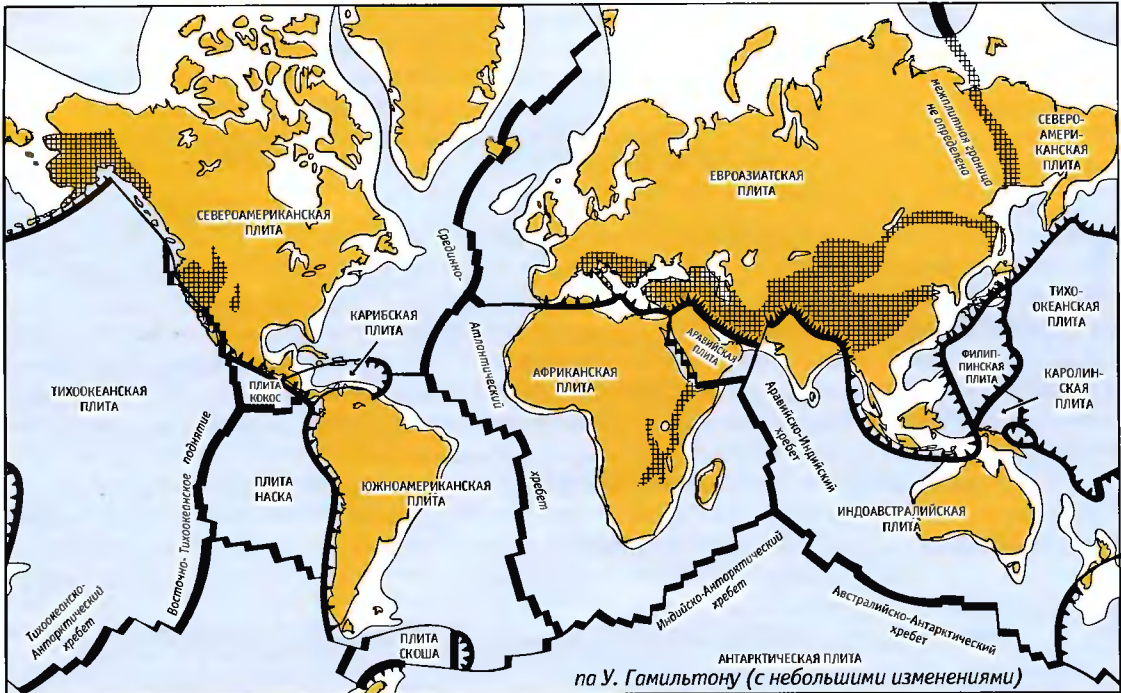
Выделение малых плит разными исследователями проводится по разному. На приводимой в этом разделе карте литосферных плит показан упрощенный вариант их выделения.

ТРИ ТИПА ГРАНИЦ МЕЖДУ ПЛИТАМИ

В зависимости от того, какие перемещения друг относительно друга испытывают соседние плиты, выделяют три типа межплитных границ. Если плиты расходятся в разные стороны (зоны спрединга), то границы называют "дивергентными" (от латинского *divergo* - отклоняюсь, расхожусь). Если плиты, наоборот, сходятся (зоны субдукции и зоны столкновения континентов), то границы называют "конвергентными" (от латинского *convergo* - приближаюсь, схожусь). Если соприкасающиеся участки соседних плит не сходятся и не расходятся, а как бы скользят друг относительно друга параллельными, но противоположными курсами, то такие границы называют "трансформными".

Граница между двумя плитами на разных участках может быть представлена разными типами. В этом отношении наиболее показательны межплитные границы, проходящие по срединно-океаническим хребтам - они состоят из многочисленных звеньев зон спрединга и чередующихся с ними перпендикулярных участков трансформных границ.

