

## ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

552.313

## ГОРЯЧИЕ ТОЧКИ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ \*)

К. Бёрк, Дж. Уилсон

Эти области необычной вулканической активности отмечают пути перемещения гигантских литосферных плит по лицу Земли. Они могут быть также одной из причин разрыва континентов и рождения новых океанов.

На поверхности нашей планеты насчитывается более ста небольших областей локальной вулканической активности, которые геологи называют горячими точками. В отличие от большинства других вулканов мира, они не всегда расположены на границах гигантских дрейфующих плит, которые образуют поверхность Земли. Напротив, многие из них лежат далеко внутри этих плит. Большая часть горячих точек неподвижна или почти неподвижна относительно глубинных слоев Земли, поэтому при движении плит на них остаются следы в виде потухших вулканов. Таким образом, горячие точки и следы их вулканической деятельности отмечают пути перемещения плит по земной поверхности.

Представление о движении плит в настоящее время является общепринятым. Так, например, Африка и Южная Америка медленно отделяются друг от друга по мере того, как на морское дно между ними поступает из недр Земли новое вещество. Дополняющие друг друга очертания берегов и сходные геологические условия, несмотря на разделяющий эти материки океан, свидетельствуют о том, что оба они были когда-то единым целым. Относительное перемещение плит, несущих эти континенты, подробно изучено. Однако движение одной плиты относительно другой нельзя простым образом связать с их перемещением по земной поверхности, поскольку невозможно установить, дрейфуют ли в противоположных направлениях оба континента, или один из них покойится, а другой отдается от него. Горячие точки, привязанные к более глубоким пластам Земли, как раз и являются теми измерительными инструментами, которые позволяют решить этот вопрос. Анализ географического распределения горячих точек показывает, что Африканская плита является стационарной и что она не смешалась со своего места по крайней мере в течение последних 30 млн. лет.

Значение горячих точек не исчерпывается тем, что они дают нам в руки удобную систему отсчета. Сейчас ясно, что они оказывают также влияние на геофизические процессы, управляющие перемещением плит

\*) Kevin C. Burke, J. Tuzo Wilson, Hot Spots on the Earth's Surface, *Scientific American* 235 (2), 46—57 (August 1976). Перевод Г. И. Мерзона.

Кевин К. Бёрк — председатель Отделения геологических наук Университета штата Нью-Йорк в Олбани, США, Дж. Тьюзо Уилсон — генеральный директор Научного центра в Онтарио, Канада.

по поверхности нашей планеты. Когда континентальная плита оказывается над горячей точкой, вещество, извергающееся из глубоких пластов, образует широкий купол. Рост этого купола приводит к образованию глубоких трещин. По крайней мере в небольшом числе случаев вдоль некоторых



Рис. 1. Горячая точка в Северной Африке — изолированная группа вулканических гор, окруженная пустыней Сахара.

Эти горы носят название нагорья Тибести и лежат на северо-востоке республики Чад, вблизи Ливийской границы. Фотография сделана с высоты 920 км с искусственного спутника Земли, предназначенного для исследования земных ресурсов. Темные пятна на фото — относительно молодые потоки лавы. Видны два больших молодых вулканических кратера. Один из них, внизу справа — Эми Кусси — высотой 3415 м является высочайшей вершиной этого нагорья. Можно заметить также несколько более старых кратеров, которые подверглись сильной эрозии. В Тибести и других африканских горячих точках лавы различного возраста насыщены друг на друга, подтверждая, что этот континент неподвижен относительно горячих точек, по-видимому, в течение последних 30 млн. лет.

из этих трещин может произойти полный разлом континента. Таким образом, горячая точка может инициировать образование нового океана. В дополнение к прежним теориям, которые объясняли подвижность континентов, горячие точки помогают понять их изменчивость.

#### ТЕКТОНИКА ПЛИТ

В современной теории тектоники плит внешняя часть земной поверхности разделяется на два слоя. Верхний — твердый и холодный, единственно доступный нам слой называется литосферой. Нижний — добела

раскаленный, способный к деформации слой, — называется астеносферой. Астеносфера не является жидким, хотя в земных недрах и встречаются в небольших количествах расплавленные горные породы. Она находится в твердом состоянии, хотя способна течь под давлением. В этом смысле она не отличается от льда, который весьма хрупок, взятый в виде небольшого куска, но обладает пластичностью, когда мы встречаемся с ледником, стекающим с гор в долину.

Различие между литосферой и астеносферой основывается на их разной твердости и в значительной степени отражает также разницу в их температуре. Согласно прежней классификации, в основу которой был положен химический состав, внешние слои земной поверхности разделялись на кору и мантию. Граница между последними не соответствует границе

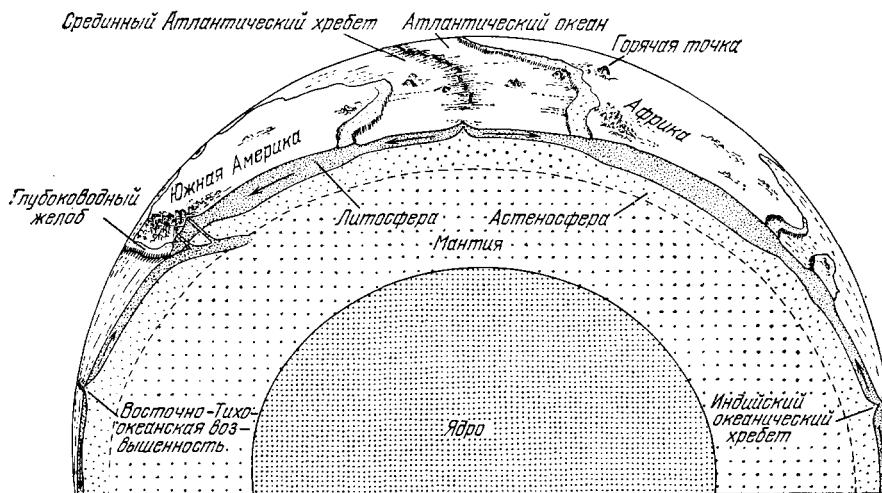


Рис. 2. Перемещение земной поверхности описывается теорией тектоники плит. Литосфера, холодный и жесткий слой, включающий земную кору, разорвана на более чем десяток гигантских плит. Эти плиты движутся над астеносферой — более горячим слоем, способным испытывать медленные деформации. Кора — это верхний слой литосферы. Остальная ее часть вместе со всей астеносферой является частью мантии. Литосферные плиты раздвигаются друг от друга по мере поступления нового вещества из мантии в срединных океанических хребтах. В месте столкновения двух плит одна из них опускается под другую и поглощается в мантии. Этот процесс, называемый субдукцией, сопровождается значительной вулканической активностью. Горячие точки — это небольшие вулканические районы, которые не характерны ни для срединных океанических хребтов, ни для зон субдукции. В отличие от большинства других вулканов, они чаще всего встречаются вдали от краев плиты. Но даже когда они лежат близко к краю плиты, их можно распознать по количеству и составу извергаемой лавы.

