

В. В. БЕЛОУСОВ

АКАДЕМИЯ НАУК  
СССР

НАУЧНО  
ПОПУЛЯРНАЯ  
СЕРИЯ

ЗЕМЛЯ

ЕЕ СТРОЕНИЕ

И РАЗВИТИЕ

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

Научно-популярная серия

В. В. Белоусов

---

З Е М Л Я,  
ЕЕ СТРОЕНИЕ  
И РАЗВИТИЕ

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР

Москва 1963

В книге члена-корр. АН СССР В. В. Белоусова рассказывается, как образовалась наша Земля, из чего она состоит, какие процессы происходят в ее глубинах и на поверхности, как возникают месторождения полезных ископаемых и какова методика геологических исследований. Используя новейшие данные в области геологии и геофизики, автор дает стройный очерк истории развития земного шара, уделяя особое внимание наиболее трудным вопросам современной науки о Земле, и намечает проблемы, подлежащие изучению в будущем.

---

## Вступление

Мы живем на заре космической эры. На наших глазах человек начал прокладывать первые пути в межпланетное пространство. Мощь советской науки и техники вывела первых космонавтов на орбиты вокруг Земли. Прогресс в космоплавании стремителен. Нет сомнения в том, что пройдет совсем немного времени и советские космонавты высадутся на других планетах солнечной системы — на Луне, Венере, Марсе... А в дальнейшем мощные космические корабли понесут исследователей и за пределы солнечной системы.

Но как бы далеко ни занесли космонавтов звездоплавательная техника будущего и неудержимое стремление человека познать другие миры, космонавты всегда будут возвращаться домой — на родную Землю. Именно на Земле они будут строить все более мощные межпланетные и межзвездные корабли и тут они будут, обрабатывая результаты своих удивительных путешествий, проникать во все новые тайны мироздания. Становясь гражданином Вселенной, человек все же сохранит свой дом на Земле. Здесь он будет жить своей обычной человеческой жизнью, здесь он будет работать, производя все то, что надо для быта, технического прогресса и всеобщего благосостояния.

Находить средства для своей созидательной работы человек будет еще очень долго не в других мирах, а все на той же старой испытанной Земле.

И можно быть уверенным, что Земля и дальше будет одаривать человечество всем тем, что ему нужно для жизни, развития и прогресса в дополнение к тому, что она уже дала раньше.



Человеку были и будут во все возрастающем размере нужны различные металлы. Они добывались и будут добываться из земных недр, где они сосредоточены в виде металлических руд. Современная техника быстро расширяет перечень тех металлов, которые ей необходимы. Еще несколько лет назад некоторые металлы причислялись к «редким землям» и представляли лишь теоретический интерес, а сейчас они являются предметом энергичных поисков и добываются для технических нужд. Таковы, например, германий, кадмий, бериллий, цезий и многие другие.

Человек нуждается и будет нуждаться в источниках энергии. Частично он пользуется солнечной энергией, овеющей в мощи водных потоков и ветра. Но в значительной степени он пользовался и до сих пор пользуется солнечной энергией, аккумулированной миллионы лет назад в недрах Земли в виде угля, нефти и горючего газа. Непрерывно продолжаются поиски новых месторождений этого «энергетического сырья» и наша потребность в нем будет все возрастать, хотя в будущем, конечно, ядерное энергетическое сырье постепенно заменит старые источники энергии. Но ядерное энергетическое сырье хранится тоже в недрах земной коры! Основное значение имеет уран, который встречается в земной коре в виде различных минералов.

Земные недра дают энергию для использования ее человеком не только в виде горючих горных пород и радиоактивных минералов: глубинная энергия Земли проявляется в вулканических извержениях, в выходящих на поверхность горячих водных струях, а также в постоянном потоке тепла, непрерывно текущего из глубины Земли к поверхности. Вулканическая энергия уже используется в некоторых странах. Начинают ее использовать и у нас на Камчатке. Но будущие сверхглубокие скважины практически в любом месте достигнут слоев горных пород, нагретых на сотни градусов и, таким образом, являющихся источниками тепловой энергии.

Мы видим, что и источники энергии не только теперешние, но и будущие, тесно связаны с недрами нашей планеты.

Многие горные породы: глина, песок, галька, мергель, известняк используются как строительные материалы при

постройке зданий, дорог, мостов, плотин. Писатели-фантасты мечтают о том, что в будущем глубочайшие скважины, достигшие раскаленных глубин, будут выводить на поверхность струи расплавленного базальта, из которого можно будет быстро сооружать огромные дамбы и даже, может быть, новые острова или наращивать площадь материков.

Это, конечно, фантазия, против которой сейчас можно выдвинуть много возражений. Но разве в стремительном прогрессе исследований космического пространства не слились фантастика и действительность так, что уже совсем трудно стало установить, где кончается одна и начинается другая?

Мы видим, что недра Земли давали, дают и будут давать человечеству огромные количества самого разнообразного сырья, без которого немислимы ни сохранение завоеваний современной цивилизации, ни технический прогресс, ни тем более строительство коммунизма, требующее, как известно, изобилия всех видов минерального сырья.

И вот тут перед нами возникают вопросы: а хватит ли этого минерального сырья? Достаточны ли его запасы в недрах Земли? Не случится ли так, что в некий печальный день жизненно важное минеральное сырье окажется израсходованным и человечество очутится в катастрофическом положении?

На эти столь прямо поставленные вопросы можно дать столь же прямой и вполне уверенный ответ: нет, этого не случится, так как не подлежит сомнению, что запасов сырья в недрах нашей планеты спрятано еще столько, что их хватит на многие тысячи поколений вперед. Примером является территория нашей страны. Когда-то, до революции, наши недра считались совсем бедными и в добыче самых необходимых полезных ископаемых — угля, нефти, железа — царская Россия отставала от многих, даже малых, стран Европы. А сейчас мы по несколько раз в год узнаем об открытии у нас то там, то здесь новых крупнейших месторождений — нефти, природных газов, железа, алмазов, других не менее важных полезных ископаемых. И размеры этих запасов из года в год растут, несмотря на то, что и потребление их все время увеличивается.

Огромные неизведанные запасы разнообразного минерального сырья хранятся в глубинах Земли. Не следует также забывать, что до сих пор вся добыча полезных ископаемых сосредоточивалась на суше. Лишь совсем недавно нефть и природный газ стали добывать и со дна мелких морей. Огромные же площади глубоких морей и океанов остаются пока в своей девственной неприкосновенности. А ведь океаны покрывают больше двух третей поверхности Земли. Если даже земная кора под глубокими морями и океанами окажется менее богата полезными ископаемыми, чем кора под материками, все же запасы сырья, которые будут там открыты, когда это позволит развитие техники, будут огромны.

Но успокоив себя тем, что земной шар не откажет нам в своих дарах, мы должны подумать и о том, что эти дары не рассыпаны повсеместно; для того чтобы их найти и собрать, нужны труд и умение.

В самом деле, отдельные виды полезных ископаемых образуют скопления в разных местах. Там, где встречаются нефть и горючий газ, безнадежно искать металлические руды. Последние обнаруживаются в тех районах, где уголь или нефть не встречаются. А есть и такие районы, где, несмотря на длительные поиски, так и не удалось обнаружить ничего полезного. Следовательно, было бы, конечно, крайне неразумно искать любые полезные ископаемые всюду в надежде, что в конце концов поможет счастливый случай. Ясно, что помимо труда, в это дело надо вложить и умение, с помощью которого можно заранее предвидеть, где какие полезные ископаемые следует разыскивать.

Таким умением геологи действительно обладают. Полезные минералы и горные породы образуются в земной коре как продукт ее развития. Земная кора поднимается и опускается, в ней появляются трещины; на ее поверхности накапливаются рыхлые осадочные горные породы, и на поверхность же изливается лава вулканов; расплавленная магма, поднявшись из глубины, застывает внутри земной коры, под ее поверхностью и образует твердые кристаллические горные породы; а там, где земная кора сильно поднялась, текучая вода и ветер разрушают ранее образовавшиеся горные породы и обломки их переносятся на новые места; движения земной коры вверх и вниз

приводят к образованию гор и крупных впадин, сминают слои горных пород в складки.

Все эти перемены влияют на образование металлических руд и других полезных ископаемых. Многие руды поднимаются в виде горячих паров или жидкостей вместе с магмой с раскаленных глубин и отвердевают в форме кристаллов в трещинах, не дойдя до поверхности Земли. Нефть и газ образуются в осадочных горных породах из остатков давно вымерших организмов, и для их накопления нужна спокойная обстановка: пологие и широкие выпуклости осадочных слоев. Если же трещины разрежут скопления этих столь подвижных полезных ископаемых или их прогреет вулканическая лава, то нефть и газ улетучатся, их месторождения будут разрушены.

Зависимость образования полезных ископаемых от особенностей общего развития земной коры и используют геологи, чтобы определить, куда, в какой район, в какую геологическую провинцию надо направить поиски какого-либо определенного полезного ископаемого. Для того чтобы правильно использовать эту зависимость, геолог исследует геологическое строение местности — составляет геологическую карту и изучает геологическую историю. На геологической карте изображается распространение различных горных пород на поверхности. По такой карте можно судить о распространении разных пород и на некоторой глубине под земной поверхностью. А чтобы узнать, как они распространены на еще большей глубине, используют буровые скважины и геофизические методы разведки, позволяющие как бы просвечивать землю и заглядывать внутрь нее. Изучая горные породы, их состав и строение, то, как слои лежат в земной коре — горизонтально, наклонно или образуя складки, геолог расшифровывает историю какого-либо участка земной коры, устанавливает последовательность разных событий на нем — поднятий и опусканий земной коры, накопления осадков, смятия слоев в складки, вулканических извержений. Из сопоставления результатов таких исследований, проведенных в разных районах, рождаются представления об общих особенностях и закономерностях развития земной коры в целом.

Это все нужно, как мы видим, для практики, для того, чтобы правильнее ставить прогноз: где какие полезные

ископаемые могут быть найдены в земной коре. Но те же вопросы, как легко понять, представляют и огромное научное теоретическое значение. В самом деле, если мы изучаем с большим интересом состав и строение Солнца, состав и строение самых далеких звезд и туманностей, то как же нам не заинтересоваться строением и развитием той планеты, на которой мы живем и от которой мы буквально во всей своей жизни и своей деятельности всецело зависим? Как не заинтересоваться вопросами происхождения материков и океанов, причинами образования гор и смятия слоев в складки, источниками вулканических сил?

Такой научный интерес в наши дни тем более оправдан, что сейчас возникло положение, когда строение других звезд и свойства космического пространства мы знаем в некоторой мере даже лучше, чем строение и свойства вещества земного шара. Действительно, самые глубокие буровые скважины достигают глубины всего несколько более 7 км. С помощью геофизических методов данные, которые получены скважинами, можно распространить вглубь еще на несколько километров. Однако чем глубже, тем неопределеннее становятся наши заключения, и в наших представлениях о составе и строении недр на глубине, которая едва ли значительно превышает десяток километров, уже больше предположений, чем достоверных знаний. И чем глубже мы проникаем в недра Земли, тем больше доля гипотез и догадок, тем больше разногласий во мнениях ученых.

На первый взгляд может показаться, что такое положение не может привести к каким-либо опасным последствиям, так как речь идет о глубинах, которые сейчас лежат за пределами технических возможностей достижения их с помощью скважин и которые, следовательно, не представляют практического интереса.

В действительности, однако, это совсем не так. Во-первых, можно заметить, что в последние десятилетия добыча полезных ископаемых опускается на все более глубокие этажи земной коры. Если 30—40 лет назад полезные ископаемые добывались преимущественно с глубин в сотни метров, то теперь для нефти, например, глубина добычи в 3—4 тысячи метров становится обычной. Такое углубление разработок связано с тем, что хотя

запасы полезных ископаемых в земной коре еще и очень велики, но в поверхностных, наиболее легко доступных частях земной коры они начинают постепенно исчерпываться и геологическая разведка вынуждена забираться все глубже и глубже. Этот процесс будет, видимо, продолжаться, и поэтому чем дальше, тем более глубокие недра будут нас близко интересовать. Это означает увеличение глубины скважин, повышение роли геофизических методов разведки. Но это означает также и повышение роли науки, теории. Действительно, когда разыскивались месторождения, залегающие близко к поверхности, самых общих приблизительных соображений о том, где их следует искать, было достаточно, так как месторождения обнаруживались по поверхностным признакам после приблизительного выбора района, грубо говоря — путем выхаживания геологом данного района по поверхности и ознакомления с теми горными породами и минералами, которые здесь встречаются.

Для поисков на глубине такой метод уже неприемлем. Глубоко залегающие месторождения обычно не имеют никаких признаков на поверхности, и их можно обнаружить только буровыми скважинами. А ими невозможно так тесно «истыкать» местность, как может покрыть ее геолог своими пешими маршрутами. Значит, место возможного скопления полезных минералов надо определить гораздо точнее, чем это делалось раньше, чтобы знать наперед, где именно следует закладывать скважины с наибольшими шансами на успех. Определять же это можно лишь с помощью научных умозаключений, основанных на знании закономерностей развития и строения земной коры. Вот почему с этой точки зрения роль науки, проникающей своим умственным взором на все большие глубины в недра Земли, сейчас значительно повышается.

Во-вторых, чем больше мы занимаемся глубинами земного шара, тем яснее становится, что причины процессов, происходящих в верхних частях коры, лежат в глубоких ее слоях, а причины того, что совершается в этих последних, лежат еще глубже — в так называемой верхней мантии Земли. Таким образом, более глубокие процессы являются причиной событий в более высоких горизонтах. Поэтому, чтобы понять, что и как происходит в технически доступной для нас части недр, мы должны

заглядывать глубже, а как только эти более глубокие недра становятся более или менее известными, сейчас же возникает необходимость для лучшего их понимания идти еще глубже.

Пока такая непрерывная цепочка взаимно обусловленных событий довела нас до подошвы верхней мантии, т. е. до глубины около 1000 км. Таков по современным представлениям активный слой Земли, влияющий на геологические события в поверхностных, наиболее близких к нам слоях коры. Но вполне возможно, что на этой глубине нам не придется остановиться, и те или иные признаки заставят нас в поисках первопричин опускаться еще глубже. Впрочем, мы и сейчас знаем, что по крайней мере одно поверхностное явление — магнитное поле Земли, отражающееся на магнитной стрелке компаса, связано с явлениями, происходящими в земном ядре. Таким образом, для того чтобы объяснить, что происходит на поверхности земной коры или в ее верхних слоях, и применить это объяснение к решению практических задач, нам необходимо изучать весь земной шар в целом. Да это, собственно, и естественно, так как несомненно, что земной шар составляет нечто целое, отдельные части которого взаимно связаны и в своем развитии зависят друг от друга и от всех вместе. В этом можно быть заранее уверенным, исходя из общих принципов диалектического единства в природе, и в правильности этого принципа мы лишний раз убеждаемся на примере строения и развития земного шара.

Это наше заключение приводит к выводу, к которому в последнее время приходят и в других науках, а именно к тому, что грань между чисто теоретическими проблемами и проблемами практическими стирается и то, что вчера казалось имеющим лишь теоретический интерес, сегодня оказывается важнейшей опорой для практических заключений. Теория объединяется с практикой, являясь, в сущности, авангардом, предварительно разведывающим те области, в которые через день вступит практика. Вопросы о том, двигаются ли материки, образуются ли новые океаны на месте бывших материков или новые материки на месте бывших океанов, каково происхождение сил, поднимающих горы и сминающих слои горных пород в складки, пока имеют преимущественно теоретическое

значение, но в них все более определенно начинает проявляться и практический смысл, потому что полностью понять и предвидеть конкретные особенности строения и развития отдельного небольшого участка земной коры, как оказывается, возможно только в том случае, если мы будем знать, какие силы действуют в земной коре вообще и какова общая направленность ее развития.

Не следует забывать также идеологического значения правильных представлений о строении и развитии Земли, их роли в создании научного материалистического мировоззрения.

В этой книге автор рассказывает читателю, какие проблемы стоят сейчас перед наукой о Земле, какие методы используются для решения этих проблем, к каким выводам приходят сейчас ученые относительно состава, строения и законов развития земного шара. Читатель узнает, что за последнее время в науке о Земле достигнуты большие успехи, главным образом благодаря развитию новых геофизических методов исследования, и что многое относительно устройства земных недр сейчас нам стало гораздо яснее, чем всего несколько лет назад. Но неясного, непонятого осталось еще больше. В сущности, самая основа развития нашей планеты — происхождение сил, вызывающих движения и деформации земной коры, — остается не известной. Это заставляет многих специалистов призывать к усилению исследований земных недр, так как практические требования к науке о Земле за последнее время начинают быстро опережать ее устаревающие теоретические возможности. К этой цели направлен известный проект бурения сверхглубоких скважин. Тем же задачам служит широкая программа комплексных геолого-геофизических исследований, известная под именем «Проекта верхней мантии». Об этих и других планах дальнейших исследований рассказывается на последующих страницах.

Особенностью новейших планов является то, что ими предусмотрено объединение усилий не только геологов, геофизиков и геохимиков, для которых Земля служит основным объектом исследований, но и представителей других наук — физиков, химиков, математиков. На пути к пониманию внутреннего строения и развития Земли сейчас возникает много чисто физических и химических



задач, а математика требуется для правильного расчета и выяснения относительного значения тех сил, которые действуют в земной коре и в более глубоких оболочках под влиянием происходящих в них процессов. В чем конкретно состоят эти вопросы — будет видно из дальнейшего. Автору будет особенно приятно, если некоторые из этих вопросов будут интересны представителям перечисленных смежных наук и они захотят внести и свой вклад в раскрытие тех тайн, которых еще так много остается в недрах Земли.

## Из чего состоит земная кора?

В 80-х годах прошлого столетия американский ученый Кларк задался целью определить средний химический состав земной коры. Для этого он собрал все химические анализы известных в его время горных пород и вывел из них среднее. Конечно, Кларк знал, что различные горные породы, рыхлые и мягкие, подобные песку или глине, и твердые, вроде гранита или базальта, распространены на поверхности Земли весьма неравномерно: некоторые горные породы слагают большие участки земной поверхности, другие же встречаются редко и только в виде маленьких пятен. Например, больше половины площади Канады, почти вся Швеция и вся Финляндия покрыты сплошными выходами на земную поверхность гранитов. Огромные площади слагают граниты и сходные с ними горные породы в Африке, Южной Америке, Индии, Австралии и в других местах. В то же время существуют такие горные породы (например, щелочные, содержащие повышенные количества калия или натрия), которые можно найти на поверхности Земли лишь в виде отдельных мелких пятен, общая площадь которых для всех материков не превысит нескольких сотен тысяч квадратных километров.

Но Кларк, делая свои подсчеты, исходил из предположения, что чем чаще та или иная горная порода встречается на земной поверхности, тем больше образцов ее подвергалось химическому анализу и что поэтому относительное число химических анализов для каждой горной породы достаточно хорошо отражает относительную распространенность пород на поверхности.

Впоследствии многие ученые указывали на то, что это смелое предположение Кларка не может считаться

правильным: некоторые наиболее редкие горные породы подвергались химическим исследованиям непропорционально часто именно потому, что из-за своей редкости и необычности они больше привлекали внимание геологов. Как показали более поздние исследования, данные, полученные Кларком, как средние из 6000 анализов, для наиболее распространенных химических элементов оказались все же близкими к истине. Величины же, которые он получил для менее распространенных элементов, в дальнейшем были значительно изменены. Чтобы отметить заслугу Кларка, впервые познакомившего нас, хотя бы приблизительно, с общим химическим составом земной поверхности, ученые условились называть процентное содержание элемента в земной коре «кларком» этого элемента. Таблица Кларка была опубликована в 1889 г.

Финский геолог Седерхольм сделал попытку вычислить средний химический состав земной коры, учитывая относительный размер площади, занимаемой каждой горной породой. Он не мог этого сделать для всего земного шара и ограничил свои подсчеты лишь территорией Финляндии. Расхождение с данными Кларка получилось довольно большим. Так, например, среднее содержание кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ) в горных породах Финляндии у Седерхольма получилось равным 67,70%, тогда как у Кларка среднее содержание кремнезема в породах всего мира было равно 60,58%. Напротив, содержание глинозема ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), полуторной окиси железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), окисей кальция ( $\text{CaO}$ ), магния ( $\text{MgO}$ ), натрия ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) оказалось значительно меньшим, чем это предполагал Кларк.

С тех пор многие крупные ученые занимались уточнением данных о химическом составе земной коры: за границей — Вашингтон, Фохт, И. и В. Ноддаки, Гольдшмидт, Гевеши и др., в нашей стране — В. И. Вернадский, А. Е. Ферсман, В. Г. Хлопин, А. П. Виноградов и др. Особенно точные таблицы кларков всех элементов были составлены советским академиком А. Е. Ферсманом.