КАРТА ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ



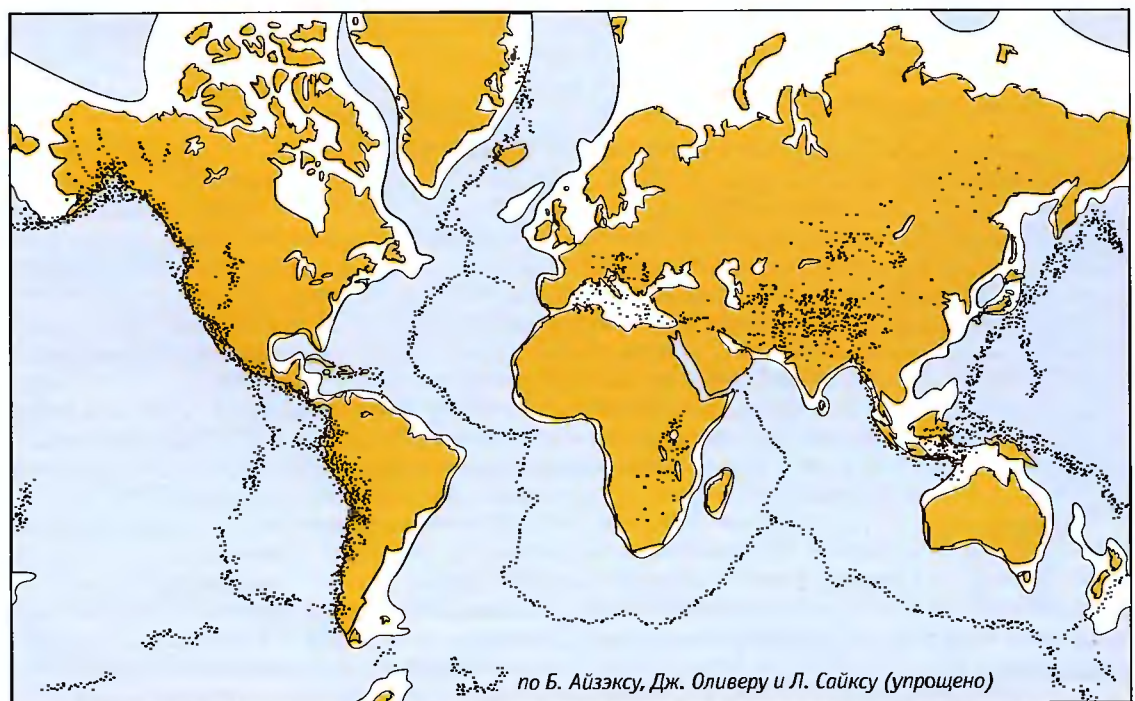
- зоны спрединга (срединно-океанические хребты);
- зоны интенсивного разломообразования на континентальной коре;
- зоны субдукции (глубоководные желоба);
- зоны столкновения континентов;
- трансформные границы;
- | | |
|---|---|
| а | б |
|---|---|

 - континентальная кора (а - суша; б - шельфы);
- | |
|--|
| |
|--|

 - океаническая кора

КАРТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭПИЦЕНТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

На приведенной карте хорошо видно, что эпицентры землетрясений (показаны точками) распределены на земной поверхности очень неравномерно. Чаще всего они выстраиваются в четко выраженные линии, которые маркируют границы между плитами. Сейсмическая активность в зонах субдукции значительно выше, чем в зонах спрединга.



СКВОЗЬ ПРИЗМУ НОВОЙ ТЕОРИИ

"Разум..."

*Вспять исследил все звенья мироздания,
Разъял вселенную на вес и на число,
Пророс сознанием до недр природы,
Вник в вещество, впился, как паразит,
В хребет земли неугасимой болью,
К запретным тайнам подобрал ключи..."*

М. Волошин

Едва только были сформулированы основные положения тектоники плит, как эта теория завладела умами самого широкого круга исследователей во всем мире. В науках о Земле произошел подлинный переворот - геологические знания, накопленные в течение долгих десятилетий и даже столетий, стали пересматриваться сквозь призму новой теории. **Вся тектоническая история последних геологических эпох представлялась теперь, главным образом, как результат движения и сложного взаимодействия литосферных плит.** Анализируя данные палеомагнитных исследований и карты возрастов океанического дна, стало возможным определить расположение континентальных глыб и конфигурацию океанических впадин в предшествующие геологические эпохи.

В отличие от постоянно изменяющих свою форму океанов, материка являются гораздо более стабильными образованиями и представляют собой, по существу, жесткие блоки континентальной коры, лежащие на поверхности движущихся плит. Однако, и материка не являются чем-то совершенно неизменным - согласно теории тектоники плит они могут раскалываться на части или же, наоборот, соединяться в результате столкновений.

На вводном развороте этой главы показано как менялось расположение материков в течение последних геологических эпох. 180 млн. лет назад все материка составляли огромный единый массив - Пангею, который был окружен огромным единым океаном - Панталассой, но вскоре началось раскрытие центральной части Атлантики и Пангея стала распадаться на две части - Лавразию и Гондвану.

120 млн. лет назад северный из этих двух суперконтинентов (Лавразия) еще продолжал оставаться единым целым, тогда как южный (Гондвана) уже распался на три отдельных блока: южноамерикано-африкано-аравийский, индийско-мадагаскарский и австралийско-антарктический. Пространство, разделяющее эти три континентальных блока, продолжало разрастаться и со временем образовало Индийский океан. Раскрытие северной и южной частей Атлантики привело к отделению Северной Америки от Евразии и окончательному отделению Южной Америки от Африки. От индийской континентальной глыбы отделился микроконтинент Мадагаскар.