между литосферой и астеносферой. Кора — это только верхняя часть литосферы, литосфера же включает верхнюю часть мантии. Астеносфера обычно полностью находится в мантии.

Земная кора под океанами почти исключительно состоит из базальта. Наоборот, континенты большей частью сложены из гранитных пород. Гранит легче базальта, и земная кора на континентах значительно толще, чем под океаном. Таким образом, континенты как бы плавают над породами, из которых сложено дно океана. Прежде считалось, что континенты движутся по океанскому дну как корабли по океану; впоследствии, однако, от этой гипотезы пришлось отказаться. На самом деле континенты увлекаются литосферой подобно плоту, вмерзшему в плывущую речную льдину.

Литосфера разорвана приблизительно на десяток плит, с которыми прочно связаны континенты. Плиты отделяются друг от друга гребнями срединных океанических хребтов, где происходит обновление литосферы.

Такие хребты опоясывают все океаны нашей планеты и образуют самую обширную горную систему Земли. Подводная вулканическая деятельность в гребнях этих хребтов непрерывно поставляет к плитам новый материал, вызывая тем самым их расталкивание. Обратный процесс — постепенное исчезновение литосферных плит — наблюдается в местах их слияния и перекрытия. В этих областях, называемых «зонами субдукции», или поддвига, одна из плит погружается под соседнюю и поглощается мантией.

Следует предполагать, что движение литосферных плит связано с крупномасштабными конвекционными токами в мантии. Такие токи, безусловно, способны приводить к перемещению плит. Однако конвекция в мантии изучена настолько слабо, что сделать какие-либо определенные выводы пока не представляется возможным.

### ГОРЯЧИЕ ТОЧКИ И «ПЛЮМАЖИ»

Почти вся вулканическая деятельность на земле связана с краями плит. Подводный вулканизм наблюдается на всем протяжении срединных океанических хребтов, причем извергаемая лава преимущественно является базальтом. На границах смыкающихся плит лавы образуются за счет плавления наиболее легких компонент погружающейся плиты. Поднимающаяся вверх лава может образовать островную дугу, как, например, Филиппины, Япония, Алеутские острова, или вулканическую горную систему, как, скажем, Анды в Южной Америке или Каскадные горы в Северной Америке. Лавы, изливающиеся в местах перекрытия плит, отличаются от базальтов срединных океанических хребтов. Они называются андезитными лавами и содержат больше кремния, кальция, натрия и калия, но меньше железа и магния, чем базальт.

Вулканическая деятельность вдали от границ плиты составляет лишь небольшую часть от всего вулканизма планеты, по-видимому, даже существенно меньшую 1 %. Мы имеем в виду именно те немногочисленные отдельно стоящие вулканы, получившие название горячих точек, которые характерны своей исключительной изоляцией. В середине жесткой литосферной плиты, вдали от центров сейсмической активности, горячая точка может быть единственным заметным образованием на однообразном во всех отношениях ландшафте. Почти все горячие точки являются областями широкого вспучивания земной коры, что отличает их от небольшой по масштабу вулканической деятельности, сопровождающейся горообразовательными процессами или рождением новых островов, характерной для всех вулканов. Наконец, лавы в горячих точках отличаются как от лав срединных океанических хребтов, так и лав в зонах субдукции. Лавы горячих точек, как и лавы океанических хребтов, — это тоже базальты, но содержащие больше щелочных металлов — лития, натрия, калия и т. п. На краях плит богатые щелочными металлами лавы встречаются редко.

Механизмы, ответственные за появление горячих точек, связаны с процессами, идущими в мантии. Это могут быть поверхностные проявления «плюмажей» — столбообразных восходящих токов горячего твердого вещества. «Плюмажи», возможно, идут из нижних слоев астеносферы, с глубины в сотни километров в толще мантии, где происходят фазовые превращения вещества. Характерный химический состав лавы из горячих точек говорит о том, что ее источники не связаны с процессами общей циркуляции в мантии. Так, например, «плюмажи» могут подниматься из застойных очагов в центре круговых конвекционных токов или

приходить из самого глубокого слоя мантии, лежащего ниже той области, где благодаря конвекции происходит эффективное перемешивание.

Процессы циркуляции в мантии поняты еще не до конца, и в настоящее время любая попытка объяснить происхождение горячих точек

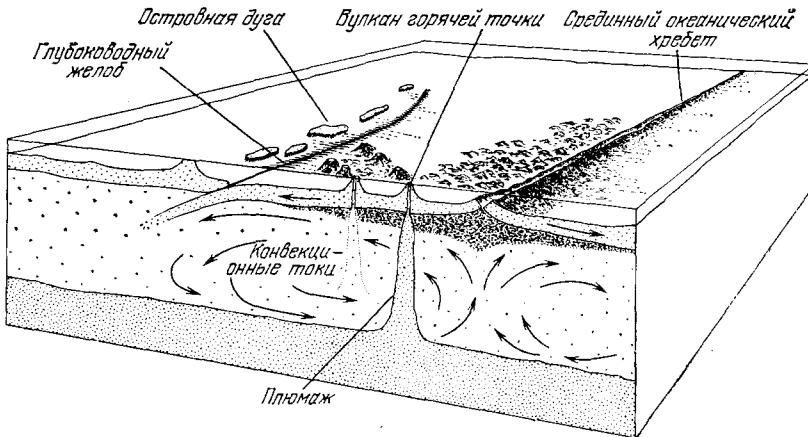


Рис. 3. Источник вулканической активности горячей точки — это, по-видимому, «плюмаж», поднимающийся из глубины мантии.

Различия в составе лав, извергаемых в горячих точках, и лав, характерных для вулканической деятельности на краях литосферных плит, говорят о том, что эти лавы приходят из различных частей мантии. Источник лав горячих точек может оставаться изолированным в течение времени до двух миллиардов лет. Большая часть мантии, по-видимому, пронизана конвекционными токами, так что плюмажи должны возникать в некоторой области, ограниченной от общей циркуляции. Они, например, могли бы подниматься из застойного очага в центре области конвекции или из слоя мантии ниже этой области. На литосферной плите, движущейся над «плюмажем», остается след в виде цепи вулканических гор, возраст которых увеличивается с расстоянием до ныне действующих вулканов.

выглядит спекулятивной. Здесь мы преимущественно будем касаться поверхностных процессов, которые непосредственно не связаны с происхождением магмы. Оказывается, можно дать последовательное объяснение горячим точкам, даже не располагая детальной моделью процессов, идущих в недрах Земли.