В табл. 1 приведено содержание (в весовых процентах) элементов, наиболее распространенных в земной коре. Их здесь всего 12; остальные 80 элементов образуют ничтожную долю веса земной коры.

Действительно, если бы мы привели кларки всех элементов, то первое, что бросилось бы нам в глаза, это неравномерность их распространения. Количество кисло-

рода, наиболее распространенного элемента, достигает 49,13% (по весу), а протактиния всего  $7 \cdot 10^{-11}\%$ . Самые распространенные элементы имеют кларки в миллиарды раз более высокие, чем наиболее редкие элементы. Эта неравномерность распространения химических элементов

Т а б л и ц а 1

Средний состав земной коры  
(по А. Е. Ферсману)

| Весовые проценты |           |           |
|------------------|-----------|-----------|
| O — 49,13        | Ca — 3,25 | H — 1,00  |
| Si — 26,00       | Na — 2,40 | Ti — 0,61 |
| Al — 7,45        | K — 2,35  | C — 0,35  |
| Fe — 4,20        | Mg — 2,35 | Cl — 0,20 |

может быть иллюстрирована и по-другому. Если мы расположим элементы, как это сделано в табл. 1, в порядке убывания их кларков, то увидим, что первые три элемента (кислород, кремний и алюминий) составляют по весу 82,58%, первые девять элементов составляют уже 98,13%, а первые двенадцать — 99,29%. То же самое можно выразить и графически (рис. 1).

Итак, мы видим, что земная кора по весу почти наполовину состоит из кислорода, приблизительно на четверть — из кремния, на тринадцатую часть — из алюминия, на двадцать четвертую часть — из железа и т. д. Принимая во внимание большие размеры атомов кислорода, можно сказать, что земная кора как из кирпичей построена из атомов кислорода и только в промежутках между ними, как бы цементируя их, расположены другие элементы.

По среднему содержанию элементов нетрудно рассчитать их абсолютные массы, содержащиеся в том или ином объеме, отвечающем по своему составу среднему составу земной коры. Так, можно определить, что в  $1 \text{ км}^3$  горных пород будет в среднем содержаться: железа  $130 \cdot 10^6 \text{ т}$ , алюминия  $230 \cdot 10^6 \text{ т}$ , меди  $260 \text{ 000 т}$ , олова  $100 \text{ 000 т}$  и т. д.

Элементы, слагающие земную кору, находятся в разнообразных соединениях между собой. Эти соединения,

образовавшиеся в результате природных процессов, называются *минералами*. Всего известно несколько тысяч минералов, но наибольшим распространением пользуются лишь несколько десятков их. Здесь мы опять видим та-

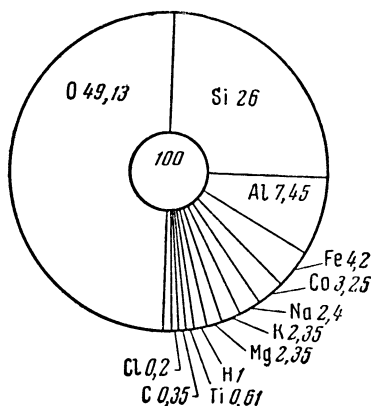


Рис. 1. Распространение элементов в земной коре (в весовых процентах)

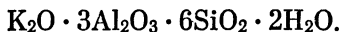
кую же диспропорцию в распространении различных минералов, как и в распространении отдельных элементов.

Преобладание в земной коре кислорода, кремния и алюминия определяет то, что большая часть минералов относится к разряду *силикатов* и *алюмосиликатов*, т. е. является солями кремневых и алюмокремневых кислот. Кроме того, среди минералов распространены сульфиды, сульфаты и окислы.

Примером алюмокремневой кислоты (не существующей в свободном виде), служит соединение  $\text{H}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ , или (если написать в форме комбинации окислов)  $\text{H}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ . Среди кремневых кислот выделяют: ортокремневую кислоту  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ , или  $2\text{H}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ , и метакремневую кислоту  $\text{H}_2\text{SiO}_3$ , или  $\text{H}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ .

При замещении водорода алюмокремневой кислоты калием, натрием или кальцием получают минералы, называемые *полевыми шпатами*. Примером полевого шпата является минерал ортоклаз, имеющий состав  $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ .

Водные алюмосиликаты образуют различные *слюды*, как светлые (содержащие калий или натрий), так и темные (с магнием и железом). Например, светлая слюда или мусковит имеет состав:



При замещении водорода кремневых кислот магнием железом и кальцием получают темноцветные минералы — *оливины* ( $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ ), *пироксены*  $[(\text{MgFeCa}) \times 2\text{SiO}_2]$  и *амфиболы*.

Статистика показывает, что наиболее распространены среди минералов в земной коре полевые шпаты (55,0%). Мета- и орто-силикаты образуют 15%, а кварц ( $\text{SiO}_2$ ) — 12%. Среди других минералов относительно распространены слюды (3%) и магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) совместно с гематитом ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (3%). Остальных минералов в составе земной коры значительно меньше. Большинство минералов имеет кристаллическое сложение.

Минералы в земной коре распределены не беспорядочно. Они группируются в некоторые естественные ассоциации, образующие так называемые *горные породы*. Породой является, например, гранит, характеризующийся определенной ассоциацией минералов, среди которых преобладают полевые шпаты, кварц и слюды. Встречаются породы, состоящие почти или полностью из одного минерала. Таков, например, кварцит, состоящий почти целиком из кварца, или мрамор, сложенный почти исключительно одним кальцитом. Чаще, однако, в породе участвует несколько минералов, более или менее равномерно распространенных в ней в определенном количественном соотношении.

Породы, слагающие земную кору, разделяются на группы в зависимости от их происхождения. В большей своей части земная кора сложена *горными породами магматического происхождения*, образовавшимися в результате внедрения в земную кору с глубины или излияния на поверхность и застывания расплавленных каменных масс. В эту группу входят многие горные породы: гранит, базальт, андезит, диорит и др.

На несколько процентов земная кора сложена *осадочными горными породами*, образовавшимися в результате осадчения и накопления минерального материала на поверхности Земли, преимущественно на дне морских бассейнов, но также на дне озер, речных потоков, в болотах и просто на поверхности суши.

Наконец, в земной коре распространены *метаморфические горные породы*, представляющие собой результат химического и физического изменения осадочных пород под влиянием высокой температуры и большого давления. Такие изменения осадочные горные породы претерпевают там, где они опустились на большую глубину при прогибании земной коры и, будучи погребены под тяжелыми толщами более поздних пород, оказались в зоне

высоких температур и под большим давлением. Кроме того, метаморфические породы образуются в тех местах, где расплавленная магма внедряется в осадочные породы и воздействует на них своей температурой, а также химически.

Принадлежность горной породы к той или иной генетической группе кладет отпечаток на ее минералогический состав и внутреннее сложение.

*Горные породы магматического происхождения* в свою очередь делятся на *породы внедрившиеся*, или *интрузивные*, и *породы, излившиеся*, или *эффузивные*. Внедрившиеся горные породы представляют собой результат застывания расплавленного минерального вещества на той или иной глубине под поверхностью Земли. Мы можем их видеть только после того, как размывом будут уничтожены вышележащие горные породы и массив внедрившейся породы (так называемая интрузия) обнажится на поверхности. Внедрившиеся горные породы характеризуются, как правило, плотным крупнокристаллическим сложением, причем размеры кристаллов разных минералов обычно близки по своему размеру: от 0,2 до 1 см. Типичной горной породой этой группы является гранит — вообще наиболее распространенная порода среди внедрившихся.

Излившиеся горные породы, среди которых наиболее распространен базальт, характеризуются либо стекловатым, аморфным сложением, либо тонкокристаллическим, образовавшимся в результате раскристаллизации с течением времени вулканического стекла. Быстрое застывание после излияния на поверхность мешает образованию в излившихся породах крупных кристаллов.

По своему составу магматические горные породы, внедрившиеся и излившиеся, делятся на кислые, средние, основные и ультраосновные в зависимости от содержания в них кремнезема.

В кислых породах кремнезема более 65%, в средних — от 52 до 65%, в основных — от 40 до 52%, а в ультраосновных — меньше 40%. Интересно, что среди внедрившихся горных пород резко преобладает кислая порода — гранит, тогда как среди излившихся господствует основная порода базальт. Средние породы распространены относительно мало. Обычно выделяют также щелочные породы, обогащенные калием и натрием.

*Осадочные горные породы* разделяются обычно на три генетические группы: *обломочные, органогенные и химические*. Первые из них представляют собой продукты механического разрушения других пород, перемещения и переотложения их обломков. Иногда (например, в брекчиях и галечниках) мы имеем дело с накоплением крупных обломков, оставшихся угловатыми или подвергшихся окатыванию. В других случаях обломочная горная порода сложена мелкими обломками минералов, как в песчанике. Наконец, часто обломки минералов оказываются истертыми в крайне тонкую массу, образующую после своего переотложения водой глину. Минералогический состав обломочных пород зависит от состава исходной горной породы, а также от прочности отдельных минералов, от их сопротивляемости перетиранию и растворению во время переноса. Поскольку наиболее прочным минералом, из числа широко распространенных, является кварц, значительная часть обломочных пород состоит из крупных или мелких обломков кварца.

Органогенные осадочные породы образованы накоплением остатков организмов. Главную роль при этом играют скелеты организмов. У морских организмов они бывают преимущественно известковыми; это — раковины, членики, оболочки, иглы и т. п. Из накопления известковых скелетов организмов образуются известняки. Остатки некоторых организмов имеют иной состав: кремнистый, фосфатный, железистый и др. В соответствии с этим органогенные породы имеют различный состав, наряду с известняками встречаются кремнистые диатомиты и опоки, фосфориты и др.

К органогенным осадочным породам относятся также угли, горючие сланцы и нефть, представляющие собой продукты преобразования в земле остатков растительного и животного мягкого вещества.

Породы химические в своем образовании связаны преимущественно с химическим осаждением солей из водных растворов. Из насыщенных растворов, встречающихся в некоторых озерах и морских лагунах, выпадают поваренная соль, гипс, кальцит, сульфатные и хлорные соли магния, кальция, калия, а также различные соли сложного состава.

*Метаморфические горные породы* образуются при соприкосновении в земной коре осадочных горных пород с



**Главнейшие горные породы**  
*Магматические горные породы*

| Степень кислотности | SiO <sub>2</sub> , % | Главные минералы |                     | Порода      |            |
|---------------------|----------------------|------------------|---------------------|-------------|------------|
|                     |                      | темные           | светлые             | интрузивная | эффузивная |
| Кислые              | 65—75                | Слюда            | Кварц, полевой шпат | Гранит      | Липарит    |
| Средние             | 52—65                | Роговая обманка  | Полевой шпат        | Диорит      | Андезит    |
| Основные            | 40—52                | Авгит            | Полевой шпат        | Габбро      | Базальт    |
| Ультра-основные     | <40                  | Оливин           | —                   | Перидотит   | —          |

*Осадочные горные породы*

**Обломочные**

| Размеры обломков, мм | Породы                    |                   |                     |                       |
|----------------------|---------------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|
|                      | рыхлые                    |                   | сцементированные    |                       |
|                      | обломки неокатанные       | обломки окатанные | обломки неокатанные | обломки окатанные     |
| 100                  | Глыбы                     | Валуны            | Глыбовая брекчия    | Конгломерат           |
| 10—100               | Щебень                    | Галька            | Брекчия             | Конгломерат           |
| 1—10                 | Дресва                    | Гравий            | Брекчия             | Гравийный конгломерат |
| 0,1—1                | Песок<br>Алеврит<br>Глина |                   | Песчаник            |                       |
| 0,1—0,01             |                           |                   | Алевролит           |                       |
| <0,01                |                           |                   |                     |                       |

Таблица 2 (продолжение)  
Органогенные

| Порода             | Состав                                            | Исходный материал                                                                 |
|--------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Известняк          | Кальцит ( $\text{CaCO}_3$ )                       | Известковые раковины, остатки криноидей, кораллов, известковых водорослей и т. п. |
| Мел                | Кальцит ( $\text{CaCO}_3$ )                       | Известковые скелеты мельчайших одноклеточных организмов                           |
| Мергель            | Кальцит ( $\text{CaCO}_3$ ) и глинистые частицы   | Известковые скелеты мелких организмов и глина                                     |
| Диатомит, опока    | Опал ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) | Остатки мелких кремнистых организмов, диатомовых водорослей                       |
| Торф, уголь, нефть | Углерод, углеводы, углеводороды                   | Растения и другой органический материал                                           |

Химические

|               |                                                    |                                                                            |
|---------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Известняк     | Кальцит ( $\text{CaCO}_3$ )                        | } Выпадают из пересыщенных растворов в озерах, морских лагунах, источниках |
| Каменная соль | Галит ( $\text{NaCl}$ )                            |                                                                            |
| Доломит       | Доломит $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$             |                                                                            |
| Кремень       | Кремень ( $\text{SiO}_2$ )                         |                                                                            |
| Гипс          | Гипс ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) |                                                                            |
| Фосфорит      | (F, Cl) $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$               |                                                                            |

Метаморфические горные породы

| Название         | Исходная порода                    | Главнейшие минералы  |
|------------------|------------------------------------|----------------------|
| Слюдистые сланцы | Глина                              | Слюда                |
| Мрамор           | Известняк                          | Кальцит              |
| Кварцит          | Песок                              | Кварц                |
| Гнейс            | Глина, песок, магматические породы | Полевые шпаты, кварц |

расплавленной магмой. Они возникают также в глубоких зонах земной коры, где повсеместно господствует высокая температура. Явлению метаморфизма способствует одновременное смятие горной породы или ее растрескивание под влиянием давления, действующего в земной коре. У метаморфических пород в зависимости от степени метаморфизма обнаруживается состав, промежуточный между осадочными и магматическими породами. При сильном нагревании осадочной породы и при воздействии на нее давления происходит прежде всего перекристаллизация породы. Аморфные составные части переходят в кристаллическое состояние, мелкие кристаллы объединяются и укрупняются. Типичным примером является превращение известняка в мрамор — плотную крупнокристаллическую кальцитовую породу.

При перекристаллизации происходит перегруппировка некоторых ионов и образование новых соединений, ранее в осадочной породе отсутствовавших. Так, например, при метаморфизации известняка, содержащего примесь кварца (обычно в виде песчинок или в виде кремневых включений), нередко образуется минерал волластонит — силикат кальция ( $\text{CaSiO}_3$ ).

Из магмы, действующей на осадочную породу, выделяются газы и жидкости, которые, проникая в окружающие породы, могут вызвать в них различные химические изменения. В этих условиях осадочная порода может, например, подвергнуться окварцеванию, т. е. пропитаться кварцем, когда газы или растворы приносят кремнезем.

Давление, развивающееся в земной коре под влиянием тектонических сил (см. ниже), сминает горные породы. В результате породы часто приобретают сланцеватое строение — разделяются на тонкие параллельные пластинки или плитки. Этот процесс обычно сопровождается образованием новых плоских минералов (слюды, хлорита и др.). Так образуются различные метаморфические сланцы.

В табл. 2 приведен перечень главнейших горных пород.

Следует сказать несколько слов о рудных минералах. Так называются минералы, в которых содержание тех или иных металлов достаточно для практически выгодного их выделения. Железная руда — это минералы с достаточно высоким содержанием железа, молибденовая руда —

минералы с достаточно высоким содержанием молибдена и т. д. Процентное содержание металла, требуемое, чтобы данный минерал считался рудой, чрезвычайно различно для разных металлов, а также для разных условий залегания их в земной коре. В некоторых случаях добыча производится там, где содержание нужного металла в руде измеряется небольшими долями процента, в других случаях нужны десятки процентов содержания металла, чтобы руда привлекла внимание геологов. Меняются требования к качеству руды и по мере того, как совершенствуется техника ее добычи и обогащения.

По своему химическому составу рудные минералы бывают весьма различны: многие из них принадлежат к группе сульфатов (например, реальгар  $\text{HgS}$  — руда ртути), другие являются окислами (например, гематит  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  — руда железа), силикатами, карбонатами или имеют сложный состав.

Помимо химического состава рудных минералов, крайне важна концентрация большого числа их внутри того или иного объема горных пород. Если единичные рудные минералы рассеяны в большом объеме горной породы далеко друг от друга, то добыча таких минералов крайне невыгодна или просто невозможна. Другое дело, если они расположены тесно, густой массой, и их сравнительно нетрудно добыть в большом количестве, сооружая шахты и штольни. Скопления рудных минералов, которые выгодно разрабатывать, называются рудными месторождениями.

Скопления рудных минералов (рудные месторождения) образуются в земной коре разными способами. Многие из них возникают при подъеме с глубины магматических горных пород и сопровождающих их горячих водных растворов, другие сосредоточены в осадочных горных породах, третьи встречаются в породах метаморфических. В дальнейшем, при рассмотрении процессов, развивающихся в земной коре, мы кратко расскажем и об условиях образования рудных и других полезных ископаемых.

## Процессы, меняющие лик Земли

Посещая часто одни и те же места, мы обычно не замечаем, чтобы рельеф местности как-либо изменялся. Холмы, овраги, подмытый крутой берег реки — все это как будто в течение долгого времени остается неизменным.

Но вот наступает весна. Снега тают. Всюду по оврагам журчат быстрые ручьи. И тут мы видим, что наши первые впечатления о неизменности рельефа земной поверхности не совсем правильны. Только несколько недель в овраге бурлили вешние воды, и вот его размеры уже увеличились, его вершина продвинулась на несколько метров дальше в степь и перерезала проходившую рядом проселочную дорогу, которая теперь вынуждена делать крутую петлю, чтобы обойти овраг. Высокая вода в реке подмыла обрывистый берег, и от него отломилась большая глыба земли и сползла в реку. Благодаря этому бровка обрыва на несколько метров продвинулась в сторону расположенного над обрывом селения. Эти наблюдения заставляют нас подумать: не происходили ли и раньше подобные изменения? И то, что мы постепенно узнаем, убеждает нас окончательно, что формы земной поверхности далеко не столь незыблемы, как это казалось с первого взгляда, и что, наоборот, они постепенно и очень значительно изменяются.

Мы узнаем, что несколько поколений назад, когда строилось это селение, здесь вообще не было обрыва к реке: река протекала в нескольких сотнях метров от селения, и к ней вел пологий спуск. Но с тех пор, из года в год, из десятилетия в десятилетие река приближалась к поселку, все более и более подмывая и разрушая берег.

Мы узнаем также, что и оврага справа от поселка несколько десятков лет назад не было. Там была небольшая канавка. Кем и для чего она была выкопана, теперь уже

никто не помнит. По этой канавке дождевые и талые воды сбегали в реку. На глазах жителей из года в год канавка углублялась, расширялась и в конце концов превратилась в большой глубокий овраг.

Показанное на старых картах в соседнем лесу большое озеро давно уже не существует: на его месте теперь болото с отдельными зыбкими местами — «окнами», но в общем проходимое и даже заросшее низкорослым березняком.

Перемены на земной поверхности, подобные этим, как будто невелики. Можно подумать, что значительного влияния на облик земной поверхности они иметь не могут. Однако если мы учтем, что Земля существует очень давно, что миллионы и десятки миллионов лет представляют собой отрезки времени не слишком длинные в истории Земли, то мы поймем, что за столь длительное время даже, казалось бы, незначительные изменения на поверхности Земли могут привести к очень большим переменам. И действительно, в строении земной коры сохранилось немало совершенно очевидных свидетельств того, что облик нашей планеты в течение ее истории неоднократно и до неузнаваемости изменялся. Было время, когда реки на Русской равнине протекали совсем не там, где они текут теперь, а еще раньше та же равнина в значительной части была покрыта морем. Если бы мы вернулись к еще более отдаленной эпохе, которая отстоит от нашего времени на 600 миллионов лет, то увидели бы на месте современной Русской равнины высокие гранитные горы.

Процессы, изменяющие внешний облик и внутреннее строение Земли, называются *геологическими*, а силы, являющиеся причиной этих процессов, *геологическими силами*. По своему происхождению геологические силы разделяются на внутренние и внешние.

Внутренние геологические силы вызывают медленные вертикальные движения земной поверхности (поднятия и опускания), образование складок и расколов в земной коре, землетрясения, поднятие магмы и извержения вулканов.

Внешние геологические силы проявляются весьма разнообразно. Они выражаются в таких процессах, как размыв суши дождевыми и речными водами, перенос песка ветром, разрушение морских берегов волнами прилива, образование слоев песчаных, глинистых и известковых илов на дне морей, растрескивание камней под действием колебаний температуры и т. д.

## **а) Внутренние геологические процессы**

### **Медленные движения земной поверхности, смятие горных пород в складки и образование в них расколов**

Медленные движения земной коры особенно хорошо заметны на берегах морей, где они выражаются то в опускании некоторых участков суши под уровень моря, то, наоборот, в поднятии и осушении части морского дна.