60 млн. лет назад общее расположение материков уже отдаленно напоминало современное. Неразпавшимися оставались лишь африкано-аравийский и австралийско-антарктический континентальные блоки. Последующее сближение южных (гондванских) и северных (лавразийских) континентов привело к "соприкосновению" австралийской континентальной глыбы с индокитайским выступом Евразии, к повторной "стыковке" двух Америк, и, самое главное, к мощнейшим соударениям индийской и африкано-аравийской континентальных глыб с евроазиатской. Эти соударения сопровождались воздыманием гималайских и альпийских горных сооружений и формированием крупных зон разломов в пределах столкнувшихся континентов.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ КОНТИНЕНТОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКОМ ПРОШЛОМ

Как было рассмотрено в разделе 4.4, палеомагнитные исследования позволяют определить, какое положение в геологическом прошлом занимали континенты относительно географических полюсов Земли. Строго говоря, это еще не дает возможности определить положение континентов друг относительно друга, так как палеомагнитные методы не позволяют определить их положение по географической долготе. Реконструкция положений континентальных глыб в предшествующие геологические эпохи становится возможной, если анализ палеомагнитных данных проводится совместно с анализом карт возраста океанического дна.

Так, карта возраста океанического дна Атлантики позволяет определить какие размеры имел этот океан в геологическом прошлом и каким было расположение Европы, Африки, Северной и Южной Америки относительно оси Срединно-Атлантического хребта. Для этого надо удалить с глобуса полосу, соответствующую океаническому дну, образовавшемуся, например, за последние 60 млн. лет, а затем свести воедино расположенные к западу и к востоку участки, соответствующие более древнему океаническому дну. Проведя подобные операции для различных моментов времени в геологическом прошлом, можно наглядно проследить, как происходило раскрытие Атлантики и как менялось положение обрамляющих ее континентов относительно оси спрединга.

Может показаться, что для восстановления положения континентов и определения формы океанов в геологическом прошлом достаточно только карты возрастов океанического дна, но это не так. С одной стороны, как будет показано в разделе 4.10, срединно-океанические хребты изменяют с течением времени положение друг относительно друга, и поэтому они не могут служить в качестве реперов, к которым привязываются движения континентов. С другой стороны, карта возрастов океанического дна не позволяет оценить размеры участков, которые в течение интересующего интервала времени подверглись субдукции. Поэтому надежная реконструкция положения континентов возможна только при совместном анализе палеомагнитных данных и данных о возрасте океанического дна.

РАСКОЛ КОНТИНЕНТОВ И РАСКРЫТИЕ ОКЕАНОВ

Считается, что первопричиной раскола континентов являются изменения в характере мантийной конвекции, приводящие к локальному подъему астеносферы и образованию крупной области частично расплавленного мантийного материала непосредственно под континентальной корой. Так как частично расплавленное вещество занимает больший объем, чем нерасплавленное, то вышерасположенная континентальная кора испытывает воздымание. Рано или поздно она не выдерживает напряжения и раскалывается, что знаменует зарождение нового океана. На этой стадии тектонического развития - стадии зарождающегося океана - в настоящее время находится, например, зона Великих Африканских озер, пересекающая Африканский континент с севера на юг.

Процесс раскола континентов аналогичен процессу образования срединно-океанических хребтов, с той лишь разницей, что раскалыванию подвергается не тонкая океаническая, а гораздо более мощная континентальная кора. В некоторых случаях этот процесс может быть инициирован соударением континентов. Если разделенные новообразованными разломами континентальные блоки начинают расходиться в разные стороны, то это приводит к расширению трещины, а возникающее при этом зияние начинает залечиваться выплавляющимися из мантии базальтовыми магмами. Между расходящимися континентальными блоками формируется кора океанического типа. На этой стадии тектонического развития - стадии молодого океана - находится современное Красное море. Возраст этого самого юного "океана" нашей планеты, образовавшегося в результате разделения некогда единых Африки и Аравии, составляет лишь около 5 млн. лет.

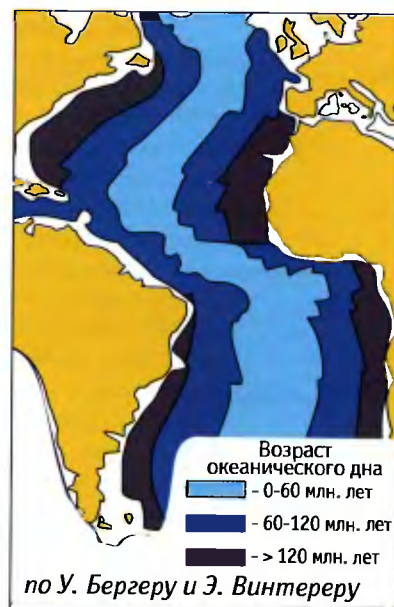
Дальнейший спрединг может продолжаться десятки и даже сотни миллионов лет, что приводит к формированию настоящего крупного океана. Такую стадию развития называют стадией зрелого океана, на этой стадии развития находятся в настоящее время Атлантический и Индийский океаны.