#### ОСТРОВНЫЕ ЦЕПИ

Вероятно, самой известной и наиболее легко распознаваемой горячей точкой нашей планеты являются Гавайские острова. Участник экспедиции в южные моря 1838 г. американский геолог Джеймс Дуайт Дэна обратил внимание на то, что возраст островов, входящих в Гавайскую группу, непрерывно увеличивается к северо-западу от действующих вулканов Килауа и Мауна-Лоа. (Дэна оценивал возраст островов по степени их эрозии.)

Сейчас очевидно, что все острова Гавайской группы были образованы одним источником лавы, над которой прошла тихоокеанская плита, движавшаяся приблизительно на северо-запад. Перемещение плиты оставило следы в виде вулканов разного возраста, точно так же, как порыв ветра над дымящей трубой оставляет в воздухе рваные клубы дыма.

Дэна указал также на две другие цепочки островов Тихого океана, вытянутые в том же направлении, что и Гавайи, а именно острова Австралийской группы и острова Туамоту. Последние включают в себя остров Питкэрн. Эти цепи, как и Гавайские острова, становятся все древнее по направлению к северо-западу. Наибольшей вулканической актив-

ностью отличается восточный край каждой группы. Невозможно отказатьься от мысли, что все эти три островные цепи возникли в результате одного и того же перемещения Тихоокеанской плиты, а расположение островов четко указывает направление этого перемещения.

Выдающийся математик XVIII века Леонард Эйлер доказал, что любое движение на поверхности сферы можно свести к вращениям. Таким образом, дрейф литосферной плиты всегда можно представить как вращение вокруг некоторого полюса. (При этом полюс вращения не должен проходить через саму плиту.) У. Джесону Моргану из Принстонского

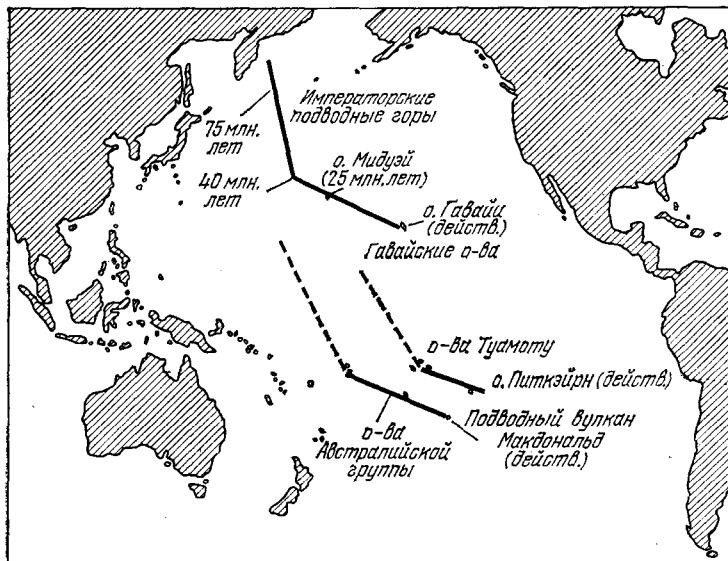


Рис. 4. Островные цепи Тихого океана можно интерпретировать как следы перемещения океанского дна над стационарными горячими точками.

Возраст Гавайских островов увеличивается по направлению к северо-западу, начиная от самого острова Гавайи. Две другие островные цепи, параллельные Гавайским островам, обнаруживают ту же возрастную последовательность. Это острова Австралийской группы, начинающиеся от подводного вулкана Макдональд, и острова Туамоту, начинающиеся от острова Питкэрн. Все эти три цепи могли быть образованы в результате одного и того же вращения Тихоокеанской плиты, проходившего по часовой стрелке. Возрастная последовательность островов Гавайской группы продолжается Императорскими подводными горами, которые идут на север от изгиба, образованного 40 млн. лет назад. Изменение направления островной цепи указывает на то, что до этого поворот плиты происходил вокруг другого полюса вращения. К северу от островов Австралийской группы и Туамоту также отходит цепь подводных гор (штриховые линии). Однако нет убедительных доказательств того, что их возраст отвечает линейной последовательности.

университета удалось показать, что острова Гавайской и Австралийской групп, а также острова Туамоту могли быть образованы при вращении Тихоокеанской плиты вокруг одного полюса. Жак-Бернар Минстер и его коллеги из Калифорнийского технологического института, которые исходили из доли площади земной поверхности, приходящейся на морское дно, нашли, что если Африканская плита оставалась на месте, то Тихоокеанская должна была двигаться в направлении, указываемом Гавайской цепью.

В западной части Гавайских островов гряда подводных гор — Императорские подводные горы — вытянута на север. Это заставляет рассматривать всю систему островов и подводных гор, как единую цепь, несколько изменившую свое направление. Такое заключение подтверждается измерениями возраста Гавайских островов. Древнейшему из них, лежащему на изгибе гряды, около 40 млн. лет. Императорские подводные горы

продолжают эту возрастную последовательность от 40 млн. лет у изгиба гряды до приблизительно 80 млн. лет в том месте, где подводная цепь оканчивается полуостровом Камчатка. Морган установил, что образование



Рис. 5. Горячие точки Атлантического океана также свидетельствуют о перемещении литосферных плит.

Несколько таких горячих точек лежат вблизи Срединного Атлантического хребта. Хорошо известным примером является Исландия, которая создавалась благодаря колоссальным извержениям вулканов на гребне этого хребта. От некоторых горячих точек назад к краям континентальных плит расходятся поперечные гряды скал вулканического происхождения, указывающие на то, что во время формирования Срединного океанического хребта эти горячие точки были его частью и что они уже были действующими вулканами в период разделения континентов.

подводных гор можно объяснить вращением Тихоокеанской плиты, если предположить удивительно простую последовательность событий: около 40 млн. лет назад движение Тихоокеанской плиты перешло к новому полюсу вращения. Тем самым изменилось направление ее перемещения, что и вызвало изгиб Гавайской гряды.

Другое важное географическое наблюдение, по-видимому, подтверждает эту теорию. Островные цепи Австралийской группы и Туамоту также круто изогнулись где-то около 40 млн. лет назад и каждая из них продолжается линией подводных гор. Последние вытянуты параллельно системе Императорских подводных гор, и, следовательно, все они могли бы быть образованы одновременно с последними при вращении плиты вокруг одного и того же полюса. Однако чтобы согласиться с этим предположением, необходимо доказать, что возраст подводных гор прогрессивно увеличивается по направлению к северу. До сих пор имеется очень мало точных данных по этому вопросу. Те же, которыми мы располагаем, противоречат столь простой интерпретации.