Издавна, например, жители берегов Скандинавии замечали, что море от одного десятилетия до другого близ побережья мелеет, из-под воды все выше поднимаются камни, которых раньше не было видно, образуются новые острова, а некоторые прежние острова присоединяются к суше и становятся полуостровами. На севере Ботнического залива в городе Торнео сохранилась старинная гавань, которая в настоящее время настолько обмелела, что к ее причалам не могут подойти не только большие корабли, но и маленькие лодки. Эти наблюдения показывают, что в Скандинавии поверхность постепенно поднимается. Наоборот, жители Голландии вынуждены уже много веков строить и постоянно надстраивать плотины, защищающие их страну от моря, которое все больше наступает на сушу, стремясь ее затопить. Это происходит потому, что поверхность земли в Голландии понемногу опускается.

Метки, устанавливаемые на берегах морей, позволяют определять скорость поднятия или погружения суши. Оказалось, что Скандинавия поднимается неравномерно — в средней части быстрее, на окраинах медленнее. Таким образом, поверхность здесь выгибается в виде обширного свода или купола. Наибольшая скорость поднятия (до 1 см в год) наблюдается на берегу Ботнического залива (рис. 2). Скорость опускания Голландии несколько больше.

Подобные перемены происходят и на других берегах. Поднятие суши замечается, например, на Мурманском побережье, вдоль берегов Тихого океана в Северной и Южной Америке, во многих местах на берегах Средиземного моря. Опускание суши заметно на берегах Атлантического океана в Северной Америке и во Франции, в Северной Германии и других местах.

Из истории мы знаем более сложные случаи неоднократных поднятий и опусканий одного и того же участка земной поверхности. Например, в Италии на берегу Неаполитанского залива близ маленького городка Поццуоли известны остатки древнего храма, построенного во втором веке до нашей эры. Колонны этого храма в полосе между

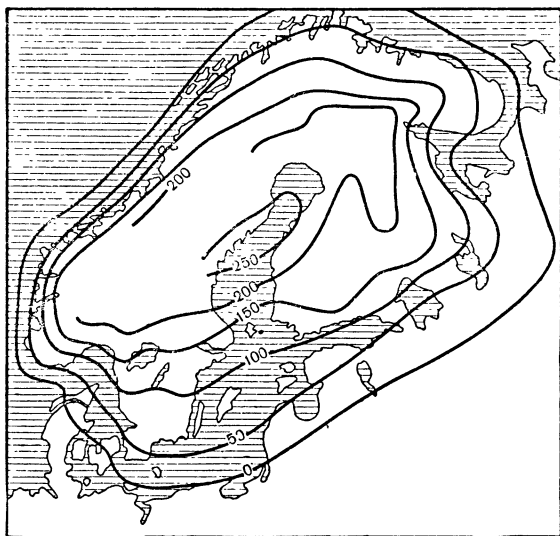


Рис. 2. Поднятие Скандинавии

Цифры — размеры поднятий в метрах за последние 25 тысяч лет.  
Линии соединяют места, испытавшие равное поднятие

четырьмя и семью метрами над основанием источены раковинами, живущими на скалистом грунте дна залива и высверливающими в этом грунте для себя норки (рис. 3). Отсюда ясно, что было время, когда эти колонны были на ту же высоту залиты морем. В наше время только самое основание их покрыто водой. Следовательно, история такова: храм был построен, когда на этом месте была суша; потом суша опустилась, и колонны храма на 7 м оказались затопленными морем; позже снова произошло поднятие суши, и колонны почти целиком освободились от воды; по наблюдениям за последнее время они снова медленно опускаются, и их основание уже находится на 125 см ниже уровня моря.



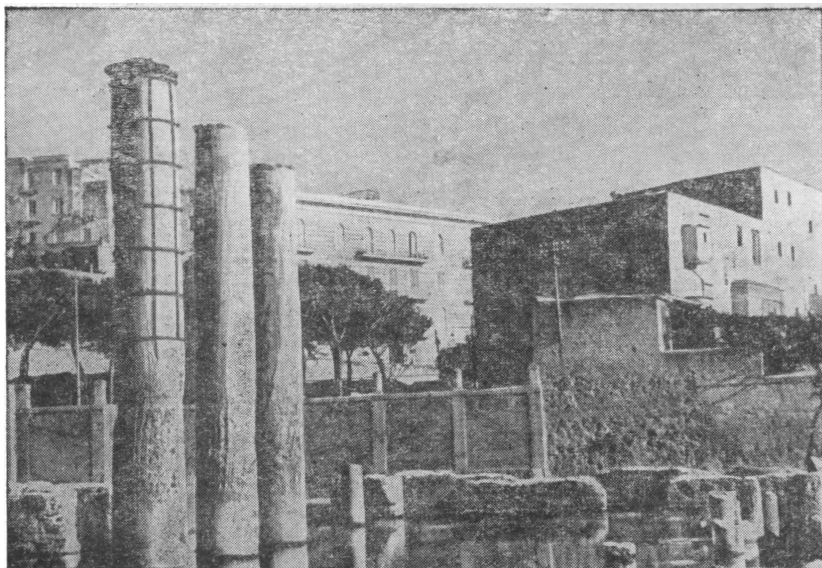


Рис. 3. Колонны древнего храма Юпитера Сераписа в Италии.  
Видны темные, изъеденные морскими моллюсками-камнеточцами  
части колонн, находящиеся сейчас над уровнем моря.  
Фото автора

Все приведенные примеры касались берегов морей, где движения земной поверхности могут быть легче всего подмечены. Но такие же движения замечаются и вдали от моря, во внутренних областях материков. Здесь они лучше всего устанавливаются с помощью геодезических измерений. Если провести точную нивелировку по какому-либо направлению и потом повторять ее через каждые 10—15 лет, то можно обнаружить, что высоты отдельных пунктов медленно изменяются в ту или другую сторону. Те же медленные колебания земной поверхности могут быть обнаружены с помощью приборов, называемых наклономерами. Эти приборы чувствительны к самым слабым изменениям наклона земной поверхности, а изменения эти происходят там, где один участок поднимается, а рядом другой опускается.

Теперь известно, что совершенно спокойных участков на поверхности земли нет. Скорость медленных вертикальных движений в разных местах весьма-различна: от долей миллиметра до нескольких сантиметров в год. В некоторых горных областях (например, в Средней Азии) поднятие гор-

ных хребтов происходит местами со скоростью до 5 см в год. Эти цифры на первый взгляд кажутся небольшими. Но, учитывая масштабы геологического времени, исчисляемого десятками и сотнями миллионов лет, легко понять, что даже столь медленные движения за огромные промежутки времени могут привести к значительным изменениям рельефа: поднятие или опускание земной поверхности со скоростью 1 мм в год приведет спустя миллион лет к изменению высоты местности на 1 км.

Действительно, многие геологические данные показывают огромную роль вертикальных колебаний земной коры в истории образования гор, целых материков и глубоких морских впадин.

Обратимся снова к берегам морей.

Вдоль этих берегов во многих местах тянутся плоские уступы, называемые *террасами*; нередко несколько террас тянутся одна над другой в виде широкой лестницы. Террасы возвышаются на десятки и даже сотни метров над современным уровнем моря; между тем они сами представляют собой остатки древних берегов. Чтобы представить, как образовались террасы, надо в течение долгого времени регулярно наблюдать за сильным прибоем на скалистом берегу моря. Мы увидим, с какой огромной силой волны ударяют о скалы, как они отламывают от скал куски, дробят их на мелкие камешки, как окатывают эти камешки, придавая им форму округлых галек. За многие годы у подножья скалистого берега образуется галечный пляж, который плоско и полого уходит далеко в море под уровень воды (рис. 4). Этот галечный пляж и есть современная морская терраса. А те террасы, которые мы видим высоко над морем, — это древние морские террасы. Они тоже состоят из

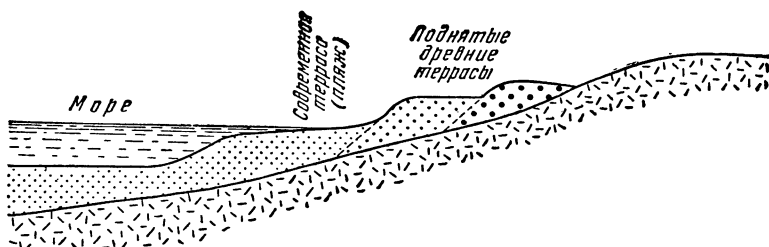


Рис. 4. Террасы на берегу моря. Вертикальный разрез

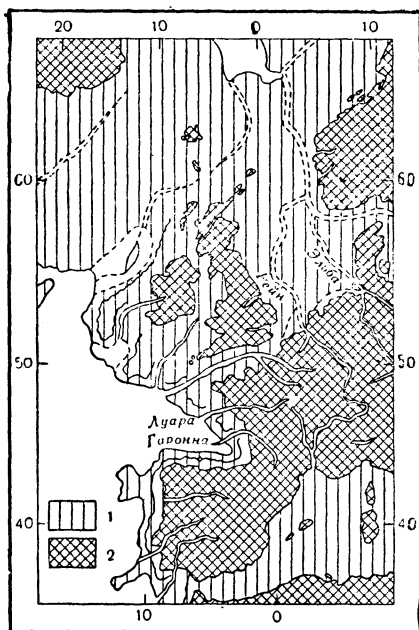


Рис. 5. Затопленные долины рек на дне Северного моря и Атлантического океана

1 — древняя суша, залитая в настоящее время морем; 2 — современная суша

ного моря и прилегающей части Атлантического океана; пунктиром показаны затопленные морем русла рек. Мы видим, что эти русла являются продолжением рек, впадающих теперь в Северное море. Несколько десятков тысяч лет назад берег моря находился много севернее и реки впадали в него на несколько сотен километров дальше современных устьев. В то время Англия не была островом, а составляла часть Европейского материка.

Интересно, что на дне Северного моря находят остатки орудий первобытного человека, который жил на суше, затопленной теперь морем. Значит, опускание дна Северного моря происходило буквально на глазах человека, но крайне медленно, в течение многих десятков тысяч лет.

О еще более древних движениях земной поверхности можно судить по остаткам морских ископаемых

скоплений окатанных галек и песка и свидетельствуют, что суша поднялась по сравнению с прежним уровнем. Это подтверждают остатки морских раковин, которые часто находят среди галек древних террас.

В других местах морских берегов, наоборот, можно обнаружить признаки опускания суши. Во многих мелких морях при измерении глубин были прослежены затопленные русла рек. Эти русла могли образоваться только на суше, а теперь они покрыты морем: значит, суша в этом месте опустилась.

На рис. 5 приведена карта дна Северного

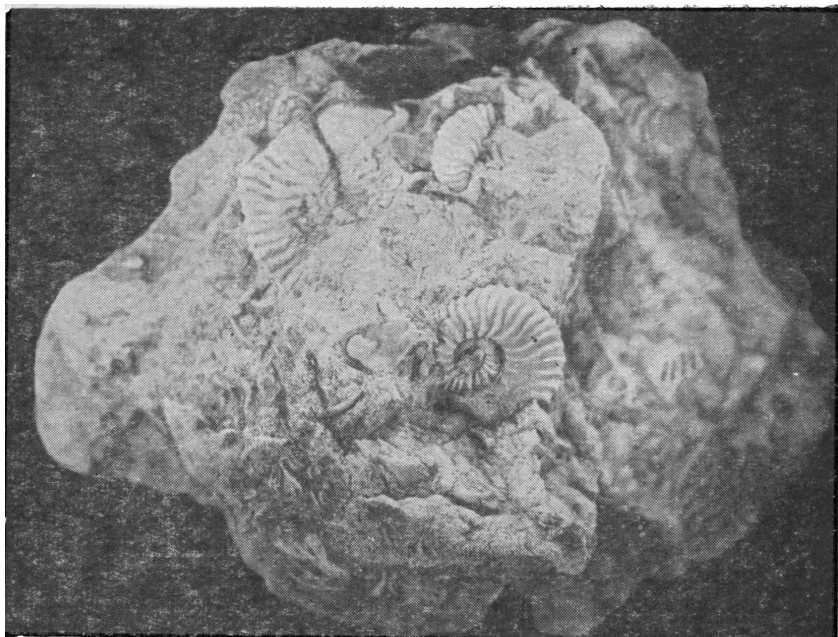


Рис. 6. Кусок известняка с окаменелыми раковинами аммонито

организмов, находимых на суше во многих горных породах.

Мы видели, что такие горные породы, как песок, глина, известняк, образовались из песчаных, илистых или известковых частиц, оседавших из воды. В большинстве случаев такие породы образуются на дне моря. В том же море (в воде или на дне) живут и различные организмы, в том числе и такие, у которых есть твердая раковина или скелет. Когда эти организмы умирают, они падают на дно, заносятся песком или илом и оказываются внутри горной породы. Мягкие части организма разлагаются, а раковины и скелеты часто сохраняются в окаменелом состоянии (рис. 6). Изучив, где лежат горные породы, содержащие морские окаменелости и, следовательно, образовавшиеся в море, и установив возраст этих пород, можно судить о том, как размещались на Земле в прежние геологические эпохи материки и моря. Можно составить карты древних морей и материков, так называемые *палеогеографические* карты (т. е. карты древней географии).

На рис. 7 и 8 приведены две такие карты для Европейской части СССР, составленные знаменитым русским геологом акад. А. П. Карпинским. Карта на рис. 7 изображает размещение суши и моря на указанной территории для каменноугольного периода (250 млн. лет назад). Мы видим, что тогда большая часть Европейской территории СССР была занята морем и только на западе были незначительные участки суши. Карта на рис. 8 показывает размещение суши и моря для более позднего, мелового периода (приблизительно 100 млн. лет назад). К этому времени картина изменилась. Большая часть Европейской территории СССР стала сушей, от моря сохранилась лишь узкая полоса, протягивавшаяся от Каспийского моря к Баренцеву. За Уралом море распространялось от Ледовитого океана в глубь Западно-Сибирской низменности.

Такие же резкие изменения в расположении суши и моря можно установить и для других стран. Они свидетельствуют, что в прежние геологические времена происходили движения земной поверхности, ее поднятия и опускания, приводившие то к превращению морского дна в сушу, то к затоплению суши морем.

Теми же медленными движениями земной поверхности создаются и горы. Каждый горный хребет имеет свою историю. Горные хребты не всегда существовали: они неоднократно в разных местах возникали и разрушались.

Горы образуются там, где земная кора поднимается в виде огромного вала. По склонам его стекают реки, они бороздят землю, прорезают в ней долины. Чем выше поднимается земная поверхность, тем глубже врезаются реки. Так создается горный ландшафт, в котором сочетаются высокие скалистые водоразделы и глубокие ущелья.

Движения земной коры, вызванные глубинными силами, называются *тектоническими движениями*. Те движения, о которых только что шла речь, называются *колебательными тектоническими движениями*.

Если мы будем изучать, как лежат слои горных пород в земной коре, то обнаружим признаки того, что в течение геологической истории в разных местах многократно происходило смятие слоев земной коры в *складки*. Первоначально все пласты залегали на дне моря или других

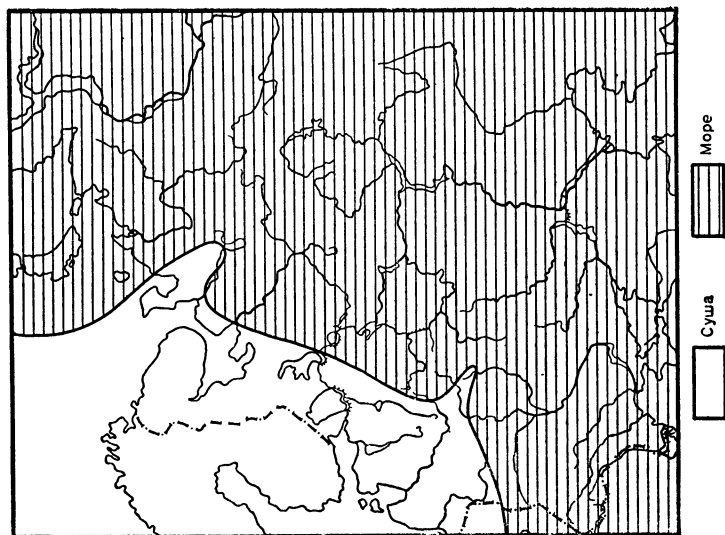


Рис. 7. Море и суша в Восточной Европе  
250 миллионов лет назад

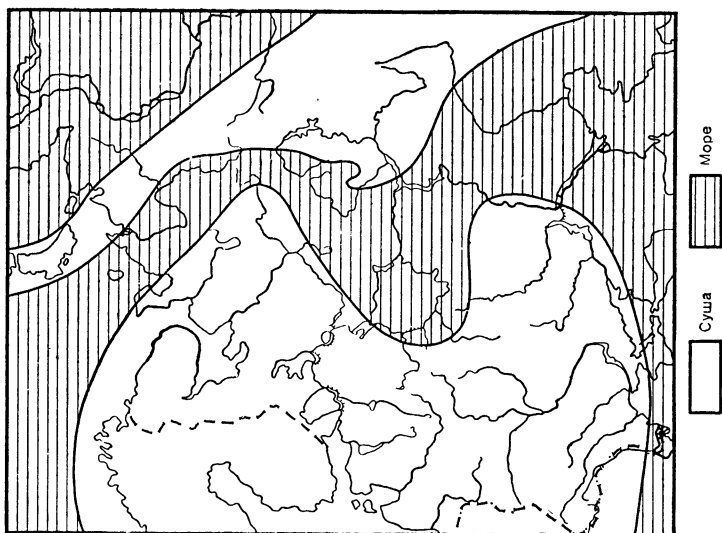


Рис. 8. Море и суша в Восточной Европе  
100 миллионов лет назад

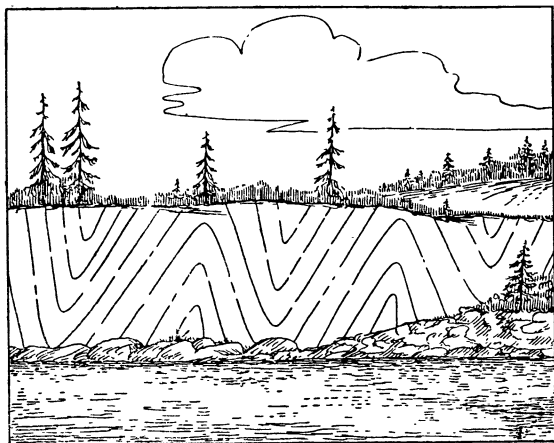


Рис. 9. Складки слоев горных пород, видимые в обрыве речного берега

водоемов горизонтально. Если мы видим пласты, изогнутые в складки (рис. 9), то это значит, что какие-то силы их сжали и заставили изогнуться.

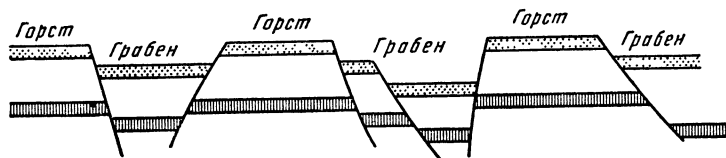


Рис. 10. Разломы в земной коре: горсты (поднятые участки) и грабены (опущенные участки)

На равнинах слои сохраняют почти горизонтальное положение. Совсем другая картина наблюдается в горах, где слои изогнуты в крутые складки, высота которых иногда достигает нескольких километров.

Смятие слоев в складки представляет собой результат *складчатых тектонических движений*, или *складкообразования*.

Кроме образования складок, в земной коре происходят глубокие расколы, по которым отдельные глыбы коры перемещаются друг относительно друга, поднимаясь и опускаясь или двигаясь горизонтально. В связи с этим образуются в одних местах глубокие провалы — грабены, в других высокие выступы — горсты (рис. 10). Большую впадину, образовавшуюся по разломам, представляет собой котловина глубокого озера Байкал. По разломам поднялись многие хребты Средней Азии.

Разрывные тектонические движения приводят к образованию не только крупных расколов, но и множества мелких трещин в горных породах.

### **Землетрясения**

В некоторых местах земная поверхность иногда испытывает сильные и резкие сотрясения. Сила землетрясений весьма различна. Некоторые из них разрушают целые города. При очень сильном землетрясении в почве образуются трещины, в горах происходят обвалы, на морях поднимаются большие и опасные волны высотой до 20 м, которые со страшной силой обрушиваются на берега, смывая целые селения. Бывали случаи, когда соседние участки, разделенные трещинами, смещались относительно друг друга сразу же на несколько метров (вверх и вниз или горизонтально).

Слабые землетрясения в пределах всего земного шара происходят каждый день многократно. Очень сильные, разрушительные землетрясения происходят редко, но все же по нескольку раз в год.