СОКРАЩЕНИЕ ОКЕАНОВ И СТОЛКНОВЕНИЕ КОНТИНЕНТОВ

Расширение одних океанов непременно должно сопровождаться сокращением других. Таким сокращающимся океаном в настоящее время является Тихий океан - субдукция на его окраинах происходит быстрее, чем спрединг в его внутренних районах (на Восточно-Тихоокеанском поднятии и некоторых других срединно-океанических хребтах). Такая стадия развития океана, когда субдукция преобладает над спредингом, получила название стадии стареющего океана.

Сокращение океанов может происходить вплоть до их закрытия. Эту стадию развития океана иногда называют стадией умирающего океана. Закрытие океанов, по существу, является следствием столкновения континентов - блок континентальной коры, расположенный на плите, один из краев которой подвергается субдукции, рано или поздно подойдет к этому краю. В случае если зона субдукции располагалась вдоль окраины другого континента, то произойдет столкновение двух блоков континентальной коры. Так как контуры сходящихся континентальных глыб не "подогнаны" друг к другу, то после столкновения между ними может сохраняться небольшая остаточная впадина. Так, между африканской и евроазиатской континентальными глыбами, столкнувшимися в недавнем геологическом прошлом, расположена впадина Средиземного моря, являющаяся небольшим остатком древнего океана Тетис, некогда разделявшего южные и северные материки.

Если силы, двигавшие субдуцировавшую плиту, не прекращают своего действия, то остатки океана полностью закрываются. Ярким примером такого события считается столкновение Индии с Евразией, в результате чего полностью закрылся соответствующий участок древнего океана Тетис. Более того, соударение континентальных блоков привело к их нагромождению друг на друга и возникновению Гималаев - высочайшей горной системы мира. Считается, что индийская глыба немного "поднырнула" под евроазиатскую, в результате чего в зоне их стыка сформировалась континентальная кора удвоенной толщины. Воздымание же Гималаев произошло вследствие того, что такая удвоенная кора просто стремилась прийти в состояние изостатического равновесия. Таким образом на заключительной "посмертной" стадии развития океана на его месте могут сформироваться высочайшие горные сооружения. "Подныривание" одних континентальных глыб под другие не может идти очень долго - ведь блоки континентальной коры сложены сравнительно низкоплотными горными породами, и поэтому они играют роль своего рода "плапков", которые не могут быть затянуты далеко в мантию. "Подныривание" индийской континентальной глыбы под евроазиатскую со временем должно прекратиться и после завершения активных тектонических процессов в гималайском регионе, они будут составлять единую континентальную глыбу.



ПЛИТЫ "МЕДЛЕННЫЕ" И "БЫСТРЫЕ"

В то время как большинство ученых еще не успело осознать всю значимость только что появившейся теории тектоники плит, ее сторонники уже стали описывать движение плит количественно. Ключом к решению проблемы послужил анализ полосовых магнитных аномалий в Мировом океане, благодаря которому были установлены скорости спрединга во всех срединно-океанических хребтах. На основании этих данных были определены и скорости, с которыми плиты движутся друг относительно друга.

Так, например, было установлено, что Африканская и Южноамериканская плиты удаляются друг от друга со скоростью около 4 см/год. Но как определить, что происходит на самом деле - Африканская плита удаляется от Южноамериканской или же, напротив, Южноамериканская от Африканской? Очевидно, что ответ на этот вопрос зависит от того, какая выбрана система отсчета. Если она жестко привязана к Африканской плите, то удаляющейся следует считать Южноамериканскую, и, наоборот, если система отсчета жестко соединена с Южноамериканской, то удаляется Африканская.

Но как плиты движутся, если так можно выразиться, относительно самой Земли, т.е. той части планеты, которая находится под астеносферой? **Каковы абсолютные скорости плит, т.е. скорости в системе отсчета, жестко связанной с глубинными подастеносферными частями мантии (мезосферой)?** На первый взгляд, это несложный вопрос. "Здравый смысл" подсказывает, что в качестве неподвижной системы отсчета нужно взять срединно-океанические хребты, и в таком случае скорости отодвигания плит от срединно-океанических хребтов и будут представлять собой их абсолютные скорости.