Чтобы восстановить перемещение плит по следам, составленным вулканами горячих точек, необходимо убедиться в том, что горячие точки всегда остаются неподвижными или почти неподвижными. Такое предположение нуждается в проверке. Министер и его коллеги приготовили точные карты относительных перемещений плит, не связывая их с горячими точками. Из их работы следует, что наиболее заметные горячие точки нашей планеты не смешались друг относительно друга в течение последних 10 млн. лет. Другие исследователи сумели сравнить положение горячих точек за гораздо более длительный период. Их данные, по-видимому, указывают на то, что в течение последних 120 млн. лет после разрыва суперконтинента Пангеи группы горячих точек одного из океанов сдвигались относительно групп горячих точек других океанов. Однако смещение этих групп происходило значительно медленнее, чем дрейф литосферных плит.

### ГЕОГРАФИЯ ГОРЯЧИХ ТОЧЕК

Перечень горячих точек Земли указывает на то, что по крайней мере 122 из них были активными в течение последних 10 млн. лет. Большинство их обладает всеми характерными для горячих точек признаками и может быть отнесено к ним без всяких колебаний. Они являются центрами вулканической активности, удаленными от края плиты, и образуют куполообразные возвышения диаметром до 200 километров. В перечень горячих точек включены и несколько областей, лежащих на срединных океанических хребтах или около них. Наиболее известные из них — Исландия, Азорские острова, а также Тристан-да-Кунья — небольшая группа островов в Южной Атлантике. Причины, по которым эти области отнесены к горячим точкам, заключаются в том, что они обладают большинством признаков последних и не похожи на нормальные срединные океанические хребты. Количество выброшенного ими вещества значительно превышает норму, характерную для срединных океанических хребтов. Именно поэтому они превратились в острова, тогда как другие вершины хребтов так и остались под водой. Еще более существенно то, что лавы этих областей принадлежат к богатым щелочными металлами базальтам, которые очень редки на краях плиты, но типичны для горячих точек.

Наш перечень, скорее всего, недооценивает число горячих точек. На континентах встречаются купола или возвышенности, не увенчанные вулканами. Несмотря на внешнее сходство и геофизическую аналогию, мы не считаем их горячими точками. Имеются, вероятно, также и небольшие действующие вулканы на дне океана, которые еще предстоит обнаружить. Наконец, мы отказались от попытки перечислить горячие точки на краях соприкасающихся плит. Вулканическая активность этих районов настолько сложна и обильна, что выделить из нее долю, приходящуюся на горячие точки, крайне трудно. Следует, однако, заметить, что

и в некоторых зонах погружения плит обнаруживают лавы, богатые щелочными металлами.

Из 122 идентифицированных горячих точек 53 находятся в бассейнах океанов и 69 на континентах. Для океанических горячих точек отмечена тенденция к группировке на срединных океанических хребтах: 15 из них

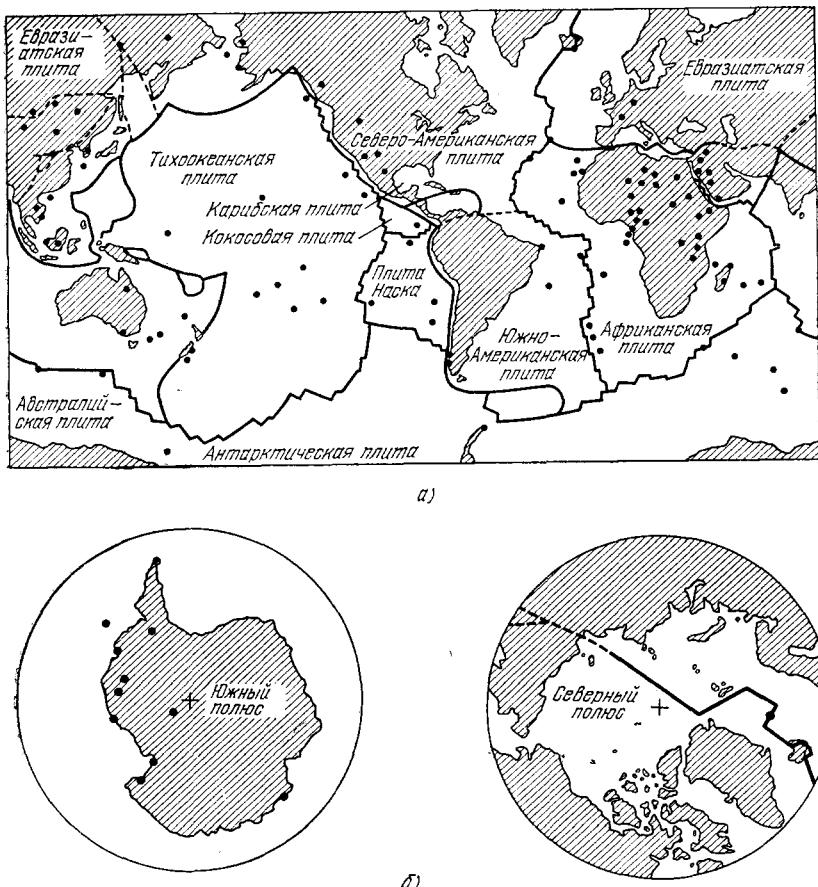


Рис. 6. Географическое распределение горячих точек включает по крайней мере 122 из них, которые были действующими вулканами в течение последних 10 млн. лет.

Горячие точки обнаружены на всех основных литосферных плитах как на океанском дне, так и на поверхности континентов, однако их распределение исключительно неоднородно. Они концентрируются вдоль срединных океанических хребтов, в частности, вдоль Срединного Атлантического хребта. Особенность бросается в глаза, что из 122 горячих точек 43 находятся на Африканской плите. Обилие горячих точек, как и другие доводы, свидетельствуют о том, что положение Африканской плиты на мантии стационарно. Если использовать ее в качестве удобной системы отсчета, можно увидеть, что другие богатые горячими точками области, как, например, Антарктида и Юго-Восточная Азия, должны очень медленно перемещаться, тогда как на относительно быстро движущихся плитах вулканическая деятельность, связанная с горячими точками, проявляется редко. (Рисунок основан на карте, подготовленной В. С. Ф. Киддом.)

лежат непосредственно на гребнях хребтов, а девять других вблизи гребней. Наибольшая концентрация горячих точек, однако, наблюдается в Африке. Африканская плита имеет 43 горячие точки, из них 25 на суше, восемь на море и 10 более или менее вблизи окружающих океанических хребтов.

Наш перечень, даже если предполагать возможные неточности, показывает поразительную неоднородность распространения горячих точек. Африканская плита, составляющая всего 12% поверхности Земли, содер-

жит 35% горячих точек. Крупномасштабная топография Африканского континента также необычна. Для него характерны впадины и возвышенности. Известно также, что в сравнительно недавнюю эпоху Южная и Восточная Африка сильно приподнялись, образовав высокие плоскогорья и Великий Африканский разлом. Топография Африканского материка и обилие горячих точек, безусловно, связаны между собой. И то, и другое можно объяснить в рамках гипотезы, что Африка прекратила свое движение, когда она оказалась над большой группой горячих точек.