Из сильных землетрясений последнего времени следует отметить землетрясение в Калифорнии в 1906 г., разрушившее значительную часть города Сан-Франциско, землетрясение в Японии в 1923 г., когда были разрушены три больших города — Токио, Иокогама и Йокосука, землетрясение в 1960 г. в Чили. На территории нашей страны сильные землетрясения были, например, в 1902 г. в г. Шемахе, в 1911 г. в г. Верном (ныне Алма-Ата), в 1948 г. в Ашхабаде.

Землетрясения происходят не всюду. Имеются крупные области, где никаких ощутимых землетрясений не бывает. Но, с другой стороны, существуют зоны, где сильные землетрясения происходят часто. На карте (рис. 11)



выделены штриховкой зоны сильных и средних землетрясений. В СССР такие землетрясения бывают в Крыму, Закавказье, Туркмении, Средней Азии, в районе Байкала, на Дальнем Востоке.

### Поднятие магмы и вулканы

Изменения в строении земной коры происходят также в связи с поднятием из глубин Земли расплавов, которые называются *магмой*. Магма представляет собой в сущности расплавленные камни.

Как образуются такие расплавы в Земле? Раньше думали, что внутренность земного шара представляет собой расплавленную массу, которая снаружи прикрыта сравнительно тонкой (в несколько десятков километров) твердой земной корой. Таким образом выходило, что мы живем как бы над огненным морем, а колебания земной коры вызываются волнами на поверхности этого моря.

В настоящее время достоверно установлено, что такая точка зрения неправильна. Земной шар целиком является твердым, причем его средняя твердость больше твердости стали. Никаких постоянных больших бассейнов магмы в нем нет.

Вещество внутри Земли находится в нагретом состоянии: уже на глубине 40—50 км температура должна превышать температуру плавления камней при нормальном давлении. Но давление внутри Земли гораздо больше: в центре оно достигает 3 млн. атмосфер. Благодаря огромному давлению вещество внутри Земли, несмотря на свою высокую температуру (3000—4000° в центре), остается твердым. Но если в земной коре образуется трещина, то под ней давление сразу уменьшается, вещество разжижается и устремляется по трещине вверх. Вскоре после этого магма снова застывает и затвердевает, так что жидкие участки магмы внутри Земли возникают временно, на короткий срок.

В одних случаях магма по сквозной трещине выливается на поверхность Земли. Тогда образуется вулкан, из жерла которого вытекает расплавленная лава. Когда лава застывает, из нее получают излившиеся горные породы — базальт, андезит, порфирит и др. В других случаях магма не может пробиться на поверхность и застывает на некоторой глубине в виде внедрений (интрузий).

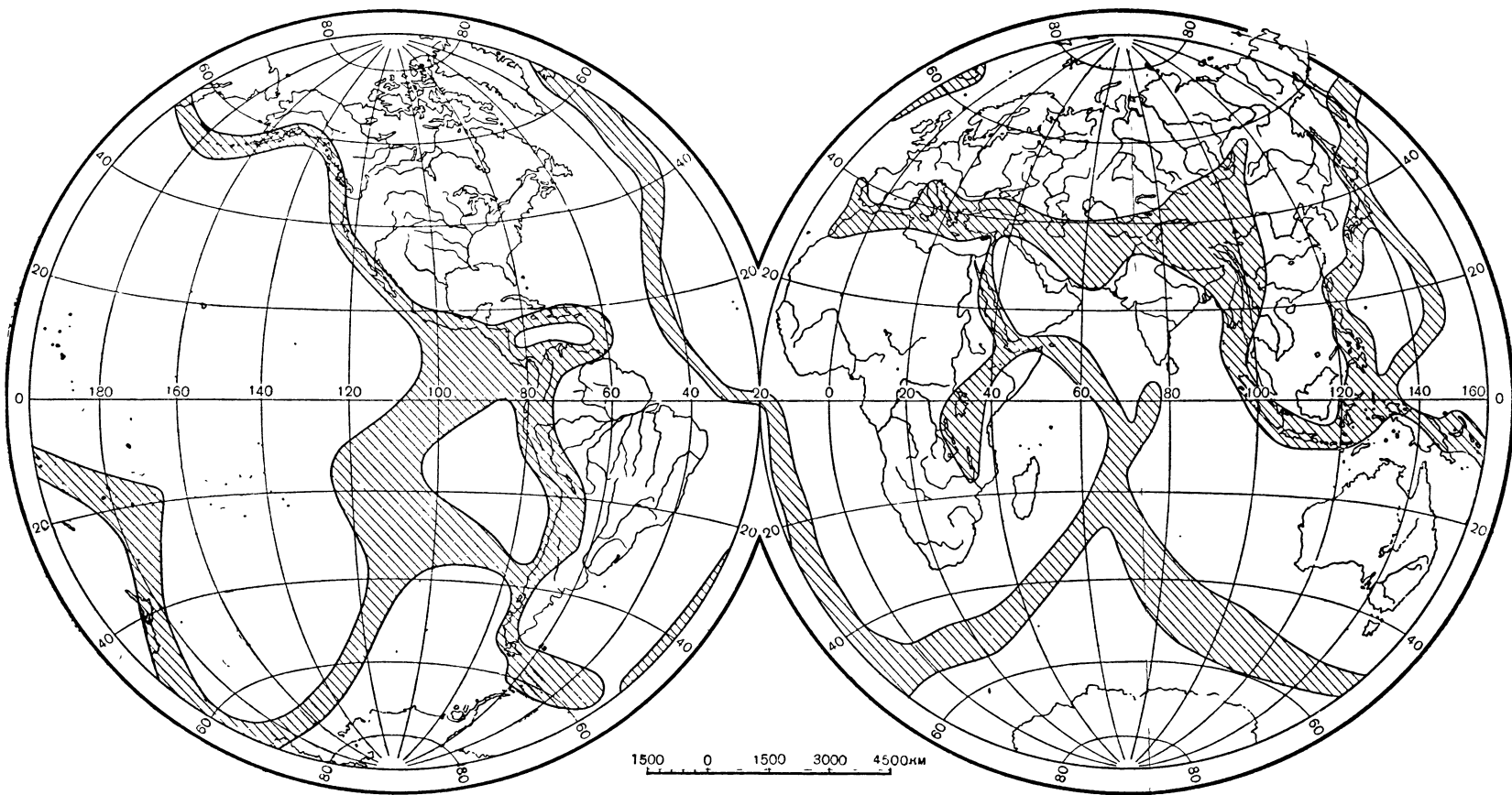


Рис. 11. Зоны сильных и средних землетрясений на земном шаре

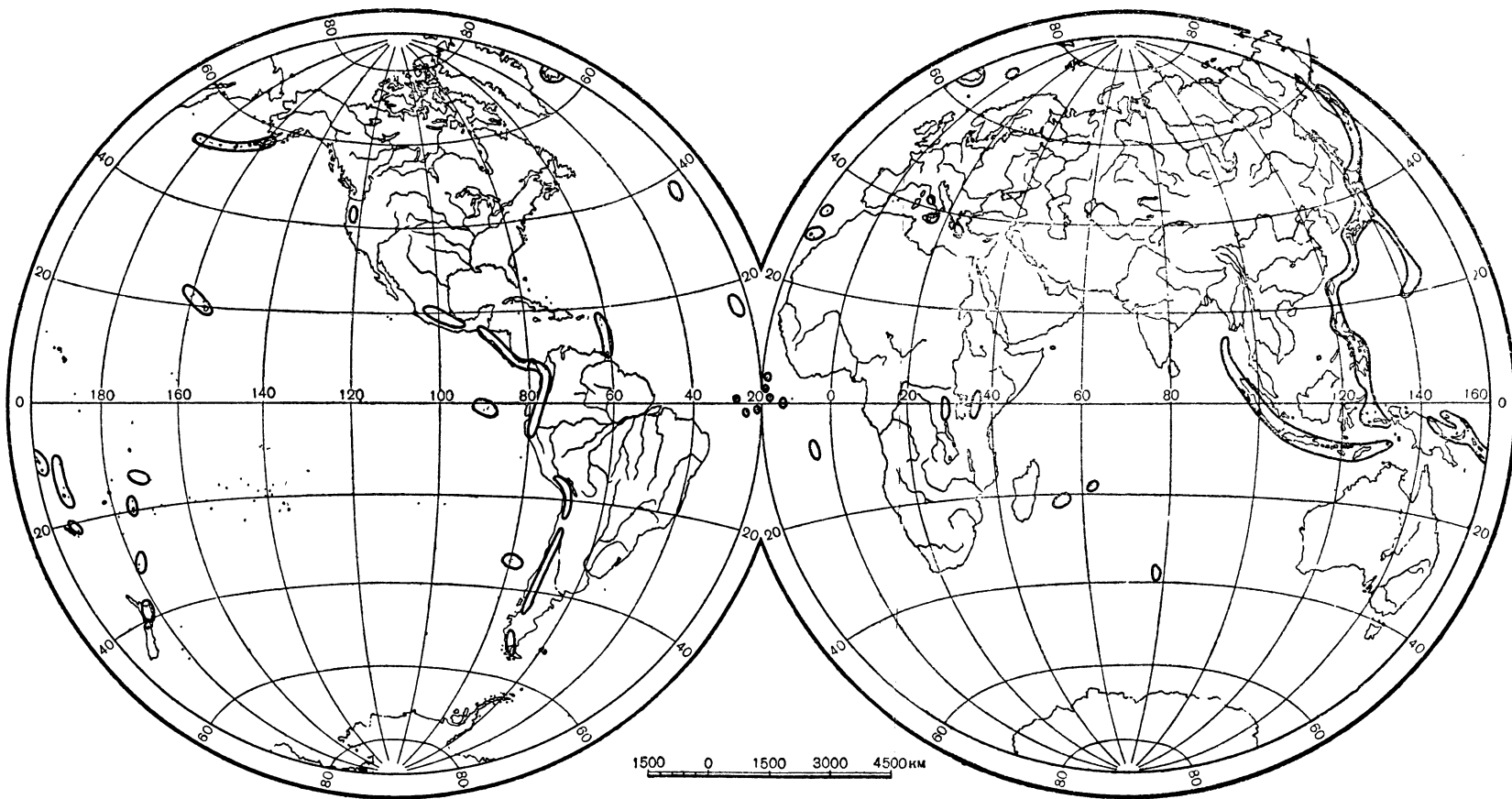


Рис. 12. Области, где расположены действующие в настоящее время вулканы

Внедрившаяся магма, медленно застывая, кристаллизуется, и из нее получают массивные кристаллические породы — гранит, диорит и др. На рис. 13 изображен разрез массива, получившегося в результате внедрения магмы: магма поднялась по трещине, но застыла внутри земной коры, приподняв над собой и изогнув слои осадочных горных пород.

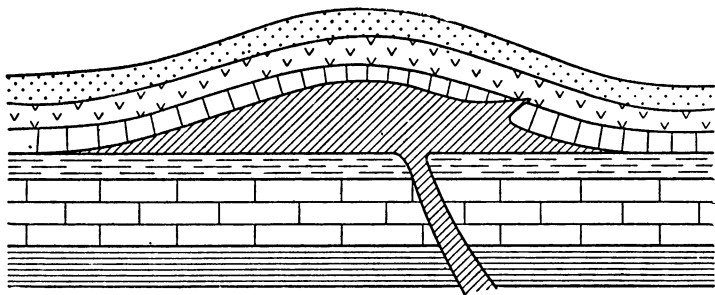


Рис. 13. Интрузия — внедрение магматической горной породы (косая штриховка)

Среди известных на Земле вулканов есть действующие и потухшие. К потухшим причисляют те вулканы, которые не извергаются в настоящее время и относительно которых не сохранилось никаких свидетельств, что они когда-либо извергались в течение исторического времени. Действующих вулканов насчитывается около 450; потухших много больше.

При извержении вулкан выбрасывает большое количество горячих газов, камней разного размера — от больших (размером в несколько кубометров) до мельчайшей каменной пыли, называемой пеплом. Вулканы из своего жерла изливают также жидкую раскаленную лаву.

Вулканы встречаются в самых различных географических условиях: внутри материков и по берегам морей. Множество вулканов расположено на дне океанов, причем некоторые целиком погружены в воду, другие возвышаются над поверхностью воды в виде конуса и образуют вулканические острова.

В распределении вулканов на Земле отмечается некоторая правильность: они расположены несколькими полосами или поясами (рис. 12).

Один пояс, к которому принадлежит больше всего вулканов, окружает со всех сторон Тихий океан: это так называемое «тихоокеанское огненное кольцо». К этому кольцу принадлежат Камчатка и Курильские острова — единственные области СССР с действующими вулканами. Полоса вулканов продолжается отсюда на юг в Японию, где известно около 50 действующих вулканов и около 150 потухших. К той же полосе относятся вулканы островов Рюкю, Тайвань, Филиппинских (на них около 100 действующих вулканов). Эта ветвь Тихоокеанского кольца протягивается далее через острова Целебес, Молуккские, Новая Гвинея, Соломоновы, Новые Гебриды, Новая Зеландия и переходит в Антарктику, где известны большие вулканы Эребус и Террор. Восточная ветвь того же кольца протягивается вдоль тихоокеанского побережья Северной, Центральной и Южной Америки. Самые активные вулканы этой ветви находятся в Южной Америке. В центральной части Тихого океана расположена большая группа вулканов Гавайских островов.

Другой важный пояс вулканов может быть назван Средиземноморско-Малайским. К действующим вулканам Средиземного моря относятся Везувий и Этна. Вулканы, потухшие незадолго до исторического времени, имеются на юге Франции и в Западной Германии. От Средиземного моря этот пояс вулканов протягивается на восток. Здесь, однако, вплоть до Малайского архипелага, мы встречаем лишь потухшие вулканы. К ним относятся многие вершины Кавказа (Эльбрус, Казбек и др.), Закавказья и Армянского нагорья (грандиозный вулканический конус Араарата). В Малайском архипелаге 10 действующих вулканов находятся на острове Суматра и 30 — на Яве.

Третий вулканический пояс прослеживается вдоль всего Атлантического океана и приурочен к подводному кряжу, который протягивается с севера на юг и делит океан на две половины. На севере к этому поясу принадлежит вулканический остров Ян-Майен и действующие вулканы Исландии. Южнее расположена полоса потухших вулканов островов Азорских, Вознесения и др. В западной части Атлантического океана вулканы приурочены к Малым Антильским островам.

Самостоятельный пояс вулканов протягивается с севера на юг в восточной части Африки вдоль огромных

разломов земной коры. В Индийском океане вулканы известны на Мадагаскаре, Коморских, Маскаренских островах и в других местах.

Как мы видим, вулканические области и области сильных землетрясений в значительной степени совпадают. Но есть и расхождения. Например, в Средней Азии бывают сильные землетрясения, а вулканов нет.

Разделение вулканов на действующие и потухшие в значительной степени условно. Лишь немногие вулканы действуют непрерывно или через короткие промежутки времени. Многим из них свойственно чередование деятельных периодов со спокойными, причем последние могут быть очень продолжительными. Известны случаи, когда вулкан, считавшийся потухшим, внезапно возобновлял свою деятельность. Такова, например, история Везувия, который с древнейших времен считался потухшим и, по видимому, не действовал несколько тысячелетий, а в 79 году нашей эры вдруг возобновил свою деятельность катастрофическим извержением, когда вулканическим теплом были засыпаны у его подножья города Помпея и Геркуланум. Японский вулкан Бандай-Сан молчал 1000 лет и снова начал действовать с 1888 г. Не исключена возможность, что и некоторые другие вулканы, считающиеся потухшими, могут еще оказаться действующими.

С поднятием и застыванием расплавленной магмы тесно связано образование месторождений металлических руд. Когда магма остывает и постепенно кристаллизуется, в ней происходит химическое разделение вещества. Некоторые минералы кристаллизуются раньше и оседают на дно магматической массы. Другие химические соединения дольше остаются в жидком состоянии, потому что температура их кристаллизации ниже. Они продолжают течь и внедряться в окружающие породы, когда другие минералы уже застыли. Весьма характерно образование так называемых жил вокруг застывающего магматического массива и внутри него. В окружающих породах всегда находятся трещины, узкие — шириной в сантиметры и десятки сантиметров, и широкие — до десятков метров шириной. Многие из них образуются под напором внедряющейся магмы. Когда магма частично уже застыла, она уменьшается в объеме и в ней также образуются трещины. В эти трещины проникают те части магматического расплава, которые еще не застыли, и заполняют их. Обыч-

но — это кислые составные части магмы, богатые кварцем и полевыми шпатами. После своего застывания в трещинах они и образуют жилы.

Очень широко распространены аплитовые и пегматитовые жилы, состоящие из кристаллов кварца и полевого шпата. Столь же часто встречаются жилы, состоящие из одного кварца.

На последних стадиях застывания магмы из нее выделяются газы, пары и горячие водные растворы. Они несут с собой в летучем или растворенном состоянии различные минералы, которые при остывании оседают и кристаллизуются, также заполняя трещины.

Горячие магматические газы под большим давлением проникают не только в зияющие трещины, но и в мельчайшие поры между кристаллами и зернами окружающих пород, также внося с собой в них металлические соединения. Так вблизи застывающего магматического массива образуются «контактовые» месторождения металлов.

Со всеми этими стадиями застывания магматического очага и его воздействия на окружающие породы связано образование скоплений рудных минералов.

В главном магматическом массиве встречаются скопления сравнительно немногих рудных минералов. Среди них — руды железа, хрома, никеля, платины, титана. В этих же условиях встречаются алмазы.

Основная масса рудных месторождений связана со стадией образования жил и с проникновением газов и растворов в окружающие породы. Остаточные магматические расплавы, газы, пары и водные растворы увлекают с собой в трещины и в поры нередко большое количество рудного вещества, которое после своего выпадения и отвердевания может образовывать скопления. К типу жильных и контактовых рудных месторождений принадлежат скопления руд железа, меди, цинка, свинца, олова, вольфрама, молибдена, ртути, золота, серебра и многих других металлов. В пегматитовых жилах находят также драгоценные и поделочные камни — изумруды, сапфиры, горный хрусталь, аметист, топаз и др.

Таким образом, именно магматическая деятельность глубин Земли снабжает нас металлами, поэтому поиски последних ведутся в первую очередь там, где есть признаки бывших магматических процессов. При этом учитывается, что магматические породы бывают разные по соста-

ву: среди них, как мы видели, есть кислые, богатые кремнеземом, а есть основные и ультраосновные — бедные тем же соединением. Разные по составу магмы выносят и разные металлические руды. Вместе с основными и ультраосновными магмами, образующими такие породы, как габбро или пироксениты, выделяются тяжелые металлы: железо, хром, никель, платина. Все другие, более легкие металлы связаны в своем появлении близ поверхности преимущественно с кислыми магматическими породами и главным образом с гранитами.

Зная такую приуроченность отдельных металлов к различным магматическим породам, геологи ориентируются по ней в своих поисках. Они принимают также во внимание и то, что благодаря разной температуре кристаллизации, разной летучести и разным химическим свойствам различные рудные минералы скапливаются в жилах на разном расстоянии от родоначального магматического очага. Например, олово, молибден, вольфрам оседают ближе к очагу, чем медь, цинк и серебро, а эти последние ближе, чем ртуть. Такая закономерность не всегда хорошо выдерживается вследствие большой сложности процессов переноса и выделения руд, но все же она может быть использована при проведении поисков.

## **б) Внешние геологические процессы**

Общая направленность внешних геологических процессов выражается в том, что на возвышенных местах — на суше, особенно в горах, горные породы, слагающие поверхность Земли, разрушаются, превращаясь в груды обломков или растворяясь водой. Эти обломки, как и растворенные частицы, постепенно сносятся к берегам морей главным образом проточной водой. На дне морей принесенные обломки оседают. Там же выделяются из раствора различные минеральные соли. Из осевшего материала на дне морей образуются слои новых горных пород — песчаников, глин, известняков и др. Таким образом возвышенности и вся суша постепенно разрушаются, сглаживаются, а морские впадины заполняются все новыми и новыми горными породами.

Следовательно, внешние геологические процессы приводят, с одной стороны, к разрушению старых, ранее



существовавших горных пород, а с другой — к образованию новых горных пород. Разрушительные и созидательные процессы тесно связаны между собой: новая порода образуется на дне моря только за счет каких-то других пород, которые подверглись разрушению или растворению на соседней суше. Можно сказать, что разрушение и новое образование горных пород представляют собой две стороны единого процесса перемещения материала на поверхности Земли с возвышенных мест в пониженные.