Так бы и было, если бы оси спрединга оставались неподвижными. Однако это не так, что легко понять из следующего примера. Африканская плита движется на восток относительно Срединно-Атлантического хребта и на запад - относительно Аравийско-Индийского. Если считать срединно-океанические хребты неподвижными, то получается, что Африканская плита движется одновременно и на восток и на запад. Идею неподвижности срединно-океанических хребтов еще можно было бы спасти, если бы в пределах Африканской плиты существовали какие-либо зоны интенсивного сжатия. Однако никаких подобных зон здесь неизвестно, напротив, Африка в настоящее время испытывает растяжение и раскол по зоне глубинных разломов, расположенной вдоль системы Великих Африканских озер. Не остается ничего иного, как признать, что **срединно-океанические хребты сами перемещаются по поверхности планеты.**

Этот довольно неожиданный вывод зачеркивает надежду использовать зоны спрединга в качестве реперов для привязки относительных скоростей плит к абсолютной системе отсчета. А есть ли вообще смысл говорить об абсолютных скоростях плит, когда мезосфера, т.е. часть мантии, расположенная ниже астеносферы, сама не является абсолютной жесткой? Однако, как будет рассмотрено в следующем разделе, перемещение масс в мезосфере, по-видимому, осуществляется очень медленно, поэтому **по сравнению с быстродвигающимися литосферными плитами мезосферу, в первом приближении, можно считать неподвижной.** Таким образом, постановка вопроса об абсолютных скоростях плит является вполне правомерной. Определить абсолютные скорости литосферных плит удалось с помощью так называемого "способа горячих точек". Для того, чтобы понять суть способа, необходимо прежде всего знать, что такое "горячие точки", а также иметь представление о так называемых "мантийных плюмах".

Во многих районах Мирового океана обнаружены весьма необычные вулканические цепи, характеризующиеся тем, что действующие вулканы располагаются только с одного из их краев. Все остальные вулканы таких цепей потухшие, причем их возраст последовательно увеличивается по направлению от действующих вулканов к противоположным краям цепей. В рамках теории тектоники плит происхождение этих вулканических цепей объясняется наличием мантийных плюмов - узких восходящих потоков твердого, но очень горячего вещества, поднимающегося из нижних слоев мантии к ее самым верхним сравнительно холодным горизонтам. В условиях резко понизившегося давления, принесенное с больших глубин вещество испытывает частичное плавление, что ведет к образованию очагов расплавленной магмы в самых верхних горизонтах мантии. По разломам в океанической коре магма прорывается на поверхность и изливается в виде вулканов. Центры вулканизма, связанные с мантийными плюмами, называются горячими точками. Общее количество горячих точек оценивается по-разному, но даже по минимальным оценкам их на земном шаре не менее двадцати.

Считается, что плюмы должны занимать в мантии очень устойчивое положение на протяжении десятков миллионов лет, так как конвекция в твердом теле не может быстро и беспорядочно менять свой характер. Закономерное смещение с течением геологического времени центров вулканизма, таким образом, не может быть объяснено перемещением мантийных плюмов в теле Земли. Зато по поверхности планеты могут перемещаться сами литосферные плиты, и именно прохождением плиты над плюмом и объясняется возникновение цепочки вулканов. Этот процесс можно уподобить медленному протаскиванию листа тонкой жести над паяльной лампой и возникновению при этом оплавленно-го следа. Заметим, что в каждый конкретный момент действующие вулканы существуют только непо-

средственно над мантийным плюмом, подобно тому, как жезл раскалена только над тем местом, под которым в данный момент находится паяльная лампа.

В связи с устойчивым положением мантийных плюмов в теле земного шара горячие точки могут рассматриваться в качестве неподвижных реперов, к которым можно "привязать" движение литосферных плит. **Разделив длину цепи на разницу возрастов крайних вулканов, получим среднюю скорость плиты, причем в абсолютной системе отсчета. Зная абсолютную скорость хотя бы одной плиты, нетрудно привязать к абсолютной системе отсчета и скорости всех остальных плит.**

В итоге выяснилось, что **плиты довольно четко делятся на две группы: "медленные" и "быстрые", абсолютная скорость которых варьирует в пределах 0,5-3 см/год и 6-10 см/год, соответственно.** К "медленным" плитам относятся Евроазиатская и Антарктическая (обе имеют скорость около 0,5 см/год), Африканская и Карибская (обе - около 1 см/год), Североамериканская (2 см/год), Южноамериканская и Аравийская (обе - около 3 см/год). К "быстрым" относятся плиты Наска, Филиппинская и Кокос (все три - около 6 см/год), Индоавстралийская (7 см/год) и Тихоокеанская (почти 10 см/год).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ МЕЖДУ ПЛИТАМИ

После того, как были определены скорости спрединга в различных срединно-океанических хребтах, стало возможным рассчитать и скорости всех плит друг относительно друга. Если две плиты граничат по срединно-океаническому хребту, то скорость относительного перемещения этих плит просто равна скорости спрединга.