Наиболее веское доказательство неподвижности Африканского континента заключается в том, что в его горячих точках находят наслонения лавы самого различного возраста. Если бы Африканский континент перемещался, то эта лава была бы рассеяна в хронологической последовательности. С первого взгляда кажется, что несколько горячих точек вблизи границ Камеруна выстроены в линию подобно островным цепочкам Тихого океана. Однако было установлено, что эти вулканы расположены не в хронологическом порядке. Их выстроенность, по-видимому, является чисто случайной и не имеет ничего общего с движением плиты.

Топография африканских впадин и возвышенностей и поднятие больших областей может быть прямым следствием неподвижности континента. Сейсмические измерения показали, что мантия под материком неоднородна. А если имеются вариации ее состава, то могут встречаться и локальные скопления радиоактивных элементов. Распад этих элементов, который представляет собой основной источник тепла, выделяющегося в недрах Земли, будет приводить к нагреву и расширению

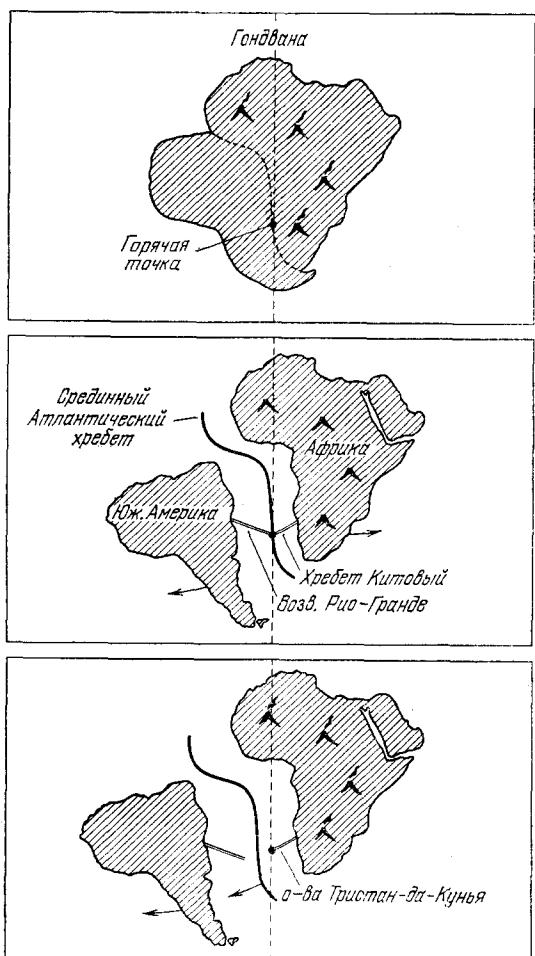


Рис. 7. Образование Южной Атлантики началось 120 млн. лет назад в результате разрыва гигантского южного континента Гондваны. До этого в Африке было очень много вулканов, связанных с горячими точками, что говорит о неподвижности этого континента относительно мантии. Когда разрыв разделил континенты, они стали расходиться симметрично по отношению к формирующемуся Срединному океаническому хребту, и движение Африканской плиты погасило горячие точки. Около 30 млн. лет назад это движение приостановилось, и на Африканской плите началась современная эра вулканической активности. Поскольку расширение океанического дна в районе Срединного Атлантического хребта продолжалось, сам хребет был вынужден смещаться на запад и скорость движения Южной Америки удвоилась. Формирование Срединного Атлантического хребта происходило вдоль линии, включающей несколько горячих точек (на рисунке показана только одна). Пока хребет не двигался, эти горячие точки оставляли следы в виде скальных хребтов вулканического происхождения, идущих к побережью континентов. Когда же Срединный океанический хребет начал мигрировать, горячие точки «ушли» с гребня хребта и остались изолированными на Африканской плите.

одних частей мантии больше, чем других. Воздействие расширения может привести к поднятию ряда областей неподвижного континента, тогда как при перемещении континента оно было бы смазано и его нельзя было бы заметить.

Как обобщение этих наблюдений, напрашивается вывод, что существует четкая связь между количеством горячих точек на континенте и скоростью его движения над мантией. Помимо Африки, много горячих точек находится в Антарктике, Китае и Юго-Восточной Азии. Сравнение доли горячих точек, приходящихся на сушу и морское дно, показывает, что хотя Африка неподвижна, эти области перемещаются, правда, очень медленно. В противоположность этому на континентальных плитах, которые движутся со сравнительно большой скоростью, как, например, в Северной и Южной Америке, вулканизм, связанный с горячими точками, встречается исключительно редко.

### РОЖДЕНИЕ АТЛАНТИКИ

Датирование слоев горных пород показывает, что до разрыва Гондваны 120 млн. лет назад Африка имела множество действующих<sup>1</sup> вулканов. Затем вулканическая активность ослабла и возобновилась снова лишь 30 млн. лет назад. Два активных периода и длительный перерыв между ними можно рассматривать как указания на последовательные стадии образования Атлантического океана. Ранний период вулканической деятельности говорит о том, что пока Африка оставалась частью Гондваны, она неподвижно лежала на мантии. Когда произошел разрыв этого суперконтинента вдоль нынешней линии Срединного Атлантического хребта, Африка начала двигаться на восток. Перемещение ее над мантией в течение последующих 90 млн. лет погасило вулканическую активность. Можно предположить, что формировавшийся тогда Срединный Атлантический хребет был стационарным и два континента расходились от него в разные стороны симметрично, поворачиваясь в противоположных направлениях относительно точки, расположенной в районе мыса Фаруел на побережье Гренландии.

Около 30 млн. лет назад движение Африканской плиты прекратилось. Вулканическая деятельность на континенте возобновилась и продолжается по сей день. Хотя Африканская плита и остановилась, расширение морского дна вблизи нее продолжалось. В результате, Срединный Атлантический хребет был вынужден начать дрейфовать на запад. Относительное движение Африки и Южной Америки не изменилось, но скорость перемещения Южно-Американской плиты по отношению к мантии удвоилась. В настоящее время в нескольких сотнях километров к востоку от места, где 30 млн. лет назад проходила линия разлома литосфера, находятся несколько горячих точек, включающих острова Тристан-да-Кунья и остров Вознесения.