Приуроченность разрушительных процессов преимущественно к суше, а созидательных — преимущественно к морям позволяет, как будто, предполагать, что внешние процессы должны прекратиться, когда все материки будут разрушены, а все моря будут заполнены снесенными с материков обломками. Этого, однако, никогда не может случиться. Мы уже говорили, что размещение суши и моря связано с медленными поднятиями и опусканиями земной коры. Поскольку эти колебания никогда не успокаиваются, размещение материков, горных хребтов и морей непрерывно изменяется: где теперь суша, там раньше было море, а моря располагаются там, где в былые времена поднимались материки. Вместе с этими изменениями меняются и места, к которым приурочены процессы разрушения и нового образования горных пород. Например, многочисленные реки сносят с Кавказского хребта в соседние моря огромное количество обломков горных пород. А было время, когда на месте Кавказского хребта находилось море, в которое сносились обломки горных пород с соседних возвышенностей, располагавшихся там, где теперь лежат кубанские и терские степи.

Постоянные колебания земной коры вызывают столь же постоянное перемещение материала на поверхности Земли, причем направление перемещения с течением времени изменяется; один и тот же обломочный материал перемещается неоднократно, то временно откладываясь где-либо, то снова разрушаясь и перемещаясь, когда поверхность в месте накопления осадков поднимается и становится сушей.

Познакомимся с главнейшими внешними процессами (разрушительными и созидательными) и их ролью в изменении лика Земли. Начнем с разрушительных процессов, большинство которых можно наблюдать повсеместно.

## Разрушение горных пород

Горные породы, даже самые твердые, скальные, на поверхности суши постепенно разрыхляются и рассыпаются на обломки. Это происходит в результате процессов, которые в совокупности называются *выветриванием*. Силы, вызывающие разрушение горных пород, разнообразны.

В пустынях, в высоких скалистых торах, а также в полярных странах, т. е. везде, где горные породы не защищены почвой и растительностью и в виде камней и скал обнажаются на земной поверхности, в разрушении основную роль играет разница температуры между ночью и днем, зимой и летом. Горные породы, как любые тела, при нагревании расширяются, при охлаждении сжимаются. При этом разные минералы, из которых состоит горная порода, расширяются и сжимаются в различной степени. В пустынях с их сухим прозрачным воздухом и в высоких горах с их разреженной атмосферой суточные колебания температуры воздуха бывают весьма значительны: нередко вслед за очень жарким днем наступает морозная ночь. В Сахаре, например, воздух в наиболее жаркое время года днем накаляется до  $53^{\circ}$ , а в наиболее холодное время ночью охлаждается до  $-8^{\circ}$ . В пустыне Атакаме (Южная Америка) суточные температуры колеблются от  $+37^{\circ}$  до  $-12^{\circ}$ . Еще больше колебания температур самих горных пород. В Кара-Кумах днем песок нагревается до  $80^{\circ}$ , а ночью охлаждается до  $15^{\circ}$ . В этих условиях породы сильно расширяются днем и столь же сильно сжимаются ночью, связи между минералами расшатываются, порода растрескивается и постепенно рассыпается сначала на крупные глыбы, а потом и на мелкие обломки. Так образуются каменные глыбы и щебенка, которые покрывают склоны скалистых гор и скапливаются у их подножья.

Таково же происхождение значительной части песков пустынь: эти пески образовались в результате растрескивания твердых горных пород. Но тут на помощь процессам разрушения приходит ветер; он поднимает песчинки, не сдерживаемые растительностью. Рои песчинок ударяют в скалы и отбивают от них новые песчинки. Так в пустынях пески, перевеваемые ветрами, ускоряют процесс разрушения горных пород.

В местах с сильными колебаниями температуры дождевая вода, попавшая днем в трещину, ночью замерзает. Это способствует расширению трещины, так как вода при замерзании расширяется.

В местах, где горные породы прикрыты с поверхности почвой и растительностью, колебания температуры не столь значительны и не играют основной роли. В таких местах над разрушением пород работают другие силы — химические. Эти силы действуют с помощью воды, которая во время дождей или таяния снега повсеместно просачивается сквозь почву.

Просачиваясь по трещинам вглубь, вода постепенно растворяет породы и уносит с собой растворенные частицы. Большой растворяющей способностью обладает вода, содержащая газы — углекислый газ, кислород, а также кислоты.

Кислород попадает в воду из воздуха, а углекислый газ и кислоты она обычно получает, просачиваясь сквозь почву, в которой имеются остатки растений и животных. Углекислым газом богата также вода, протекающая по известнякам.

Не все породы одинаково хорошо растворяются водой, даже содержащей газы и кислоты. Некоторые, например, песчаник, гранит, почти вовсе не растворяются. Но существуют породы, которые растворяются очень быстро, — известняки, каменная соль, гипс. Если в слои известняка, соли или гипса попадает по трещинам вода, то она быстро растворяет и уносит с собой частицы этих пород, а трещины, по которым течет вода, при этом расширяются. Вертикальные трещины превращаются в ряды широких и глубоких воронок, колодцев или естественных шахт; горизонтальные трещины превращаются в обширные пещеры.

Вследствие растворения пород водой, особенно текущей по трещинам, местность, где имеются большие толщи известняков, соли или гипса, приобретает своеобразный облик. На поверхности наблюдаются многочисленные провалы, воронки, шахты, котловины диаметром и глубиной до нескольких десятков, а иногда и сотен метров. Внутри известняковой или гипсовой горы образуются пещеры, которые со своими разветвлениями тянутся иногда на несколько километров. На своем протяжении пещера образует то узкие и низкие проходы, по которым с трудом

можно пробираться, то обширные залы диаметром и высотой в десятки метров. Стены пещер покрыты натечными красивыми формами из известковистых солей, а с потолка свешиваются образовавшиеся из таких же натечных «сталактитов», имеющие вид гигантских сосулек. По дну пещер часто текут ручьи и речки, образующие в расширенных участках озера.

Нередко пещеры достигают таких огромных размеров, что в них скрываются целые реки, протекающие десятки километров под землей, чтобы дальше снова выйти на поверхность.

Такие местности с провалами и пещерами известны у нас, например, в Крыму (на Яйле), на Северном Кавказе, в Приуралье, на Алтае. Знаменитая Кунгурская пещера в гипсе длиной в полтора километра образовалась описанным выше образом. Большие пещеры известны в окрестностях Бахчисарая и на горе Чатыр-Даг (в Крыму). Самой большой из известных пещер является Мамонтова пещера (США), достигающая в длину со всеми своими разветвлениями 250 км. Эту пещеру знаменитый писатель Марк Твен избрал в качестве места действия для некоторых увлекательных эпизодов, рассказанных им в книге «Приключения Тома Сойера».

Весь комплекс явлений, связанный с растворением известняков водой и выражающийся в своеобразном ландшафте (с пещерами, воронками и т. п.), называется карстом по имени горного района в Югославии.

Разрушающее действие на горные породы оказывают организмы. Корни растений, проникая в трещины, раздвигают горные породы и нередко отламывают от них большие куски. Кислоты, выделяемые корешками мхов и лишайников, разъедают поверхность даже твердых скал. Многие микроорганизмы также участвуют в разрушении пород.

Все перечисленные процессы разрушения разрыхляют поверхностный слой горных пород. Поэтому он всегда состоит из кусков и частиц, потерявших свою связность. Такой разрыхленный слой легко может быть удален; этому способствуют главным образом сила тяжести и проточная вода.

## **Силы, вызывающие перенос обломков разрушенных горных пород**

В горах, когда растрескиваются круто поднимающиеся скалы, отколовшиеся обломки не могут удержаться на крутом склоне и скатываются вниз к его подножью. Даже на очень крутых склонах обломки горных пород постепенно сползают вниз. Этому помогает вода, просачивающаяся сквозь толщу нагроможденных камней и подмывающая их.

Много мелких обломков и песка сдувает с голых горных вершин ветер. Переносимые им песчинки снова и снова ударяют в скалы и помогают их разрушению. На открытых действию ветра вершинах можно наблюдать интересные и причудливые «фигуры выдувания», созданные ветром и нередко похожие на фантастические фигуры животных, людей и др. (рис. 14). В старину с такими фигурами было связано много легенд об окаменевших в горах волшебниках, сказочных зверях и т. п.

По мере того как верхний разрыхленный слой горных пород осыпается или сдувается ветром, из-под него обнажается еще не тронутая выветриванием порода, которая в свою очередь подвергается разрушению. Таким образом, процесс разрушения распространяется все глубже внутрь породы.

Там, где сила тяжести или ветер не могут сбросить вниз обломки, они сносятся водой, стекающей с возвышенных мест в пониженные. Роль проточной воды в выработке рельефа земной поверхности исключительно велика.

Увлекаемая силой тяжести вода стремится вниз. Мелкие струи соединяются в более крупные — в ручьи и реки. Большинство рек впадает в моря и океаны.

Вся эта вода, текущая с материков в океаны в виде мелких струй, ручьев, рек и больших рек, производит огромную работу, смывая и перенося верхний разрыхленный слой пород. Но этим деятельность проточных вод не ограничивается: движущаяся вода обладает большой энергией. Всякому известно, что вода, падающая из водосточной трубы на камень, постепенно точит его и выбивает в нем канавку. Вода не только уносит уже разрыхленные или растворенные частицы, но сама медленно, постепенно разрушает свое ложе — те породы, по которым она протекает, как бы пропиливая их своим потоком и углубляя в них свое русло.



Рис. 14. Скала в виде гриба, образовавшаяся в результате выдувания. Полуостров Мангышлак. Фото В. Залетаева

Сила проточной воды зависит от ее количества и скорости течения. Крупные и быстрые потоки обладают большой разрушительной силой и быстрее врезаются в землю, чем малые и медленно текущие. Скорость течения воды зависит от уклона местности. Поэтому в горах с крутыми склонами разрушительная работа воды гораздо заметнее, чем на равнинах с их пологими уклонами.

Попробуем представить себе в целом, как развивается работа проточной воды и каковы ее результаты. Вспомним, что поверхность Земли подвержена медленным колебаниям: одни ее участки поднимаются, другие опускаются. Представим себе, что на месте моря поднялась новая суша. Водные потоки с новой суши устремляются к соседним участкам, которые опускаются и покрываются морями.

Разрозненные в верховьях водные потоки ниже объединяются и впадают в море уже в виде более или менее крупных рек. Крупные реки и их более мелкие притоки врезаются в землю, пропиливая себе русла, особенно в



Рис. 15. Образование оврагов на пологом склоне. Подмоскowie  
Фото Г. П. Горшкова

низовьях, где речные потоки мощнее и несут больше воды. Но постепенно овраги и русла растут и вверх по течению. Таким образом, поднимающаяся суша прорезается в разных направлениях сложной ветвящейся сетью речных долин и оврагов (рис. 15). Породы, которые когда-то заполняли пропиленные русла и овраги, выносятся реками в виде обломков, песчинок и в растворенном виде вниз по течению, т. е. в конце концов в море.

Известно, что реки несут в моря огромное количество материала — в виде галек, песка, взвешенной в воде мути и в растворенном состоянии. Весь этот материал является продуктом, с одной стороны, «выветривания», т. е. разрыхления поверхностного слоя горных пород, а с другой стороны, разрушения пород проточной водой.

Если суша поднимается медленно, врезание рек и углубление русел и оврагов также происходит медленно, и речные долины остаются плоскими и неглубокими. Совсем иначе обстоит дело в тех местах, где суша поднимается быстро и где образуются горы. В этом случае горные потоки врезаются очень быстро и очень глубоко, вследствие



Рис. 16. Горный рельеф. Тянь-Шань, Гиссарский хребет.  
Фото В. В. Фоминского



чего рельеф расчленяется на высокие скалистые водоразделы и глубокие ущелья (рис. 16). Энергия воды в горных потоках настолько велика, что они способны перекачивать огромные камни (2—3 м в поперечнике) и точить самые прочные породы. Впрочем, если горы с течением времени перестают подниматься, то склоны ущелий, разрушаемые боковыми притоками и временными струями, становятся все более пологими, водоразделы снижаются, и вся страна превращается из горной в полого-холмистую. Такова судьба древних горных хребтов, например, Урала.

Мы видим, следовательно, что рельеф суши, поскольку он связан с работой проточной воды, представляет собой результат борьбы двух процессов: внутреннего процесса поднятия земной поверхности и внешнего процесса разрушения той же поверхности текучей водой. Борьба между этими двумя процессами идет с переменным успехом. Там, где суша поднимается быстро, вода пропиливает глубокие ущелья, но не успевает значительно снизить местность, горные хребты остаются, но они изрезаны глубокими ущельями; там же, где суша поднимается медленно, разрушение горных пород водой также идет медленнее, но зато размыв успевает сгладить местность и превратить ее в равнину.

С какой скоростью происходит размыв суши водой? Как мы только что видели, скорость размыва зависит прежде всего от скорости поднятия суши. Подсчеты показывают, что в среднем с поверхности всех материков реки сносят в год около 10 куб. километров земли. Отсюда можно рассчитать, что в среднем слой суши толщиной в 1 м сносится в течение 125 тысяч лет.

В высоких горах, поднимающихся в область вечных снегов, сносу обломков вниз помогают ледники (рис. 17). Снег на больших высотах, слеживаясь, превращается в лед, который обладает способностью медленно течь вниз по долинам, подобно очень густой жидкости. Скорость течения ледников исчисляется десятками метров в год. На своем пути ледник подбирает камни, песок и глинистые частицы, падающие со склонов окружающих гор, и тащит их с собой и нагромождает в виде больших валов внизу, где лед тает и из него вываливаются камни и другие твердые частицы. Эти нагромождения принесенного ледником материала, называемые ледниковой мореной, постепенно размываются водой, текущей из-под тающего ледника.



Рис. 17. Ледник в горах. Кавказ, Девдоракский ледник.  
Фото А. Л. Рейнгарда

В наше время ледники занимают на Земле сравнительно небольшие площади. Самый большой ледник покрывает материк Антарктиду: его площадь около 13 млн. квадратных километров, толщина его достигает 3 км. Другой сплошной ледяной покров находится в Гренландии: его площадь 2 млн. квадратных километров. В других местах ледники встречаются только в горах, где лед спускается по долинам, иногда довольно низко. Тут он не только перетаскивает камни, падающие с гор, но и сам при своем движении оглаживает дно и бока долины и придает долине характерную корытообразную форму.

Была, однако, в истории Земли эпоха, когда сплошное оледенение покрывало огромную площадь на севере и востоке Европы, а также в Северной Америке. Эта эпоха от нашего времени сравнительно не так отдалена: она началась около одного миллиона лет и закончилась всего несколько десятков тысяч лет назад. Во время ледниковой

эпохи сплошной покров льда распространялся со Скандинавского полуострова на юго-восток почти до Волгограда и Киева, закрывал на юге всю Северную Германию, а на юго-западе подо льдом были скрыты вся Англия и значительная часть Франции.

Толщина ледника на севере достигала 1—2 км. Скольжение такой огромной массы льда не могло пройти бесследно для рельефа земной поверхности: лед при своем движении как бы выпахивал и выскребывал землю. Каждый, разглядывая географическую карту, удивляется обилию озер в Финляндии, в Карелии, в северной части Ленинградской области. Бóльшая часть этих озер, особенно в Финляндии, где действие льда было больше, вытянута в определенном направлении — с северо-северо-запада на юго-юго-восток. В том же направлении вытянуты многочисленные узкие длинные заливы — фьорды, которыми изрезаны берега Финского залива, Ботнического залива и Белого моря. Все эти озера и фьорды представляют собой углубления, выпаханные ледником и заполненные водой после таяния льда. Они вытянуты по направлению движения ледника.

Куски камней, оторванные от скал в Скандинавии, Финляндии, Карелии, лед тащил с собой на юг и сбрасывал их там, где он таял. Между Ленинградом и Москвой (например, на Валдайской возвышенности), в Прибалтике камни, притащенные ледником, образуют местами высокие холмы и гряды высотой в несколько десятков метров, вытянутые поперек движения ледника. Это — конечные морены. В Московской области и дальше к югу ледником отложены грубые бурые суглинки с валунами, лежащие почти повсеместно под почвой и хорошо видимые в обрывах речных долин и оврагов. Отдельные большие валуны гранитов и других кристаллических пород, чуждых для этих районов, принесенные ледником, можно видеть в окрестностях Москвы и на поверхности земли.

Нагромождения камней и суглинков, отложенные ледниками, размываются проточными водами. В конце концов размытые морены попадают в реки и вместе со всем другим материалом сносятся к морю.

Говоря о силах, которые переносят обломки разрушенных пород, необходимо еще раз остановиться на ветре. Мы уже говорили о разрушительном действии ветра на горные породы в пустынных местностях и на открытых вершинах гор. Песчинки, которые ветер отрывает от скал, уносятся

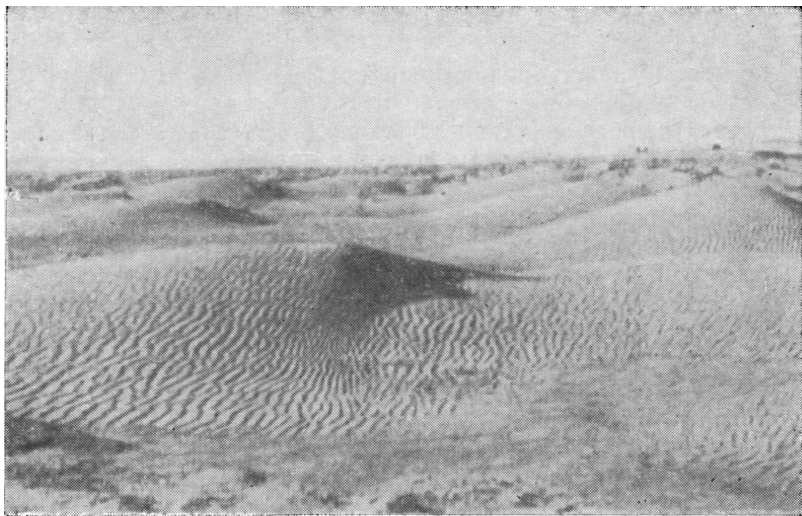


Рис. 18. Песчаные барханы, навейные ветром. Каракумы.  
Фото Б. А. Федоровича

им дальше. В пустынях во время сильных бурь в воздухе несется такое огромное количество песка, что солнце меркнет. Чтобы составить представление о силе ветра, надо знать, что в Египте, например, в некоторых местах в течение 2 тыс. лет были полностью развеяны холмы высотой 10—12 м.

Но сила ветра не бывает одинаковой на больших расстояниях. Там, где ветер ослабевает (например, над углублениями в земной поверхности или позади возвышенностей), песок падает на землю грудками, которые быстро растут. Часто небольшой кустик уже бывает достаточной преградой, чтобы затормозить ветер и вызвать падение песка на землю. Так образуются сначала маленькие, а потом и большие песчаные холмы — дюны, барханы, гряды.

Песчаные гряды и барханы типичны для пустынь. Песчаные пустыни своим рельефом напоминают как бы море, вдруг застывшее во время сильнейшего волнения (рис. 18). Вся поверхность песчаной пустыни покрыта грядами песчаных волн, высота которых равняется нескольким десяткам метров. Барханы не остаются на месте. Под действием ветра песчинки с наветренной стороны барханов поднимаются вверх к гребню и сбрасываются на

противоположную, подветренную сторону. При таком перекачивании песчинок бархан постепенно перемещается по ветру. Скорость движения бархана при очень сильном ветре достигает нескольких метров в сутки.

Сила ветра проявляется не только в пустынях, но и всюду, где значительные пространства заняты песком, не закрепленным растительностью. Большие песчаные дюны известны, например, на широких песчаных пляжах берегов Финского залива и Балтийского моря (особенно в Прибалтике и на севере ГДР). Однако по сравнению с проточной водой, ветер играет в целом значительно меньшую роль в выработке рельефа материков.

### **Отложение осадков и образование новых горных пород в морях и озерах**

Обломки горных пород, захваченные речными потоками, переносятся ими, как мы говорили, по течению. Некоторые реки впадают во внутренние бассейны — озера, но большинство рек течет в моря. Поэтому именно море является местом, куда сносится с материков основная масса обломочного и растворенного материала. На дне моря этот материал заново отлагается. Количество обломочного материала, сносимого реками, очень велико. За 50 дней половодья Волга сносит около одного миллиона, а Аму-Дарья за год — 45 миллионов кубометров песка и ила. Общее количество обломочного материала, выносимого всеми реками в моря за год, достигает, по приблизительным подсчетам, 10 куб. километров.

Море, являясь преимущественно местом отложения осадков и образования новых горных пород, само также ведет немалую разрушительную работу: волны морского прибоя разрушают берега материков. Во время бури волны ударяют о берег с огромной силой, достигающей 30 т на 1 кв. метр. Под ударами волн трескаются прибрежные скалы и отрываются куски камней. Волны подхватывают эти камни и, ударяя ими в те же скалы, все сильнее и сильнее разрушают берег. Отбитые от скал камни, перекачиваясь и ударяясь друг о друга, сами дробятся на все более мелкие куски. Волны окатывают и сглаживают их, превращая в гальки, а при дальнейшем измельчении из них образуется морской песок. Как мы уже говорили, галечные и песчаные пляжи, тянущиеся вдоль берегов морей, образовались за счет скалистых берегов, разрушенных прибоем.