Если требуется узнать скорость относительного перемещения плит, граничащих не по срединно-океаническим хребтам или не граничащих вовсе, приходится прибегать к сложной цепочке учета взаимных перемещений нескольких плит. Дело в том, что анализ полосовых магнитных аномалий позволяет определять только скорость спрединга и не дает возможности прямо определять скорость смещения вдоль трансформной границы или скорости субдукции. Так, например, чтобы определить скорость относительного перемещения Индоавстралийской и Евразийской плит, границей между которыми служит зона субдукции в Зондском желобе и зона сжатия в Гималаях, приходится учитывать взаимные перемещения четырех плит - Индоавстралийской, Африканской, Североамериканской и Евроазиатской. Для этого надо знать скорость и направление спрединга в Аравийско-Индийском хребте, разделяющем Индоавстралийскую и Африканскую плиты, в центральной части Срединно-Атлантического хребта, разделяющей Африканскую и Североамериканскую плиты, и, наконец, в северной части Срединно-Атлантического хребта, разделяющей Североамериканскую и Евроазиатскую плиты.

Отметим, что с помощью высокоточных спутниковых измерений можно определить скорость относительного перемещения любых плит вне зависимости от того, какого типа границами они разделены и граничат ли они вообще. Однако спутниковые измерения дают только "мгновенное" значение относительной скорости плит, тогда как по магнитным аномалиям можно установить, как скорость плит изменялась в геологическом прошлом.

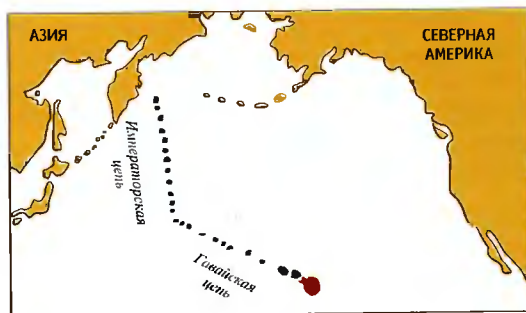
МИГРАЦИЯ СРЕДИННО-ОКЕАНИЧЕСКИХ ХРЕБТОВ

Рисунок (слева внизу) иллюстрирует невозможность одновременной неподвижности двух срединно-океанических хребтов, ограничивающих с разных сторон одну и ту же плиту. Либо одна, либо обе зоны спрединга должны испытывать смещение по земной поверхности.

ГОРЯЧИЕ ТОЧКИ

Наиболее ярким примером вулканической цепи, связанной с мантийным плюмом, является Гавайско-Империаторская цепь, протянувшаяся по дну Тихого океана примерно на 5 тысяч км, при этом действующими являются лишь несколько вулканов, расположенных на самом юго-востоке этой гигантской цепи. Возраст вулканов при продвижении от Гавайских островов к северному окончанию цепи последовательно увеличивается от 0 до 78 млн. лет, причем в точке, где возраст вулканов составляет 43 млн. лет, цепь претерпевает характерный резкий излом. Это свидетельствует о том, что 43 млн. лет назад Тихоокеанская плита сменила почти северное направление своего движения на современное северо-западное.

Вулканические цепи, связанные с мантийными плюмами, не следует путать с вулканическими цепями, ассоциирующимися с глубоководными желобами, примерами которых являются Алеутская и Курило-Камчатская вулканические цепи. Действующие вулканы обычно расположены по всей длине таких цепей, а генерация тепла, необходимо-го для образования магматических очагов, происходит из-за трения при пододвигании одной плиты под другую.



ПОЧЕМУ ДВИЖУТСЯ ПЛИТЫ?

Три десятилетия, прошедшие со времени рождения теории тектоники плит, ознаменовались ее широким распространением и признанием. Однако, даже за то короткое время, которое эта теория существует, ее сторонникам не раз приходилось заниматься ее серьезной модификацией. Так например, первоначально предполагалось, что в мантии существуют глобальные конвективные ячейки, охватывающие всю ее толщину и имеющие размеры в несколько тысяч километров. Кроме того, подразумевалось, что форма литосферных плит и характер их движения целиком определяются геометрией этих ячеек: считалось, что восходящие потоки мантийных ячеек способствуют расколу вышерасположенной литосферы и над такими потоками располагаются срединно-океанические хребты или зоны раскола континентов, затем горизонтальные ветви конвективных потоков увлекают плиты в разные стороны, а в местах, где расположены нисходящие ветви, литосферные плиты затягиваются вниз, т.е. происходит субдукция.