Доказательства подвижности Срединного Атлантического хребта можно найти на океанском дне. От островов Тристан-да-Кунья к северо-востоку отходит гряда подводных скал вулканического происхождения, называемых хребтом Китовым. Его, безусловно, можно считать следом горячих точек, действовавших на раннем этапе расширения океана (когда Срединный Атлантический хребет еще покоялся, а Африка перемещалась), так как он смыкается с остатками лав на побережье Африки, которые относятся к периоду разрыва Гондваны. По другую сторону Срединного Атлантического хребта к побережью Бразилии идет такая же гряда подводных вулканических скал — возвышенность Рио-Гранде. Однако на ее краю, обращенном к океану, нет горячих точек, которые находились бы

от Срединного океанического хребта на расстоянии, эквивалентном 30 млн. лет.

Всем этим фактам можно найти объяснение, если считать, что в момент рождения Атлантики Тристан-да-Кунья уже был действующим вулканом, лежащим непосредственно на линии разлома, где началось образование

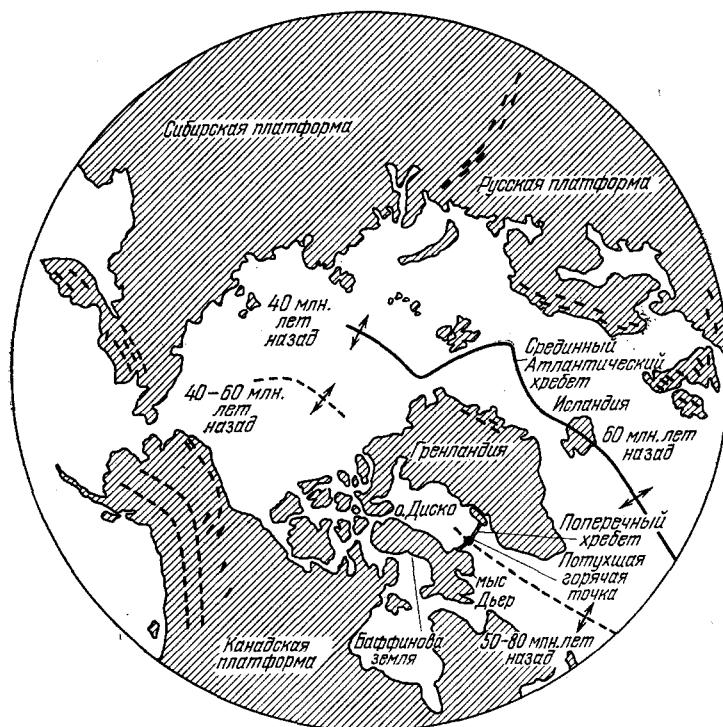


Рис. 8. Подводные хребты в Северной Атлантике и Северном Ледовитом океане указывают на то, что центр расширения океанского дна изменился между 50 и 60 млн. лет назад.

Первоначально континентальные плиты разделялись подводным хребтом, лежащим к западу от Гренландии, что привело к появлению моря Баффина. Потухшая горячая точка зарегистрировала это движение в виде следов — вулканических скал, которые простираются от этого хребта к мысу Дьер на Баффиновой земле и к острову Диско у побережья Гренландии. Около 60 млн. лет назад центр расширения океана переместился на свою современную линию к Срединному Атлантическому хребту, который проходит восточнее Гренландии.

оceania. Лава из этой горячей точки стекала по обе стороны хребта и уносилась затем расходящимися плитами. Продолжительные извержения привели к образованию V-образной пары следов. Когда же Срединный океанический хребет начал свое движение на запад, горячая точка осталась позади на покоящейся Африканской плите. Она уже не могла образовать боковую гряду, вместо этого последующие потоки лавы просто наслаждались друг на друга. Сегодня на островах Тристан-да-Кунья встречаются молодые вулканические породы вместе с лавами, датируемыми по крайней мере 18 млн. лет. Поскольку на Американской плите лава больше не выделялась, образование возвышенности Рио-Гранде также закончилось.

Так как горячие точки очень характерны для океанических хребтов и, по-видимому, определенным образом влияют на их положение, есть основания считать, что гребень Срединного Атлантического хребта когда-нибудь снова вернется обратно к тем горячим точкам, которые были им

оставлены. Если это произойдет, то разрыв между хребтом Китовым и возвышенностью Рио-Гранде, образовавшийся за последние 30 млн. лет, останется как напоминание об этой геологической эпохе.

Океанское дно Северной части Атлантического океана может поведать несколько иную историю. Северная Атлантика образовалась благодаря повороту Евразии и Северной Америки около точки, лежащей в Северном Ледовитом океане. Но, как указывалось выше, Американская плита в результате ее отделения от Африканской пришла во вращение около

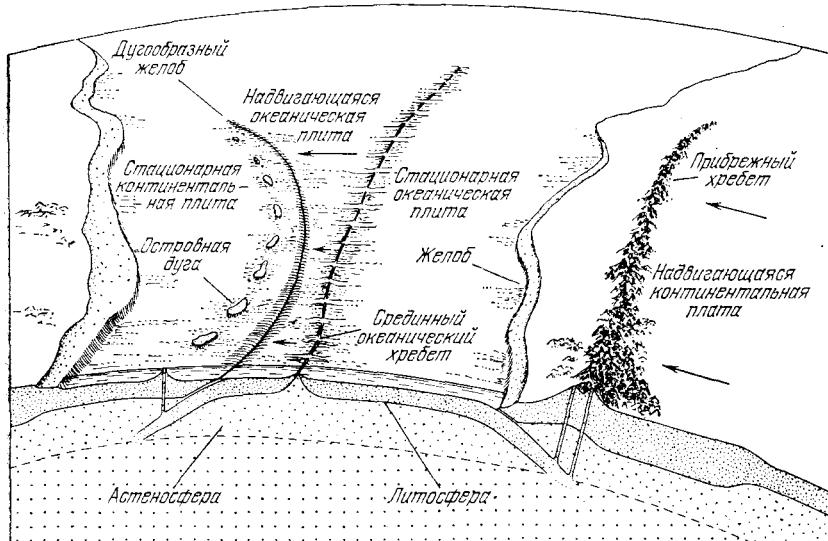


Рис. 9. Столкновения литосферных плит могут принимать две различные формы.

Там, где океаническая плита надвигается на неподвижную континентальную, тонкую и гибкую кору океанского дна выгибается от побережья, образуя характерную дугообразную картину. Возникающие над зоной субдукции вулканы приводят к образованию островной цепи, подобной, например, Японии или Индонезии. Когда же движущийся континент наползает на стационарную океаническую плиту, опускающийся кусок литосферы вынужден прогибаться вдоль береговой линии. В результате на континенте возникают вулканы, образующие горную систему, подобную Андам.

полюса, расположенного на побережье Гренландии вблизи мыса Фаруэл. Единая плита не может поворачиваться около двух фиксированных полюсов вращения одновременно, поэтому и сам арктический полюс вращения пришел в движение. В результате произошел сдвиг в положении северного края Срединного Атлантического хребта.