Скорость разрушения берегов очень велика. В отдельных местах море наступает на сушу со скоростью до нескольких метров в год. Остров Гельголанд в XI в. имел площадь 900 кв. километров, а к XX в. от него осталась узкая скала площадью в полтора квадратных километра. Вся остальная поверхность была разрушена морским прибоем.

Итак, с одной стороны, реки выносят в море частицы горных пород в виде галек, песчинок, ила, а также в растворенном состоянии, с другой стороны — в прибрежной полосе оказываются обломки, отбитые от берегов прибоем. Весь этот обломочный материал, попав в море, постепенно оседает на дно. Ближе всего к берегу оседает наиболее грубый материал — гальки. Песчинки, подхваченные волнами и прибрежными течениями, относятся дальше от берега и оседают на дне в полосе шириной иногда в несколько километров. Долго остаются взмученными в воде илистые частицы, которые уносятся подчас очень далеко от берега — на километры и десятки километров, а местами очень сильные течения увлекают их и много дальше. Так образуются на дне моря слои галечника, песка и глины, следующие друг за другом полосами в указанном порядке по мере удаления от берега.

Те частицы, которые были растворены речными водами, в растворенном состоянии приносятся и в море. Первое место (60%) среди растворенных в речной воде солей занимают известковые соли (углекислый кальций). Эти соли почти целиком поглощаются морскими организмами. Не будет преувеличением сказать, что большая часть морских организмов обладает либо известковой раковиной, либо известковым скелетом. Внешняя известковая оболочка и внутренний скелет придают устойчивость и прочность и животным и растительным морским организмам. Это особенно важно для организмов, живущих в прибрежной части моря и на малых глубинах, где часто бывает сильное волнение и где поэтому они подвергаются опасности удариться о камни. Морские берега во многих местах усеяны огромным количеством преимущественно мелких организмов, защищенных раковинами. Примером морских животных, потребляющих известь в большом количестве, являются кораллы, откладывающие ее и на поверхности и внутри своего тела. Существуют также многочисленные отряды известковых водорослей.

Морские организмы поглощают и другие соли, принесенные реками: например, соли фосфора идут на образование костных тканей морских животных, азотные соли — для построения белковых клеток; некоторые организмы поглощают в большом количестве железистые соли. В очень большом количестве поглощается из воды кремнезем: существуют многочисленные морские организмы как животные, так и растительные, преимущественно микроскопические, имеющие кремнистый скелет.

После смерти все морские организмы падают на дно. Мягкие части организмов разлагаются, а известковые и кремнистые скелеты и раковины остаются. Так образуются на дне моря слои известняков, составленных из целых или разрушенных раковин и остатков скелетов. По происхождению различают поэтому известняки-ракушечники, коралловые известняки, известняки, состоящие из обломков морских лилий, и многие другие. Там, где жили и умирали в большом количестве кремнистые организмы, образуются слои кремнистых горных пород.

Слои известняка или кремнистых пород образуются обычно в отдалении от берега, куда не достигает песчаная и илистая муть.

Первоначально слои галечника, песка, ила, известняка и других пород бывают рыхлыми и насыщенными водой. Они не похожи еще на камень, на настоящую горную породу. Это еще не слежавшиеся осадки. Но постепенно тяжестью слоев, которые ложатся поверх ранее отложившихся, слои уплотняются и укрепляются. Большое значение имеет то, что из воды выпадают известковые и другие соли, которые закупоривают поры внутри осадков и как бы цементируют его. В результате из рыхлого осадка получается прочная, крепкая порода: из галечника — конгломерат, из песка — песчаник, из ракушечника — известняк.

С образованием разнообразных осадочных горных пород связано формирование и различных полезных ископаемых. Если с магматическими горными породами сочетаются главным образом металлические руды, то в осадочных породах преобладают скопления неметаллических полезных ископаемых. Впрочем, некоторые металлы также встречаются в осадочных породах.

Процессы выветривания и переноса текучими водами, о которых шла речь в этой главе, способствуют разделению минеральных обломков в соответствии с их весом,

растворимостью или прочностью. Если часть обломков растворяется и уносится водой прочь, то оставшаяся часть может обогатиться какими-либо менее растворимыми минералами. Такое обогащение может достигнуть размеров, достаточных для практического использования.

Представим себе другой случай. На большой площади в горной местности рассеяны магматические жилы, в которых встречаются полезные минералы. В каждой отдельной жиле концентрация этих минералов недостаточна, чтобы стоило ее разрабатывать. Однако все жилы находятся на площади одного речного бассейна, и отваливающиеся от них обломки, пройдя какой-то путь по мелким ручейкам, в конце концов скопятся в русле одной основной реки. Если эти обломки прочны (например, интересующий нас минерал включен в кварц), то может произойти значительное их накопление. Так образуются россышные месторождения некоторых металлов в результате сноса их с большой площади в одно русло реки. Особое значение имеют россышные месторождения золота и олова. Они встречаются и в руслах современных рек, и в сохранившихся осадках древних рек, сейчас уже не существующих. Встречаются россыпи граната, монацита (радиоактивный минерал), драгоценных камней (алмаза, топаза и др.).

Из месторождений, которые образуются в результате обогащения на месте при выветривании в результате удаления других составных частей в растворах, следует указать на месторождения бокситов — важнейшей алюминиевой руды. При выветривании различных пород на месте накапливается полуторная окись алюминия, тогда как кремнезем и другие составные части пород в значительной степени уносятся в растворенном виде. Приблизительно так же могут образовываться некоторые месторождения никеля, железа, свинца, меди и др.

В основе таких «остаточных» месторождений, связанных с выветриванием и растворением, часто находятся, как и в случае россышных месторождений, коренные скопления металлов в магматической породе, но скопления бедные, практически неинтересные. В результате выветривания и частичного растворения руда значительно обогащается, увеличивается концентрация в ней полезного минерала. Химический состав руды при этом может измениться.



В других случаях рудный материал не остается на месте, а уносится в растворенном состоянии подземными водами и потом, после некоторого пути, выпадает из них, заполняя трещины и полости в осадочных слоях. Тогда на том или ином расстоянии от месторождения магматического происхождения может образоваться осадочное месторождение того же металла за счет разрушения первого. Известны такие «вторичные» месторождения марганца, меди, ванадия, барита, фосфора и др.

Для толщ осадочных горных пород, как было сказано, особенно характерны неметаллические ископаемые. Некоторые осадочные породы целиком представляют собой полезное ископаемое, тогда как в других случаях полезное вещество лишь содержится внутри осадочной породы.

Например, слои каменной соли, гипса или цементных мергелей, песка, галечника и глины представляют собой целиком скопления полезных материалов. Дело лишь в качестве каждого конкретного слоя и экономической целесообразности его разработки. Последняя же определяется, кроме качества материала, толщиной слоев, их доступностью для разработки, удаленностью от потребителя, состоянием путей вывоза и т. д. Какой-нибудь слой песка лежит себе в склоне оврага и никто на него не обращает внимания. Но стоит лишь начать постройку дороги по соседству, как тот же слой становится месторождением крайне нужного полезного ископаемого, и его начинают разрабатывать.

Осадочной породой, представляющей собой одновременно и полезное ископаемое, является уголь. Он образуется из торфа древних болот. Постепенно под действием уплотнения и некоторых химических изменений торф переходит в бурый уголь, а под влиянием давления и нагревания этот последний может превратиться в каменный уголь и антрацит. Практическая ценность угольных пластов зависит также от их количества, толщины, глубины залегания. Районы, где угольных пластов много и где общие запасы угля велики, называются угольными бассейнами.

Примерами полезных ископаемых, содержащихся внутри осадочных горных пород — в порах между их зернами и в трещинках, являются нефть и горючий газ. Нефть состоит из сложных жидких углеводородов. По поводу ее происхождения идут споры между учеными, но большин-

ство считает, что она образовалась в результате разложения множества мельчайших одноклеточных животных и растительных организмов, накопившихся в прошлые геологические эпохи в некоторых слоях осадочных пород. Природный горючий газ состоит главным образом из простого углеводорода — метана, и происхождение его представляется близким к происхождению нефти.

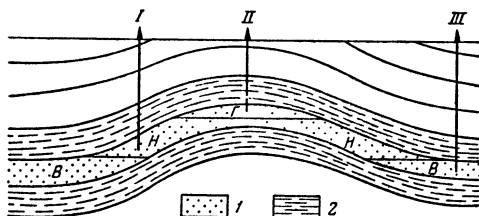


Рис. 19. Схема строения газонефтяного месторождения

1 — пористый песчаный пласт, 2 — непроницаемые глинистые пласты; В — вода, Н — нефть, Г — газ, I — скважина, вскрывшая нефть; II — скважина, вскрывшая газ; III — скважина, вскрывшая воду

Так как осадочные горные породы обычно пропитаны водой, а нефть и газ легче воды, то они стремятся занять место над водой. Они скапливаются в виде своеобразных «шапок» в тех местах, где пористые слои (чаще всего — пески или песчаники) изогнуты кверху в форме купола или арки. Вверху такого купола скапливается газ, ниже — нефть, а еще ниже, внутри наклонных слоев, собирается вода (рис. 19). Очень важно, чтобы пласт, наполненный газом и нефтью, был прикрыт сверху непроницаемым пластом (например, глиной). Иначе газ и нефть, стремясь вверх под давлением воды, выйдут на поверхность и улетучатся. Задача разведчиков — пробурить скважины так, чтобы они попали на газовую или нефтяную «шапку» месторождения. Скважина, заложенная неточно, может пройти мимо такой «шапки» и найти в пласте только воду. По мере того, как газ и нефть извлекаются скважинами на поверхность, окружающее их водяное кольцо сжимается, а когда весь запас газа и нефти в этом месторождении будет исчерпан, вода заполнит весь тот пласт, который был раньше газонефтяным.

## Как человек изучает строение и развитие Земли

Наиболее прямой способ узнать строение земной коры и ее историю состоит в непосредственном изучении горных пород, в наблюдении над их составом и над тем, как они лежат в земной коре. В предыдущей главе уже говорилось, что горные породы имеют разное происхождение. О том, как они образовались, часто могут нам рассказать сами породы, если их надлежащим образом сравнить с теми породами, которые образуются сейчас, на наших глазах и происхождение которых поэтому ясно.

Например, среди горных пород, залегающих в земной коре, можно обнаружить пласты конгломерата. Это — плотно слежавшееся в виде пласта или слоя скопление галек. Гальки встречаются разного размера — от совсем мелких до огромных валунов — в несколько метров диаметром. Они имеют обычно яйцевидную форму, и поверхность их сглажена.

Если мы будем искать, где такие гальки образуются и накапливаются сейчас, то поиски приведут нас к берегу моря, на пляж. Морские волны отрывают от прибрежных скал глыбы и, перебрасывая их туда и сюда, постепенно оглаживают и окатывают. Сходство этих двух пород — древней и современной — так велико, что едва ли можно сомневаться в том, что и древний галечник образовался на берегу древнего моря, под ударами его волн.

Среди древних осадочных пород, слагающих земную кору, широко распространены известняки, а среди них есть такие, которые состоят из обломков кораллов. Древние кораллы, хотя и отличаются некоторыми своими особенностями от современных, но в общем устроены так же. Поэтому можно думать, что и они в прежние геологические эпохи жили в условиях, сходных с условиями жизни

современных кораллов, т. е. на небольшой глубине (до 30 м) в очень теплой и чистой морской воде с нормальным содержанием солей. Таким образом, в эпоху образования древних коралловых известняков там, где мы их сейчас находим, существовало открытое, но мелкое тропическое море.

Аналогичные сравнения поведут нас от пласта угля, залегающего в земной коре, к современному болоту, на дне которого накапливается торф, постепенно превращающийся в уголь. А болота образуются во влажном климате; следовательно, мы сумеем сделать некоторые выводы о тех климатических условиях, в которых образовался и древний уголь.

Такое объяснение древних осадочных горных пород с помощью сравнения их с породами, образующимися сейчас, называется *методом актуализма*, т. е. методом действительности, поскольку современная действительность используется для понимания древних геологических эпох. Этот метод был введен в науку в середине прошлого столетия знаменитым английским геологом Чарльзом Ляйелем. Новое учение пришло на смену старым идеям катастрофизма, утверждавшим, что древние эпохи отделены от современности рядом катастроф, уничтоживших всякое сходство между прежней поверхностью Земли и настоящей.

Метод (или принцип) актуализма нередко подвергался критике, но до сих пор остается наиболее могучим средством для установления тех географических условий, которые существовали на поверхности Земли в былые времена. Наука о древней географии называется *палеогеографией*, и принцип актуализма является основным методом этой науки. Из предыдущих примеров видно, что для палеогеографических заключений большой интерес представляют ископаемые организмы, сохраняющиеся в виде окаменелостей в горных породах.

Действительно, если в породе мы находим кораллы или раковины, сходные с теми, которые сейчас живут в море, мы делаем вывод, что порода образовалась на дне древнего моря. Если же на слоях глин или песчаников отпечатались листья и стволы растений, следует заключить, что эти породы накопились где-то на суше, может быть на дне озера, в которое с берега попадали растения. По окаменелостям можно судить и о глубине древнего моря.

Например, кораллы, как указывалось, живут на малой глубине — не глубже 30 м. Поэтому коралловые известняки свидетельствуют о мелком море. О том же говорят окаменелые водоросли. А пласты угля среди морских слоев указывают на полное обмеление моря, на превращение части его в болотистую лагуну, едва заполненную водой.

Некоторые особенности минералогического состава осадочных пород также указывают на глубину моря или на древний климат. Так, широко распространенный в некоторых песчаниках минерал глауконит образуется, судя по наблюдениям над современными морскими осадками, на глубине около 100 м. Пласты соли или гипса свидетельствуют о жарком сухом климате, так как они образуются при выпаривании озер или морских лагун под действием солнечных лучей. В современных условиях такое выпаривание происходит, например, в озерах Южного Заволжья или в Кара-Богаз-Голе — заливе Каспийского моря.

Уже отмечалось, что, изучая расположение в земной коре тех или иных пород определенного геологического возраста, можно восстановить, каковы были географические условия там или здесь в минувшее время, где была суша, а где — море, где были жаркие и сухие страны, а где климат был умеренным и влажным. В результате можно составить карты древних морей и материков — так называемые палеогеографические карты. Мы уже знаем, что, сопоставляя такие карты одной и той же территории для разных геологических эпох, можно восстановить историю колебаний земной поверхности, ее медленных поднятий и опусканий в былые времена.

Поскольку в непосредственной близости от суши, поверхность которой размывается, отлагаются более грубозернистые осадки — галечники, грубые пески, а с удалением от суши пески становятся тоньше, сменяются глинами и дальше — известняками, можно использовать изменение характера осадочных пород определенного возраста от места к месту на некоторой территории, чтобы уточнить положение древнего берега. Особенности состава и строения осадочных горных пород, указывающие на условия, в которых они образовались (например, на глубину морского бассейна, где они отложились, или на дальность их образования от берега), называются «фацией» данной осадочной породы (по-латыни *фациес* — лицо).

На рис. 20 показано изменение фаций осадочных пород одинакового возраста в виде карты и вертикального разреза через земную кору. Геолог, восстанавливающий древнюю географию, составляет такие фациальные карты и фациальные профили, по которым он судит о расположении суши и моря, о глубине моря, о климатических условиях и т. д.

Для восстановления истории медленных колебаний земной коры важны также измерения толщины или, как говорят геологи, мощности осадочных пород определенного возраста. В земной коре нередко наблюдаются осадочные породы, которые хотя и образовались на заведомо очень малой глубине, но имеют очень большую толщину. Например, в течение каменноугольного периода в Донском бассейне накопились глины, песчаники и известняки с прослоями угля. Все вместе они образуют так называемую угленосную свиту. Нет сомнений, что все породы, входящие в эту свиту, образовались на весьма малой глубине от уровня моря. Даже самая глубоко-

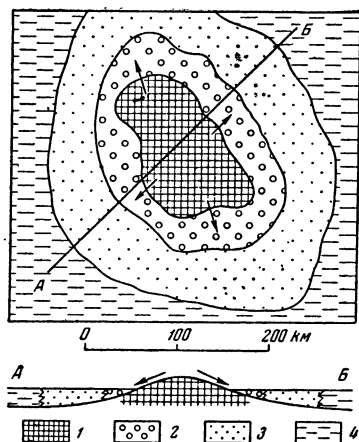


Рис. 20. Схема распределения на местности осадков разного характера (разных фаций)

Эти осадки отложились одновременно, когда местность была покрыта морем. Вертикальный разрез — по линии А — Б. 1 — предполагаемое положение древней суши, которая размывалась; в этом участке осадки не отлагались; 2 — полоса галечников, окаймлявших древнюю сушу; 3 — полоса песков, расположенных на большем удалении древних берегов; 4 — область отложения глин, находящаяся еще дальше от древней суши. Стрелками показано направление сноса обломков горных пород с древней суши. По мере того как обломки перекашивались волнами по дну все дальше от берега, они измельчались

водная среди них порода — известняк — содержит много окаменелых водорослей. Водоросли же не могут жить без солнечного света и притока кислорода. Они не могли существовать глубже 30 м под поверхностью воды. А угли накапливались, первоначально в виде торфа, уже близ самой поверхности моря. Между тем толщина всей

угленосной свиты измеряется несколькими километрами. Как же такая огромная толща пород могла накопиться в мелком море? Как будто в нем не должно было быть места для столь «мощного» накопления осадков.

Действительно, такого места не было бы, если бы земная кора оставалась в покое. В этом случае море заполнилось бы осадками в несколько десятков метров толщиной

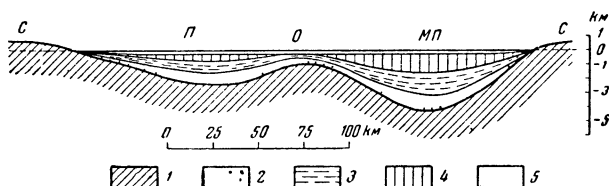


Рис. 21. Схема, показывающая, почему осадочные горные породы одного и того же возраста имеют в разных местах разную толщину (мощность)

С — суша; на ней осадки не отлагались; наоборот, суша размывалась; П — область, где земная кора прогибалась и одновременно накапливались осадки, мощность которых компенсировала глубину прогибания; МП — область, где прогибание земной коры было более глубоким, в связи с чем накопились осадки большей мощности; О — область малого прогибания земной коры, где мощность осадочных пород поэтому меньше, чем в двух предыдущих случаях; 1 — древние граниты, 2 — песок, 3 — глина, 4 — известняк, 5 — вода. Горизонтальный и вертикальный масштабы дают представление о размерах и глубине областей прогибания земной коры в природе

и после этого накопление прекратилось бы. Но в действительности, пока накапливались первые метры осадков, земная кора под морским бассейном медленно прогибалась, и поэтому, несмотря на отложение пород, глубина моря сохранялась приблизительно прежней. И так продолжалось все время, пока образовывалась угленосная свита. При этом было такое соответствие между скоростью прогибания земной коры и скоростью накопления осадков, что в течение всего этого времени глубина моря оставалась приблизительно одной и той же. Таким образом, измеряя толщину осадочных свит одного и того же геологического возраста в разных местах, мы можем установить, где земная кора в то время прогибалась больше, где меньше (рис. 21).

Некоторые магматические породы тоже могут быть сопоставлены с современными, например вулканические лавы. Древние лавы, застывшие десятки и сотни миллионов лет назад, немногим отличаются от тех лав, которые извер-

гаются вулканами сейчас. Поэтому, наблюдая в земной коре слои древних лав, мы можем узнать, где, когда и как в геологическом прошлом извергались вулканы.

Труднее обстоит дело с теми магматическими породами, которые застыли на глубине и стали видимыми на поверхности только благодаря тому, что вышележащие породы были смыты. В некоторой мере здесь приходят на помощь наблюдения над искусственными расплавами. Если приготовить силикатный расплав, близкий по составу к магматической горной породе, и наблюдать его медленное охлаждение, то можно увидеть, как при застывании расплав кристаллизуется. Сходным образом при медленном застывании магматического расплава под землей в нем образуются кристаллы, столь типичные для интрузивной магматической горной породы. Вообще для изучения условий образования магматических горных пород, представляющих собой результат кристаллизации глубинных расплавов, лабораторные исследования играют большую роль, хотя при них природные условия, конечно, полностью не воспроизводятся.