Однако спустя некоторое время эта простая и кажущаяся весьма правдоподобной модель столкнулась с очень серьезной трудностью. Как выяснилось, **зоны спрединга довольно быстро мигрируют по земной поверхности, а в рамках модели глобальной мантийной конвекции из этого следовало, что восходящие конвективные потоки также испытывают быстрые смещения. Однако если в интенсивные конвективные движения вовлечена вся или почти вся масса мантии, то быстрое смещение восходящих конвективных потоков физически невозможно.** Как показывают расчеты, такие конвективные ячейки должны быть очень устойчивы во времени и для существенной перестройки их конфигурации потребовались бы десятки миллионов лет. Модель глобальных мантийных конвективных ячеек столкнулась и с некоторыми другими трудностями. В частности, в ее рамках оставалось неясным почему плиты весьма четко делятся на "медленные" и "быстрые".

Для объяснения движения литосферных плит необходимо было искать иное объяснение, чем глобальная мантийная конвекция, и в качестве силы, движущей литосферные плиты, была рассмотрена сила их собственной тяжести. Разумеется, на большей части плиты, там, где она занимает горизонтальное положение, сила тяжести полностью уравновешивается силой реакции опоры. Однако этого не происходит на краях плиты - в зонах спрединга и субдукции. В зонах спрединга под срединно-океаническими хребтами поверхность астеносферы наклонена (наиболее близко к земной поверхности она подходит там, где максимален тепловой поток из недр, т.е. в осевых зонах хребтов, а по мере удаления от оси спрединга литосфера постепенно остывает и становится более толстой, следовательно глубина ее нижней поверхности увеличивается). Получается, что участок плиты, примыкающий к оси спрединга, лежит на своего рода "наклонной плоскости", по которой он должен "соскальзывать" и тем самым в какой-то мере толкать вперед саму плиту. В зонах субдукции плита также наклонена, а так как плита по сравнению с частично расплавленной астеносферой, в которую она погружается, является более холодной и более плотной, то субдуцирующий край плиты должен стремиться "тонуть" под действием собственной тяжести и, тем самым, тянуть за собой всю остальную плиту.

Безусловно, на плиту действуют обе вышеописанные силы, которые можно назвать силой "толкания задним (соскальзывающим) краем" и силой "затягивания передним (тонущим) краем". Но в состоянии ли эти силы сдвинуть плиту, ведь гигантские силы трения должны препятствовать такому движению? И если да, то какова количественная роль этих сил, какая из них в большей мере ответственна за движение плит?

Ответить на эти вопросы позволило знание абсолютных скоростей плит. Оказалось, что **все без исключения быстрые плиты имеют протяженные субдуцирующие края и, наоборот, все медленные плиты или имеют на своих границах очень короткие зоны субдукции, или не имеют их вовсе.** Такая закономерность убедительно показывает, что решающую роль в движении плит играет погружение в мантию их передних краев под действием собственной тяжести. Роль соскальзывания задних краев плит по наклонной плоскости астеносферы нельзя отрицать, но она может быть лишь второстепенной. Во всяком случае, между абсолютными скоростями плит и длинами ограничивающих их зон спрединга никакой корреляции не отмечается, в то время как абсолютные скорости плит, хотя и весьма грубо, но коррелируют с длиной их субдуцирующих краев.

Движение литосферных плит, таким образом, является не столько следствием конвекции в мантии, сколько одной из ее главных причин. С одной стороны, погружение плит в зонах субдукции должно неизбежно вызывать перемещение вытесняемого мантийного материала, с другой - раздвигание плит в зонах спрединга приводит к подъему мантийного материала для заполнения возникающего зияния. Такая модель конвекции получила название модели мантийной конвекции с активной ролью плит. Согласно этой модели конвекция в мантии протекает отнюдь не так интенсивно, как это представлялось авторам модели глобальных конвективных ячеек, но в то же время ее характер и причины оказались значительно сложнее.

В рамках модели с активной ролью плит легко объяснима и миграция срединно-океанических хребтов. Зоны спрединга рассматриваются просто как щели между расходящимися плитами, а миграция таких щелей объясняется тем, что расходящиеся плиты имеют разные абсолютные скорости. Заме-

тим, что, как правило, плиты в зонах спрединга наращиваются равномерно с обеих сторон, но известны и случаи несимметричного спрединга (например, в Восточно-Тихоокеанском поднятии плита Наска наращивается быстрее, чем Тихоокеанская). Таким образом, модель мантийной конвекции с активной ролью плит выглядит много предпочтительнее: она подтверждается данными об абсолютных скоростях плит и легко обходит те трудности в объяснении особенностей спрединга, с которыми не может справиться модель глобальных конвективных ячеек.