Когда 80 млн. лет назад началось образование Северной части Атлантического океана, центр расширения океанского дна находился западнее Гренландии. Этот процесс привел к созданию 50 млн. лет назад моря Баффина. Потухшая горячая точка оставила две боковые гряды, идущие в направлении к острову Диско у берегов Гренландии и мысу Дьер на Баффиновой земле. Тем временем 60 млн. лет назад к востоку от Гренландии возник новый Срединный океанический хребет. С тех пор континенты стали расходиться уже относительно этой линии.

#### ДВИЖЕНИЕ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ

Мы видели, что горячие точки дают нам в руки удобную систему отсчета для преобразования относительного перемещения литосферных плит в их движение по отношению к мантии. Эта система отсчета была использована для выяснения одного важного аспекта поведения плит, который до этого не был должным образом выяснен.

Когда океаническая плита сталкивается с континентальной, край океанической плиты обычно опускается в мантию и исчезает. Это происходит потому, что континентальные плиты толще океанических и более

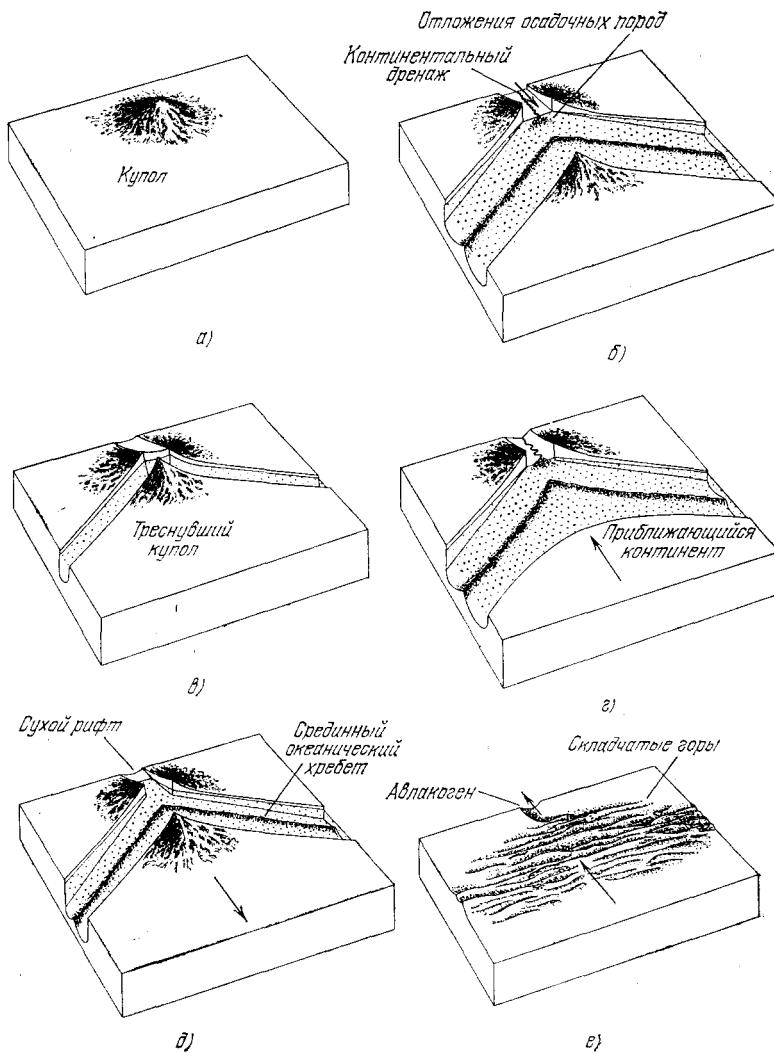


Рис. 10. Вспучивания и рифты, связанные с горячими точками, могут быть причиной разрыва континентов и рождения новых океанов.

На континенте, который неподвижно лежит на мантии, обозначается куполообразное вспучивание, нередко увенчанное вулканом (a). Рифты, возникающие на куполе (e), часто имеют трехлучевую структуру. Два из трехлучевого рифта расширяются и могут привести к рождению нового океана (b), а третий прекращает свое развитие. Этот рифт может превратиться в широкую речную долину, пронизывающую континент и переносящую осадки к новому морю (d). Позже другой континент приближается к центру первоначального рифта и закрывает океан (e). В результате такого столкновения вырастает пояс складчатых гор, который поворачивает дренажную систему континента вспять, благодаря чему все осадки откладываются уже в желобе, образованном третьим лучом рифта. Последний часто заполняется отложениями и от рифта остается глубокая впадина, наполненная осадочными породами и идущая приблизительно перпендикулярно горной цепи (e). Советский геолог Николай Шатский назвал такие образования авлакогенами.

«плавучи» на мантии. Частичное плавление погружающейся плиты приводит к появлению вулканической активности над зоной субдукции, однако такая активность имеет два совершенно различных поверхностных проявления.

В некоторых случаях в океане возникает островная дуга. Наиболее четкие примеры этого процесса можно встретить на юге Азии, где в зоне субдукции Индийско-Австралийской плиты возник Индонезийский архипелаг, а также на востоке этого материка, где погружение Тихоокеанской и Филиппинской плит породило Японские острова и Филиппины. В других случаях вулканическая активность проявлялась на самом континенте. Так, например, Анды были образованы в результате опускания плиты Наска, а горная цепь Сьерра-Невада в Калифорнии и береговой хряж в Британской Колумбии — Тихоокеанской плиты.

Оставалось непонятным, почему один и тот же процесс мог привести к двум совсем несхожим последствиям. Можно попытаться ответить на этот вопрос, если сопоставить движение плит с положением горячих точек. Такое сравнение показывает, что островные дуги образуются в том случае, когда континент покоятся на мантии, и океанское дно опускается под него. Береговые же горные цепи вырастают там, где континент надвигается на неподвижную океаническую плиту.

Единственное правдоподобное объяснение одинаковой форме островных дуг было предложено Ф. Франком из Бристольского университета. Он указал на то, что гибкая, но нерастяжимая тонкая сферическая оболочка может изогнуться или треснуть только по круговой дуге. Это легко продемонстрировать, сжимая мячик для настольного тенниса. По-видимому, там, где океанское дно смещается и способно принимать нужную форму, образуются островные цепи в виде характерной дуги с изгибом, обращенным к океану. С другой стороны, если перемещается континент, океаническая плита успевает опуститься еще до того момента, когда может возникнуть островная дуга. Известные нам перемещения плит в районе Тихого океана подтверждают эту догадку. Океанические плиты Тихого океана надвигаются на Евразию и подползают под нее, но сами они с востока подминаются Американскими континентальными плитами.