В предыдущей главе говорилось, что слои горных пород во многих местах оказываются смятыми в складки. На первый взгляд непонятно, каким образом могли изогнуться столь твердые горные породы, как плотные песчаники или известняки. И в этом случае на помощь приходят опыты в лаборатории: они показывают, что даже самый твердый камень может быть деформирован и согнут, если давление к нему будет прикладываться в течение долгого времени. Это то свойство тел, которое называется ползучестью. Если по куску смолы ударить, то кусок расколется. Но если положить на поверхность смолы небольшой груз и оставить его лежать на много часов, то кусок смолы будет деформироваться, сминаться, но не расколется. Силы, которые сминают слои горных пород, действуют медленно, исподволь, в течение длительного геологического времени, и постепенно изгибают слои в складки. Когда же они действуют резко, быстро, толчками, они вызывают раскалывание горных пород, образование в них трещин.

Для того чтобы расшифровать историю развития Земли, мало знать только ее современное строение. Надо знать также, какие события совершались на поверхности земной коры и в ее недрах в былые геологические времена, какова была их последовательность и продолжительность.



А для этого надо выяснить, когда образовались те или иные горные породы или минералы, каков их возраст, надо установить хронологию горных пород и минералов, являющихся свидетелями и указателями различных геологических событий.

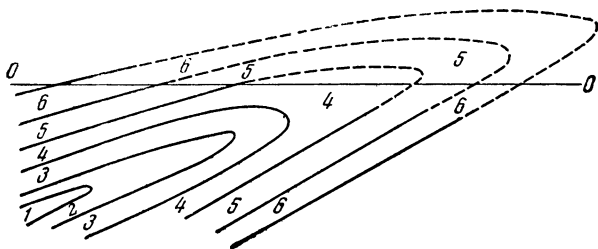


Рис. 22. Наклонная складка слоев горных пород

На одном крыле складки (левом) последовательность слоев нормальная (более молодые слои лежат поверх более древних); на другом крыле (правом) — обратная (более молодые слои лежат под более древними). Цифры — в порядке возраста слоев (1 — наиболее древний слой, 6 — наиболее молодой)

Геологи различают относительную и абсолютную хронологию горных пород. Относительная хронология позволяет установить, какие породы образовались раньше, какие позже, а какие возникли в одно и то же время.

Наиболее простой способ выяснения относительного возраста пород — наблюдение над их взаимным расположением в земной коре. Осадочные горные породы накапливаются в виде слоев, лежащих друг на друге. Совершенно ясно, что до накопления верхнего слоя должен был уже существовать более нижний слой. Поэтому последовательность слоев снизу вверх является одновременно и хронологической последовательностью. Этот простой метод определения относительного возраста слоев горных пород, однако, весьма ограничен. В некоторых случаях благодаря последующим деформациям слои оказываются в перевернутом положении: более молодые слои лежат внизу, а более древние — вверху (рис. 22). Кроме того, этим способом можно установить относительную древность только тех слоев, которые залегают вместе в одном видимом «разрезе» земной коры. Если мы захотим сравнить возраст слоев, расположенных в разных, далеко отстоящих друг от друга районах, то наша попытка, очевидно, будет обречена на неудачу.

Основной метод относительной геологической хронологии — *палеонтологический метод* — основан на изучении содержащихся в осадочных горных породах окаменелых остатков или отпечатков древних организмов.

Трудами многих ученых уже давно установлено, что органический мир на Земле испытал длительную и сложную эволюцию раньше, чем он приблизился к современному облику. Было время, когда на Земле жизни вообще не было, а в первое время (в течение, вероятно, не менее миллиарда лет) после ее возникновения жизнь оставалась чрезвычайно примитивной. На Земле тогда жили лишь простейшие одноклеточные организмы. Остатков их почти нет, так как они не содержали твердых частей, которые могли бы сохраниться. Постепенно жизнь усложнялась. На смену простым организмам приходили более совершенные.

В течение долгого времени среди населения нашей планеты господствовали морские ракообразные, достигавшие огромных размеров. Затем появились первые рыбы. Первые крупные животные на суше принадлежали к земноводным, а к числу одних из первых растительных организмов на суше относились папоротники. Затем появились рептилии. Материки покрылись лесами из гигантских древовидных папоротников. Наступил исключительно интересный этап в развитии жизни на Земле, когда и в море и на суше господствовали огромные рептилии динозавры или «страшные ящеры». Некоторые из них были колоссальных размеров — до 35 м в длину и до 10 м в высоту. В то время существовали летающие рептилии с размахом крыльев до 7 м. Растительность также менялась: появились хвойные растения. Позже гигантские ящеры вымерли, их место постепенно заняли млекопитающие и птицы. Однако первые млекопитающие сильно отличались от современных. Например, первобытные лошади были очень маленького размера (встречались «лошади» размером с кошку) и имели по пять пальцев на каждой ноге. Последним в цепи эволюции млекопитающих появился человек; он — еще совсем молодой обитатель нашей планеты.

Таким образом, каждой эпохе в истории Земли соответствуют определенные виды организмов. Благодаря этому по окаменелостям, находимым в породах, можно определить в какую эпоху эта порода образовалась.

По характеру живших на Земле организмов геологи разделили историю Земли на ряд эр: археозойскую, или эру древнейшей жизни; протерозойскую, или эру первобытной жизни; палеозойскую, или эру древней жизни; мезозойскую, или среднюю эру; кайнозойскую, или эру новой жизни. Недавно советский академик Н. С. Шатский выделил вторую половину протерозойской эры в качестве самостоятельной рифейской эры. Каждая эра разделена на периоды. В палеозойской эре выделяют периоды кембрийский, ордовитский, силурийский, девонский, каменноугольный и пермский; в мезозойской эре — периоды триасовый, юрский и меловой; в кайнозойской — палеогеновый, неогеновый и четвертичный (или антропогеновый, т. е. человеческий). Мы живем в четвертичном периоде. Каждый период делится на еще более дробные подразделения времени.

Не каждый вид ископаемых организмов годится для определения относительного возраста пород. Некоторые виды сохранялись почти без изменений в течение нескольких геологических периодов. Ясно, что они не подходят для точного определения возраста пород. Зато другие виды изменялись очень быстро и сохраняли свой облик неизменным в течение лишь короткого отрезка геологического времени. Такие организмы наиболее подходят для целей относительной «геохронологии»; они называются «руководящими ископаемыми». К их числу, например, относится группа головоногих моллюсков, известных под общим названием аммониты. Это — прекрасные руководящие ископаемые для конца палеозойской и всей мезозойской эры. Они изменялись в течение времени настолько быстро и радикально, что по ним можно очень точно датировать возраст горных пород.

С помощью окаменелостей можно установить относительный возраст осадочных пород не только в соседних районах, но и в районах, расположенных на очень большом расстоянии друг от друга. Например, по одинаковым окаменелостям можно найти породы, образовавшиеся одновременно в Европе, Северной Америке, Австралии.

Геолог изучает распределение горных пород разного состава и разного возраста в процессе геологической съемки, когда он составляет геологическую карту. На последней как раз и изображается расположение на поверхности Земли горных пород разного возраста. Но по такой

карте можно судить о расположении горных пород и на некоторой глубине под поверхностью. Из подробных карт крупного масштаба для отдельных районов составляются обзорные геологические карты мелкого масштаба для обширных территорий. Примером прекрасных обзорных геологических карт являются геологические карты Советского Союза в масштабах 1 : 2 500 000 и 1 : 5 000 000, составленные под редакцией академика Д. В. Наливкина. Эти карты неоднократно демонстрировались на Международных геологических конгрессах и заслужили очень высокую оценку. Еще в конце прошлого столетия на одном из первых геологических конгрессов для составления международных геологических карт были приняты условные обозначения, разработанные в нашей стране академиком А. П. Карпинским. В настоящее время составлением геологических карт в СССР руководит Государственный Геологический комитет. Геологические карты — основные документы, по которым определяются места поисков различных полезных ископаемых.

Палеонтологический метод имеет, однако, и существенные недостатки. Они проявляются там, где в породах мало ископаемых органических остатков или где последние не имеют «руководящего» характера. Например, в осадках, образовавшихся на суше (в долинах рек, в озерах), руководящих ископаемых значительно меньше, чем в морских породах; поэтому возраст континентальных отложений определяется обычно значительно труднее и менее точно, чем морских.

Главная ограниченность палеонтологического метода состоит в том, что с его помощью можно разделить историю Земли на эры и периоды, выяснить последовательность различных геологических процессов, но невозможно установить, какова продолжительность (в годах) отдельных периодов или отдельных геологических событий. Другими словами, по окаменелостям невозможно определить «абсолютный возраст» горных пород.

В течение долгого времени геологи вообще не имели метода абсолютной геохронологии. Такой метод появился только с открытием радиоактивности — на рубеже XIX и XX веков. Он основан на естественных превращениях радиоактивных элементов. Эти превращения происходят всегда с постоянной скоростью и поэтому могут быть использованы в качестве природных «песочных часов».

Самый старый, так называемый свинцовый метод определения абсолютного геологического возраста, основан на радиоактивном распаде урана. При этом уран с выделением альфа-частиц, т. е. гелия, превращается в свинец. Скорость этого превращения не зависит ни от каких существующих на Земле или в ее недрах условий, — она постоянна. Зная эту скорость распада и определив количество урана, содержащегося в каком-либо минерале, и получившегося из него свинца, можно высчитать, когда минерал образовался. Точно так же торий с постоянной скоростью превращается в свинец. Обычно в минералах содержатся и уран и торий, и задача состоит в определении отношения между ураном и торием, с одной стороны, и свинцом, с другой. Поскольку одновременно образуется гелий, можно использовать и его отношение к урану и торию. Однако гелий далеко не весь сохраняется внутри минералов: будучи газом, он частично улетучивается, и это искажает результат.

Хотя радиоактивные элементы содержатся буквально во всех минералах, свинцовый метод наиболее пригоден для минералов, отличающихся повышенным содержанием урана и тория.

Используется также аргоновый метод, основанный на том, что изотоп калия с атомным весом 40 в результате радиоактивного превращения с постоянной скоростью переходит в газ аргон с тем же атомным весом. Можно определить абсолютный возраст минерала и стронциевым методом, основанным на превращении рубидия в стронций.

Применение радиоактивных методов определения абсолютного возраста минералов привело к дальнейшему развитию наших представлений об истории Земли, хотя и эти методы имеют свои ограничения. Они позволяют судить о возрасте отдельных минералов, химический состав которых благоприятен для соответствующих определений. Если минералы, составляющие ту или иную породу, образовались одновременно, то по их возрасту можно судить о возрасте всей породы.

Таково обычно положение с горными породами магматического происхождения: они образуются в результате почти одновременной кристаллизации всех составляющих их минералов.

Совершенно иное положение с осадочными породами: песок, например, состоит из обломков минералов, каждый

из которых может иметь свой собственный возраст, отличный от возраста песка в целом. Действительно, песчаник образовался путем скопления частиц, оторванных размывом от разных других более древних пород различного возраста. Чтобы определить возраст песчаника как породы, надо найти такой минерал, который образовался во времени накопления песка. В некоторых случаях такие минералы находятся, в других их нет.

Таким образом, методы абсолютной геохронологии наиболее пригодны для определения возраста магматических пород, тогда как методы относительной геохронологии, напротив, наиболее пригодны для осадочных пород, поскольку остатки организмов встречаются только в них. Отсюда возникают трудности при сопоставлении величин абсолютного возраста со шкалой относительной геохронологии.

Эти трудности, однако, наука быстро преодолевает, и сейчас можно отметить большой прогресс в разработке шкалы геологического времени, в которой абсолютный возраст сопоставлен с геологическими эрами и периодами, выделенными палеонтологическими методами. Такая шкала в ее современном виде, по данным исследований в нашей стране, приведена в табл. 3.

Самые древние известные породы найдены у нас в Карелии. Их возраст около 3,5 млрд. лет. Но ясно, что вся земная кора в целом и тем более весь земной шар значительно древнее. По-видимому, возраст всей Земли достигает, а может быть, и превышает, 4,5 млрд. лет. Из табл. 3 видно, что жизнь зародилась на Земле несколько миллиардов лет назад. Только 400 млн. лет назад появились первые наземные организмы. «Страшные ящеры» жили на Земле 80—200 миллионов лет назад, а млекопитающие появились всего 70 миллионов лет назад. Человек — самый молодой обитатель нашей планеты. Его «возраст» не превышает одного миллиона лет. Если считать среднюю для всей истории продолжительность жизни одного человеческого поколения равной 30 годам, то общее число человеческих поколений окажется удивительно малым: около 30 тысяч.

Методы изучения земной коры, основанные на непосредственном наблюдении горных пород, называются *геологическими*. Ими пользуются все геологи. Для этого они наблюдают расположение горных пород на поверхности

Таблица 3

## Геохронологическая таблица

| Эра          | Период                       | Главнейшие особенности органического мира                                                             | Время начала, миллионы лет |
|--------------|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Кайнозойская | Четвертичный (антропогенный) | Появление и развитие человека                                                                         | 1                          |
|              | Неогеновый                   | Развитие млекопитающих животных и покрытосеменных растений                                            | 25                         |
|              | Палеогеновый                 | Примитивные млекопитающие                                                                             | 70                         |
| Мезозойская  | Меловой                      | Первые покрытосеменные растения<br>Вымирание гигантских рептилий и аммонитов                          | 140                        |
|              | Юрский                       | Расцвет гигантских рептилий<br>Появление птиц<br>Аммониты и белемниты<br>Цикадовые и хвойные растения | 185                        |
|              | Триасовый                    | Рептилии<br>Аммониты<br>Цикадовые, хвойные и гингковые растения                                       | 225                        |
| Палеозойская | Пермский                     | Появление рептилий<br>Появление хвойных и цикадовых                                                   | 270                        |
|              | Каменноугольный              | Плауновые и хвощевые древовидные растения<br>Древовидные папоротники<br>Амфибии                       | 320                        |

Таблица 3 (продолжение)

| Эра            | Период                       | Главнейшие особенности органического мира        | Время начала, миллионы лет |
|----------------|------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------|
| Палеозойская   | Девонский                    | Поилофиты<br>Панцирные рыбы<br>Развитие кораллов | 400                        |
|                | Готландский<br>(силурийский) | Псилофиты<br>Трилобиты                           | 420                        |
|                | Ордовикский                  | Трилобиты                                        | 480                        |
|                | Кембрийский                  | Водоросли<br>Трилобиты                           | 570                        |
| Протерозойская |                              | Водоросли<br>Беспозвоочные                       | 1850                       |
| Архейская      |                              | Зарождение примитивных форм жизни в конце эры    | >3500                      |

земли, во врезанных в эту поверхность оврагах, долинах и ущельях, собирают образцы горных пород и содержащиеся в них окаменелости и изучают их. Они пользуются также буровыми скважинами, чтобы узнать, какие породы находятся на глубине, недоступной для взгляда с поверхности, и как они там залегают.

Существуют и другие методы научного проникновения в тайны строения земной коры — *геофизические*. Это — методы косвенные: они позволяют узнать те или иные физические свойства горных пород, не доставая их с глубины. Но они не позволяют получить в руки образец изучаемой горной породы и выяснить ее химический состав. В этом, конечно, недостаток геофизических методов по сравнению с геологическими. Но, с другой стороны, огромным преимуществом геофизических методов является то, что они могут проникнуть туда, куда глаз геолога достать никак



не может. Даже в тех поверхностных слоях земной коры, куда достигают скважины, геофизические методы помогают узнать, что делается между скважинами.

Представим себе, что пробурена буровая скважина глубиной в 2 км (рис. 23). На глубине 1500 м обнаружен пласт породы, которая по некоторым своим физическим

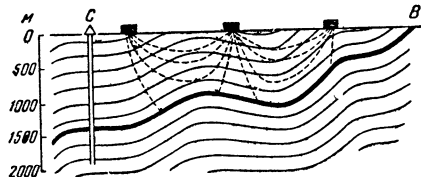


Рис. 23. Изучение залегания горных пород с помощью электроразведки

В скважине С на глубине 1500 м обнаружен пласт (на разрезе черный), электропроводность которого выше, чем других пластов. С помощью электрометрических приборов, пропуская сквозь горные породы электрический ток, удалось проследить этот пласт под землей вплоть до выхода его на поверхность в точке В. Поскольку пласты параллельны, одновременно было выяснено, как залегают пласты выше и ниже электропроводного слоя

свойствам более или менее резко отличается от других пород. Например, электропроводность этого слоя больше, чем слоев, лежащих ниже и выше. Это можно установить, используя так называемый каротаж скважины, т. е. физические изменения в скважине с помощью приборов, которые в нее опускаются. Геофизические методы позволят затем проследить тот же электропроводящий слой на широкой площади далеко от скважины и установить, где он поднимается ближе к поверхности, где опускается глубже. Так как мощная пачка слоев изгибается обычно одинаково, то вместе с тем мы устанавливаем картину «залегания» не только одного слоя, но целой мощной свиты их. Наш электропроводящий слой становится как бы маркирующим слоем. Своим поведением он указывает на поведение многих других слоев, залегающих параллельно с ним.

Если геофизические методы очень полезны даже при исследовании в поверхностных слоях коры, то как только

мы спускаемся глубже самых глубоких скважин, эти методы получают исключительное господство. Глубокие части земной коры, а также вся огромная внутренняя часть нашей планеты известны нам только по результатам применения геофизических методов. Самая глубокая скважина немногим превышает семь километров. Это всего-навсего одна девятисотая доля земного радиуса. Наши знания остановились бы на этой глубине, если бы не существовало геофизических методов проникновения на большие глубины.

Один из самых эффективных геофизических методов исследования земных недр — *сейсмический метод*. Он заключается в изучении путей распространения и скорости упругих колебаний, вызванных в Земле искусственными взрывами или естественными землетрясениями. Если на поверхности земли или, лучше, на некоторой глубине под поверхностью взорвать заряд взрывчатого вещества, то от места взрыва по окружающим горным породам во все стороны побегут упругие волны, подобные звуковым. Скорость их движения различна в разных породах и зависит от их упругости и плотности. Поэтому если место взрыва окружено разными горными породами, с разными упругостью и плотностью, то в различных направлениях волны будут двигаться с разной скоростью. Если вокруг места взрыва расположить приборы, которые отметят время, когда к ним подошла упругая волна, и зная точно время взрыва, то можно установить различие в скоростях распространения движения упругих волн в разных направлениях. А это в свою очередь позволит установить, что в разных направлениях от места взрыва в земной коре лежат породы, различные по своей упругости и плотности (рис. 24). Правда, какие это породы — песчаники, известняки или граниты, — сейсмический метод «не скажет», но, определив в лаборатории упругость и плотность различных горных пород, мы сможем выбрать из них такие, которые наилучшим образом будут подходить к полученным результатам.

Прибор, который отмечает приход упругих колебаний от взрыва, называется сейсмографом. Упругая волна вызывает дрожание корпуса этого прибора. В конструкции прибора имеется тяжелый груз, который в силу инерции не участвует в этом дрожании и остается почти неподвижным. Записывая колебания корпуса сейсмографа

относительно почти неподвижного груза, можно изучить подходящие к прибору колебания почвы, а время их прихода отмечается с помощью присоединения к сейсмографу точных часов. Момент взрыва сообщается на пункты расположения сейсмографов по радио.

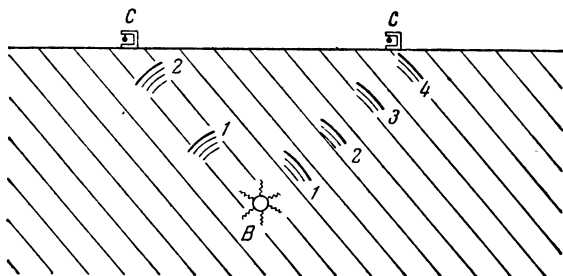


Рис. 24. Распространение упругих (сейсмических) волн в горных породах

Взрыв в точке *B* был зарегистрирован двумя сейсмографами *C*, расположенными на одинаковом расстоянии от *B*. Благодаря тому, что упругие волны вдоль слоев движутся быстрее, чем поперек слоев, левый сейсмограф принял сигнал приблизительно на полторы секунды раньше, чем первый. Цифры показывают, где был фронт упругой волны через соответствующее число секунд

Важное значение в сейсмическом методе изучения строения земной коры имеет явление отражения и преломления упругих колебаний на границах между слоями различных пород. Если порода с одними механическими свойствами (упругостью и плотностью) подстилается породой с другими механическими свойствами и граница между ними достаточно резкая, то упругие колебания отразятся от этой границы совершенно так же, как световой луч отражается от гладкой поверхности зеркала (рис. 25). Отраженные упругие колебания могут быть зарегистрированы сейсмографами, и это позволит определить глубину отражающей поверхности. Если мы используем несколько сейсмографов, поставленных на разных расстояниях от места взрыва, то, как это видно из рис. 25, мы сможем проследить залегание слоев горных пород на более или менее значительном протяжении.