В заключение следует отметить, что теория тектоники плит произвела в науках о Земле подлинную революцию, связав в единую логичную картину самые разнообразные геологические факты и явления: вулканизм, землетрясения, полосовый характер аномального магнитного поля в Мировом океане, контуры континентальных блоков, рельеф океанического дна, расположение крупнейших горных цепей на континентах и многое другое. Стало складываться впечатление, что теория тектоники плит представляет собой окончательный вариант теории тектонического развития Земли, а на долю будущих поколений геологов остается лишь уточнить некоторые детали. И все же, это не так, или, по крайней мере, не совсем так - теория тектоники плит имеет немало нерешенных конкретных вопросов. Не стоит забывать и того, что в истории науки многократно бывало, что самые стройные, самые логичные и самые всеобъемлющие научные теории терпели крушение в результате появления принципиально новых данных, так что в вопросе о тектонической эволюции нашей планеты еще рано ставить точку.

СХЕМА СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ЛИТОСФЕРНУЮ ПЛИТУ (для модели конвекции с активной ролью плит)

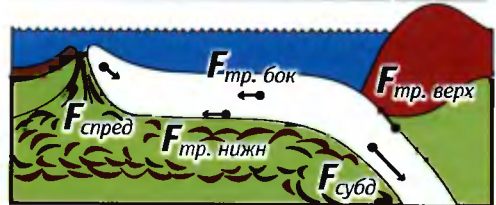
$F_{\text{субд}}$ - сила затягивания передним краем плиты, "тонущим" в зонах субдукции под действием собственной тяжести;
 $F_{\text{спред}}$ - сила толкания задним краем плиты, "соскальзывающим" по наклонной поверхности астеносферы в зонах спрединга;

$F_{\text{тр.нижн}}$ - сила трения, возникающая на нижней границе плиты при ее скольжении по астеносфере;

$F_{\text{тр.бок}}$ - сила трения, возникающая на боковых границах плиты при ее соприкосновении с соседними плитами;

$F_{\text{тр.верх}}$ - сила трения, возникающая на верхней границе субдуцирующего края плиты.

Составляющие силы тяжести, которые компенсируются силой реакции опоры, на схеме не показаны.



МАНТИЙНЫЕ ПЛЮМЫ

Модель мантийной конвекции с активной ролью плит довольно хорошо объясняет причины движения литосферных плит, однако, строго говоря, она объясняет лишь движение "быстрых" плит, у которых есть субдуцирующие края, тогда как причина движения "медленных" плит, у которых субдуцирующих краев нет, в рамках этой модели остается не совсем ясной. Возможно, что движения "медленных" плит определяются их задними краями, "соскальзывающими" в разные стороны от срединно-океанических хребтов по наклонной поверхности астеносферы. Но возможно, что движение "медленных" плит определяется главным образом медленными горизонтальными конвективными потоками, растекающимися в разные стороны от мантийных плюмов. В этом нет ничего удивительного - полагают, что мощные плюмы могут привести не только к образованию крупных центров вулканизма, но и к расколу "встретившихся на их пути" континентальных блоков и последующему "растаскиванию" образовавшихся фрагментов в разные стороны. Так, в частности, в последнее время активно разрабатывается гипотеза о расколе Гондваны (южного суперконтинента) в результате воздействия мощного плюма.

В каком-то смысле такие представления являются "шагом назад" от модели с активной ролью плит к модели глобальной мантийной конвекции, правда интенсивность горизонтальных конвективных движений, обусловленных системой мантийных плюмов, намного меньше, чем подразумевалось в модели Александра джю Тойта. Что касается вертикальных движений в самих плюмах, то по некоторым ориентировочным оценкам скорость их подъема может достигать 2 м/год, а диаметр плюмов составляет от 100 до 250 км. Время активной жизни мантийного плюма, по-видимому, может достигать нескольких сотен миллионов лет.

Вещество плюмов поднимается вверх потому, что оно легче, чем окружающие породы. По- существу, оно просто "всплывает" в виде узкой струи с больших мантийных глубин, где царят очень высокие температуры. Но как и на какой глубине возникают плюмы, пока остается недостаточно ясным. В принципе, плюм может образоваться на любой глубине, где возникнет зона несколько более горячего, а значит и менее плотного материала, однако не вполне понятно, как внутри мантии может самопроизвольно возникнуть зона, характеризующаяся повышенной по сравнению с окружающими породами температурой. Не исключено, что ответственность за это несут локальные неоднородности содержания радиоактивных элементов в мантийных породах, но вполне возможно, что плюмы зарождаются у самого основания мантии из-за термических неоднородностей на границе с ядром. Предполагается даже, что первопричиной возникновения плюмов может быть и падение на Землю космических тел астероидных размеров. Ведь в результате столкновения нашей планеты с каким-либо из таких тел на земной поверхности образуется крупный и глубокий кратер, и этот участок литосферы будет мгновенно выведен из состояния изостатического равновесия. Восстановление изостатического равновесия начнется сразу же и произойдет всего за несколько десятков тысяч лет - по геологическим меркам это чрезвычайно быстро, и происходящий при этом подток мантийного материала, в принципе, может инициировать образование плюма.