### ВСПУЧИВАНИЯ И РИФТЫ

До сих пор мы рассматривали горячие точки главным образом как индикаторы движения плит. Но они могут, кроме того, инициировать циклы тектонической активности.

Когда движение континента приостанавливается, купол, который вспучивается над горячей точкой, может треснуть. Возникающий разлом — рифт — очень часто имеет характерную форму трехлучевой трещины. Сорок лет назад немецкий геолог Ганс Клоос доказал преобладание разломов такого вида и показал, что они чаще всего связаны со вспучиванием континентальной корки. Естественно предположить, что подобные рифты могут оказаться теми зародышами, из которых возникают океаны. Отсюда следует, что одной из причин разрыва континента может быть прекращение его движения на мантии. При этом горячие точки, хотя и не обязательно только они, могут инициировать такой разрыв.

Если бы этот механизм был тесно связан с процессами образования океанов, можно было бы легко понять наблюдаемую концентрацию горячих точек на срединных океанических хребтах. То, что нам известно о разрыве Гондваны, хорошо согласуется с подобной интерпретацией. Следует помнить, что до того как Гондвана раскололась, Африка была стационарной.

В типичном случае два луча рифта дают начало океанической впадине, третий же не участвует в этом процессе и остается в виде трещины в теле континента. Восстановливая положение границ Атлантического океана ко времени разрыва Пангеи, можно убедиться в изобилии трех-

лучевых рифтов. Продолжающие друг друга два луча рифта сливаются, положив начало образованию океана, а третий так и остается в виде рифта, распространяющегося внутрь материка. Ярким примером последнего

Ярким примером последнего на побережье Атлантики может служить рифт Бенуэ, который идет из Гвинейского залива в Экваториальную Африку.

Другой, более позднего происхождения, но гораздо сильнее бросающийся в глаза пример можно наблюдать сегодня в том месте, где Аравийский полуостров отходит от Африки. Красное море и Аденский залив представляют собой два из трех лучей рифта. Третий «сухой» луч вонзается в Эфиопию из так называемого Афарского треугольника. Симметрия этой картины весьма примечательна. Тот факт, что Африка оставалась в покое над мантейей последние 30 млн. лет и что она хранит множество примеров вспучиваний и разломов ее поверхности, говорит о том, что мы являемся свидетелями начальных стадий разрушения Африканского континента.

## АВЛАКОГЕНЫ

Современный цикл текtonической активности, который начался распадом Пангеи — не единственный в геологической истории Земли. Понимание того, что горячие точки, вспучивания и разломы земной поверхности являются последовательными стадиями процесса дробления континентальной массы, привело к открытию, которое оказалось ключевым на пути воссоздания ранних этапов миграции литосферных плит.

Рис. 11. Преобладание трехлучевых рифтов подтверждается реконструкцией прежнего расположения континентов бассейна Атлантического океана.

В большинстве случаев два из трех лучей рифта вились в Атлантический океан, в то время как третий остался сухим. Похожий процесс можно наблюдать и в наши дни в том месте, где Аравийский полуостров отходит от Африки (слева вверху). Аденский залив и Красное море образуют два рукава рифта, а третий идет из Афарского треугольника в Эфиопию и Сомали.

В 1941 г., когда немецкие войска угрожали основным нефтедобывающим районам СССР, советский геолог-стратиграф Николай Шатский предпринял поиски осадочных пород, которые могли бы содержать новые запасы нефти. Стратиграфические данные, собранные Шатским и его

коллегами, позволили заметить новую, доселе неизвестную картину. На большей части Русской и Сибирской платформ осадочные слои имеют глубину около километра. Но геологи нашли несколько узких желобов длиной до 800 км, где глубина осадочных пород примерно втрое превышала нормальную. Эти образования получили название авлакогены, что



Рис. 12. Авлакоген в южной части Оклахомы — напоминание о ранней стадии дрейфа континента.

Эта фотография сделана в декабре 1972 г. с искусственного спутника Земли. Авлакоген начинается на равнине в нижней части фотографии и распространяется на 400 км к западу. На севере находятся горы Оуачита. Когда 600 млн. лет назад к югу и востоку вырастал океан, авлакоген был слепым рукавом трехлучевой рифтовой системы. Сжатие океана подняло хребты Оуачита и Аппалачи. Эрозия Оуачита еще более увеличила количество отложений в рифте и привело к образованию слоя толщиной 15 км.

соответствует греческому «рожденные в желобе». Авлакогены — это рифты, которые идут из зоны складчатых гор внутрь континентальной платформы.

Сейчас мы можем идентифицировать авлакогены как слепые лучи трехлучевых рифтовых систем. В то время как два основных луча привели к образованию океана, третий так и остался рифтовым желобом, вонзающимся в сушу с побережья океана. Такой рифт стал частью общей дренажной системы континента, аккумулируя в себе толстый слой осадочных пород. Позже к берегу приблизился другой континент, закрыв океан и блокировав устье рифта. Силы сжатие, возникшие при столкновении континентальных плит, породили цепь складчатых гор. Таким образом,

от рифта осталось глубокое ложе осадочных пород, идущее почти перпендикулярно к горной цепи.

Авлакогены, которые Шатский обнаружил в СССР, датировались палеозойской эрой (между 225 и 600 млн. лет). Несколько позже сотрудник Канадской геологической службы Пауль Хоффман описал образование, названное им авлакоген Атхапусков, возраст которого около двух миллиардов лет. Он подстилает восточный рукав Большого Невольничьего озера в северной части Канады. Сам Шатский тоже указал на образование, которое, по-видимому, является наиболее развитым авлакогеном в Северной Америке. Он представляет собой слой осадочных пород глубиной 15 км, находящийся на юге Оклахомы и идущий параллельно границе штата Техас. Это образование возникло как рифт около 600 млн. лет назад, когда приблизительно на месте теперешней северной Атлантики возник океан. Прекращение существования этого океана привело к возникновению горных цепей Каледония, Аппалачи и Оуачита. Эти древнейшие авлакогены доказывают, что циклы распада и преобразования континентов продолжаются по крайней мере два миллиарда лет. Развитие куполов и рифтов на континентах, которые остановились над горячими точками, является частью процессов, характерных для всего этого периода.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- J. A. Jacobs, R. D. Russell, J. T. Wilson, *Physics and Geology*, N.Y., McGraw-Hill, 1959.  
 K. Burke, J. T. Wilson, *Nature* 239 (No. 5372), 387 (October 13, 1972).  
 J. T. Wilson, K. Burke, *ibid.*, No. 5373, 448 (October 20).  
 K. Burke, J. F. Dewey, *J. Geol.* 81, 406 (1973).  
 K. Burke, W. S. F. Kidd, J. T. Wilson, *Nature* 245 (No. 5421), 113 (September 21, 1973).