Глубина, на которую можно проникнуть в недра Земли с помощью сейсмического метода, зависит от силы

взрыва и чувствительности сейсмографов. Разработанный академиком Г. А. Гамбурцевым метод глубинного сейсмического зондирования позволяет, используя сравнительно небольшие взрывы (несколько десятков килограммов обычной взрывчатки) и высокочувствительные сейсмографы, получать сведения об упругих свойствах горных

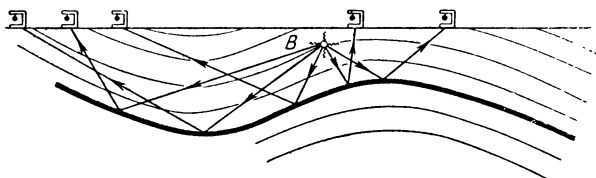


Рис. 25. Изучение залегания горных пород с помощью сейсморазведки

В точке В под поверхностью земли произошел взрыв. Упругие волны, отраженные от твердого пласта (на разрезе черный), регистрируются группой сейсмографов на поверхности. Сопоставление их записей позволяет выяснить, как залегает отражающий пласт

пород, находящихся на глубине до 100 км и даже несколько больше.

Однако используя землетрясения, энергия которых во много раз больше энергии искусственных взрывов, можно проследить прохождение упругих волн сквозь весь земной шар, сквозь самые глубокие его части. Этим методом мы и пользуемся, чтобы узнать то, что возможно, о глубинном строении земного шара в целом. Этот же метод продолжают широко использовать и для изучения строения земной коры, несмотря на наличие метода глубинного сейсмического зондирования, поскольку наблюдения за волнами, вызванными землетрясениями, гораздо дешевле и намного проще, чем искусственное сейсмическое зондирование.

Неудобство метода, основанного на изучении сотрясений, вызванных естественными землетрясениями, состоит в том, что землетрясения случаются не всюду и время их возникновения заранее неизвестно. Оно может быть определено, когда землетрясение уже случится. Несмотря на недостатки сейсмического метода, наши знания о строении глубоких частей земного шара до сих пор основываются главным образом на обработке тех сейсмограмм

(записи упругих сотрясений), которые получаются на многих сотнях сейсмических станций, разбросанных по всему земному шару и наблюдающих за естественными землетрясениями. Так как для того, чтобы сделать правильные выводы, надо иметь записи одного и того же землетрясения, сделанные сейсмографами на многих станциях, то в соответствии с международным соглашением все сейсмические станции посылают свои «сейсмические бюллетени» в Международное сейсмологическое бюро в Страсбурге (Франция), которое публикует для всеобщего сведения сводные сейсмические бюллетени.

Другой важный геофизический метод изучения недр — *гравиметрический* — основан на изучении распределения силы тяжести на поверхности Земли. Известно, что период качания маятника зависит от его длины и от силы тяжести ( $g$ ). Перенося один и тот же маятник по поверхности Земли с места на место, можно заметить, что период его колебаний не будет всюду одинаковым: в одних местах он будет качаться быстрее, в других медленнее. Разница будет очень мала, но современными точными способами наблюдений ее все же вполне возможно подметить.

Разница в скорости качания маятника указывает на различие размера силы тяжести в разных местах на поверхности Земли. Частично это различие вызвано географическим положением точки наблюдения. Благодаря вращению Земли, на ее поверхности всегда действует центробежная сила, уменьшающая силу притяжения. Ясно, что центробежная сила должна быть наибольшей на экваторе, где точки, лежащие на поверхности Земли, должны за сутки пробежать наибольший путь и где, следовательно, скорость их движения максимальна. Величину центробежной силы можно рассчитать. На экваторе она равна одной двухсот восьмидесяти восьмой доле силы тяжести, на других широтах она меньше, а на полюсе равна нулю. Следовательно, человек, весящий на полюсе 70 кг, на экваторе весит на четверть килограмма меньше. Влияние географического положения пункта наблюдения может быть высчитано и исключено из наблюдаемого результата. На величину силы тяжести влияет также высота точки наблюдения над уровнем моря, поскольку с удалением от центра Земли величина силы притяжения должна ослабевать. Это влияние также может быть вычислено.

Оказывается, что на высоте 10 км тот же 70-килограммовый человек весил бы на 230 г меньше, чем на поверхности моря.

Если учесть оба указанные влияния, связанные с центробежной силой и с высотой места над уровнем моря, то все же окажется, что во многих местах на поверхности земли величина силы тяжести отличается от нормальной. Это отличие наблюдаемой силы тяжести от нормальной называется *аномалией силы тяжести*. В каждом случае она связана с тем, что под поверхностью земли в разных местах залегают породы, плотность которых отличается от средней плотности — больше или меньше ее. Таким образом, массы, которые действуют на маятник, в разных местах несколько различны.

Отсюда следует, что наблюдения над скоростью качания маятника позволяют судить о различиях в плотности пород, лежащих в земной коре в разных местах. Здесь снова гравиметрический метод не дает возможности сразу узнать, какие именно это породы, но, зная плотности распространённых пород, мы во многих случаях можем догадаться, наличие каких пород следует предполагать на глубине.

Неудобство гравиметрического метода в том, что он указывает на среднюю плотность всех пород, находящихся под данным пунктом наблюдений, и дает очень мало сведений о том, на какой глубине залегают породы той или иной плотности. Поэтому этот метод особенно хорош, когда он применяется совместно с сейсмическим. Два метода — сейсмический и гравиметрический — друг друга как бы дополняют.

Маятниковые приборы для измерения силы тяжести трудны в обращении. Значительно чаще используются сейчас для той же цели *гравиметры*. Основная часть этих приборов — кварцевая или металлическая пружина, к которой подвешен груз; сила тяжести измеряется по растяжению пружины. Пружина может быть заменена нитью, а конструкция прибора может быть такой, что сила тяжести вызывает с помощью наклонно движущегося груза закручивание нити. По степени закручивания и определяется величина силы тяжести.

*Магнитометрический и электрометрический методы* состоят в изучении расположения в земных недрах пород с различными магнитными и электрическими свойствами.

Эти методы также нередко применяются в комбинации с предыдущими. Комплекс геофизических методов, примененных совместно в одном месте, позволяет выяснить совокупность различных физических свойств горных пород, залегающих на глубине, а это в свою очередь, конечно, позволяет точнее решить вопрос, с какими именно породами мы имеем дело.

Для решения ряда вопросов внутреннего строения Земли используются также методы, которые могут быть названы *астрономическими*. Например, колебания в положении полюсов, происходящие под влиянием притяжения со стороны Луны, Солнца и ближайших планет, позволяют судить о твердости вещества земного шара. Той же цели служат наблюдения над так называемыми твердыми приливами в земной коре. Притяжение Луны и Солнца вызывает приливы не только в океанах, но и в твердой земной коре: пока Земля совершает оборот вокруг своей оси, две выпуклые волны, направленные одна к притягивающему небесному телу, другая — в противоположную сторону, разделенные двумя вогнутыми волнами, бегут в широтном направлении по поверхности материков. В связи с твердыми приливами Москва, например, дважды в сутки со всеми своими домами и со всем своим населением поднимается и опускается приблизительно на 30 см. Размер твердых приливов указывает на величину жесткости твердого тела Земли.

## **Что известно о внутреннем строении Земли?**

Есть одна интересная особенность в строении нашей планеты: с наиболее сложным и разнообразным строением мы встречаемся в поверхностных слоях земной коры; чем глубже мы опускаемся в недра Земли, тем проще оказывается ее строение. Можно, конечно, высказать подозрение, что это нам только так кажется, потому что чем глубже мы опускаемся, тем приблизительнее и неопределеннее становятся наши сведения. По-видимому, это все же не так, и упрощение строения с глубиной представляет собой объективный факт, независимый от степени наших знаний.

Мы начнем свое рассмотрение сверху, с наиболее сложно устроенных верхних слоев земной коры. Эти слои, как мы знаем, изучаются преимущественно с помощью прямых геологических методов.

Приблизительно две трети земной поверхности покрыто океанами; одна треть приходится на долю материков. Строение земной коры под океанами и материками различно. Поэтому мы рассмотрим сначала особенности материков, а потом обратимся к океанам.

На поверхности Земли на материках в разных местах обнаруживаются горные породы разного возраста. Некоторые районы материков сложены на поверхности наиболее древними породами — археозойскими или, как их чаще называют, архейскими, и протерозойскими. Вместе они называются допалеозойскими или докембрийскими породами. Их особенностью является то, что большая их часть сильно метаморфизована: глины превратились в метаморфические сланцы, песчаники — в кристаллические кварциты, известняки — в мраморы. Большую роль среди этих пород играют гнейсы, т. е. сланцеватые граниты, а также обычные граниты. Площади, на которых на поверхность



выходят эти наиболее древние горные породы, называются кристаллическими массивами или *щитами*. Примером является Балтийский щит, обнимающий Карелию, Кольский полуостров, всю Финляндию и Швецию. Другой щит охватывает большую часть Канады. Точно так же большая часть Африки представляет собой щит, как и значительная часть Бразилии, почти вся Индия и вся Западная Австралия (рис. 26). Все породы древних щитов не только метаморфизованы и претерпели перекристаллизацию, но и очень сильно смяты в мелкие сложные складки (рис. 27).

Другие области на материках заняты породами преимущественно более молодого — палеозойского, мезозойского и кайнозойского возраста. Это — главным образом осадочные породы, хотя среди них встречаются и породы магматического происхождения, излившиеся на поверхность в виде вулканической лавы или внедрившиеся и застывшие на некоторой глубине. Существуют две категории областей: на поверхности одних пласты осадочных пород залегают очень спокойно, почти горизонтально, и в них наблюдаются лишь редкие и небольшие складки. В таких местах магматические породы, особенно интрузивные, играют относительно малую роль. Такие области называются *платформами*. В других местах осадочные породы сильно смяты в складки, пронизаны глубокими трещинами. Среди них часто встречаются внедрившиеся или излившиеся магматические породы. Эти места обычно совпадают с горами. Они называются *складчатыми зонами*, или *геосинклиналями*.

Различия между отдельными платформами и складчатыми зонами — в возрасте лежащих спокойно или смятых в складки пород. Среди платформ выделяются древние платформы, на которых все палеозойские, мезозойские и кайнозойские породы залегают почти горизонтально поверх сильно метаморфизованного и смятого в складки «кристаллического основания», сложенного докембрийскими породами. Примером древней платформы является Русская платформа, в пределах которой все слои, начиная с кембрийских, лежат в общем очень спокойно.

Существуют платформы, на которых не только докембрийские, но также кембрийские, ордовикские и силурийские слои смяты в складки, а спокойно поверх этих складок на их размытой поверхности (как говорят, «несогласно») залегают более молодые породы, начиная с девонских.

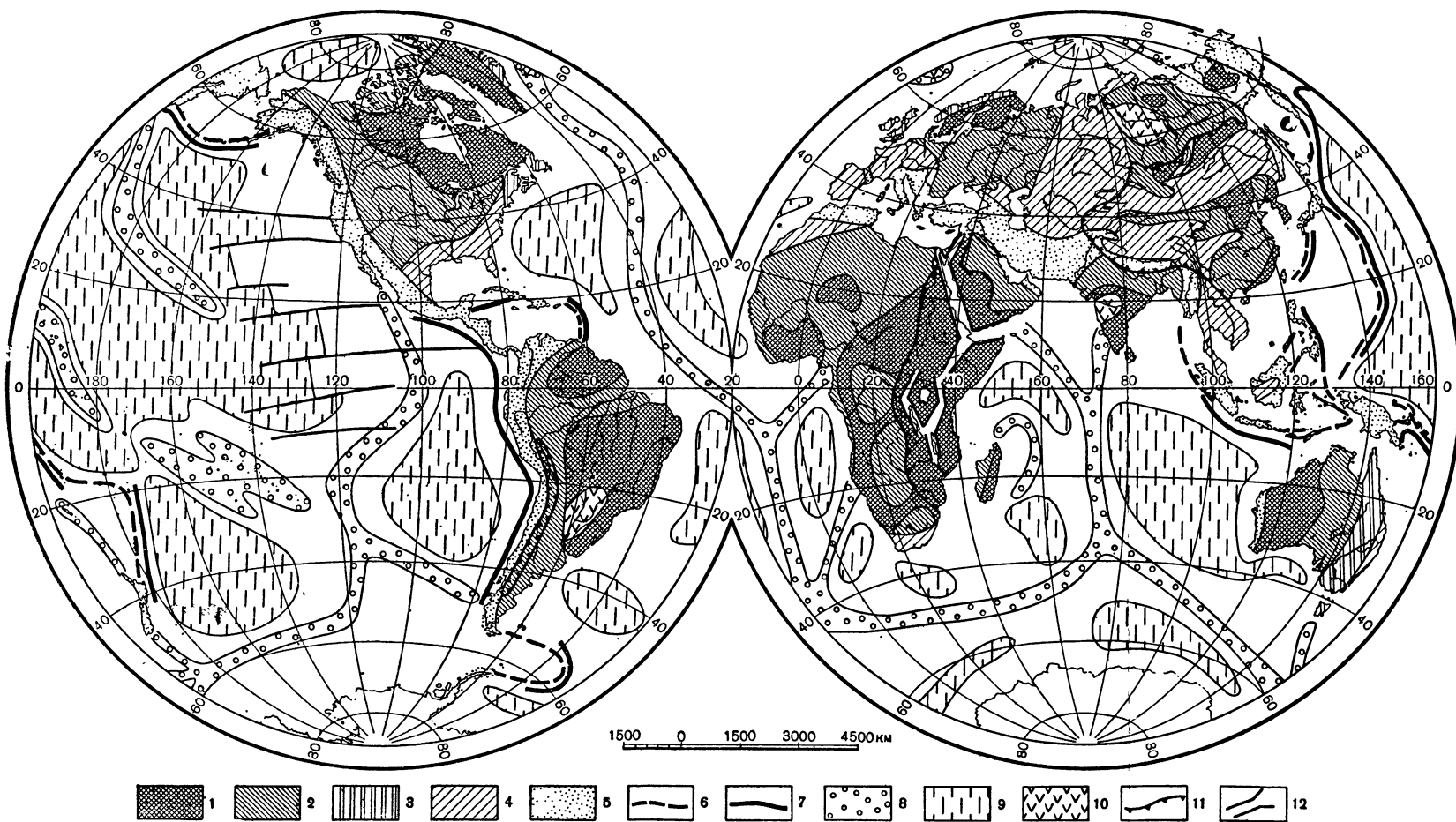


Рис. 26. Схема строения поверхности Земли

1 — щиты, 2 — древние платформы, 3 — складчатые зоны каледонского возраста, 4 — складчатые зоны герцинского возраста, 5 — складчатые зоны альпийского возраста, 6 — островные дуги, 7 — глубоководные рвы, 8 — подводные хребты, 9 — глубокие океанические бассейны, 10 — плато-базальты, 11 — граница областей тектонической активизации, 12 — крупнейшие разломы



В других местах «складчатый фундамент» образован, кроме докембрийских, всеми палеозойскими породами, а почти горизонтально лежат породы только мезозоя и кайнозоя. Платформы двух последних категорий называются молодыми. Одни из них, как мы видим, образовались после силурийского периода (до того здесь существовали складчатые зоны), а другие — после конца палеозойской эры.

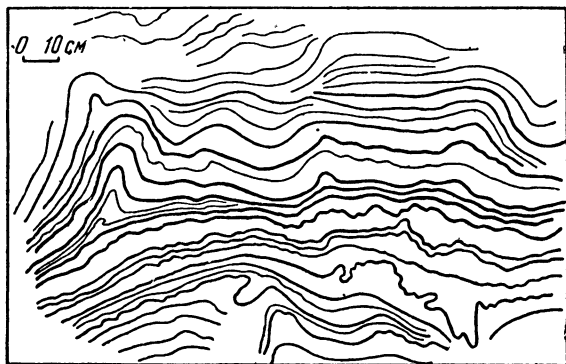


Рис. 27. Мелкие неправильные складки в древнейших (архейских) породах. Карелия.  
Зарисовка по фотографии А. А. Сорского

Таким образом, выясняется, что на материках есть платформы разного возраста, образовавшиеся раньше или позже. До того, как образовалась платформа (в одних случаях — до конца протерозойской эры, в других — до конца силурийского периода, в третьих — до конца палеозойской эры), в земной коре происходило сильное смятие слоев в складки, в нее внедрялись магматические расплавленные породы, осадки подвергались метаморфизации, перекристаллизации. И только после этого наступало успокоение, и последующие слои осадочных пород, накопившись горизонтально на дне морских бассейнов, в общем так и сохраняли в дальнейшем свое спокойное залегание.

Наконец, в остальных местах все слои смяты в складки и пронизаны магматическими породами — вплоть до неогеновых.

Говоря, что платформы могли образоваться в разное время, мы вместе с тем указываем и на разный возраст складчатых зон. Действительно, на древних кристалличе-

ских щитах смятие слоев в складки, внедрение магматических пород, перекристаллизация закончились до начала палеозоя. Следовательно, щиты являются зонами докембрийской складчатости. Там, где спокойное залегание слоев не нарушалось с девонского периода, смятие слоев в складки продолжалось до конца силурийского периода, или, как говорят, до конца раннего палеозоя. Следовательно, эта группа молодых платформ является в то же время областью раннепалеозойской складчатости. Складчатость этого времени носит название каледонской складчатости. Там, где платформа образовалась с начала мезозоя, мы имеем зоны позднепалеозойской или герцинской складчатости. Наконец области, где в складки сильно смяты все слои, вплоть до неогеновых включительно, являются зонами наиболее молодой, альпийской складчатости, оставившей не смятыми только слои, образовавшиеся в четвертичном периоде.

Все это чрезвычайно важно для расшифровки истории развития земной коры, и этими данными мы воспользуемся в следующей главе. Расположение платформ и складчатых зон разного возраста на поверхности материков схематично показано на рис. 26.

Карты, изображающие расположение платформ и складчатых зон разного возраста и некоторые другие особенности строения земной коры, называются тектоническими (тектоника — раздел геологии, изучающий движения и деформации земной коры). Эти карты служат дополнением к геологическим картам. Последние представляют собой первичные геологические документы, наиболее объективно освещающие строение земной коры. На тектонических картах содержатся уже некоторые выводы: о возрасте платформ и складчатых зон, о характере и времени образования складок, о глубине залегания складчатого фундамента под спокойными слоями платформ и др. Принципы составления тектонических карт были разработаны в 30-х годах советскими геологами, главным образом академиком А. Д. Архангельским. После Великой Отечественной войны тектонические карты Советского Союза составлялись под руководством академика Н. С. Шатского. Эти карты приняты в качестве примера для составления международных тектонических карт Европы, других материков и всей Земли в целом.

Толщина осадочных свит в тех местах, где они лежат спокойно (т. е. на платформах), и там, где они сильно смя-

ты в складки, различна. Например, отложения юрского возраста на Русской платформе нигде не имеют толщину или «мощность» больше 200 метров, тогда как их толщина на Кавказе, где они сильно смяты в складки, местами достигает 8 километров. Отложения каменноугольного периода на той же Русской платформе имеют мощность не больше нескольких сотен метров, а на Урале, где те же отложения сильно смяты в складки, их мощность местами вырастает до 5—6 километров. Это указывает на то, что когда на платформе и в районах складчатой зоны накапливались разновозрастные отложения, земная кора очень мало прогибалась на платформе и много сильнее прогибалась в складчатой зоне. Поэтому на платформе не было места для накопления столь мощных свит, какие могли накопиться в глубоких прогибах земной коры в складчатых зонах.

В пределах платформ и складчатых зон мощность накопившихся осадочных пород не остается всюду одинаковой. Она изменяется от участка к участку. Но на платформах изменения эти плавны, постепенны и невелики. Они указывают, что во время накопления отложений платформа прогибалась местами немного больше, местами немного меньше и в ее фундаменте образовывались широкие пологие прогибы (синеклизы), разделенные столь же пологими поднятиями (антеклизмами). В противоположность этому в складчатых зонах мощность осадочных пород одного и того же возраста изменяется от участка к участку очень резко, на коротких расстояниях, то возрастая до нескольких километров, то уменьшаясь до нескольких сотен или десятков метров или даже сходя на нет. Это указывает на то, что во время накопления осадков в складчатой зоне одни районы прогибались сильно и глубоко, другие прогибались мало или даже вовсе не прогибались, а третьи в то же время сильно поднимались, как о том свидетельствуют находимые рядом с ними грубообломочные отложения, образовавшиеся в результате размыва поднимавшихся участков. При этом существенно то, что все эти участки, интенсивно прогибавшиеся и интенсивно поднимавшиеся, были узки и располагались в виде полос тесно рядом друг с другом, что приводило к очень большим контрастам в движениях земной коры на близких расстояниях.

Имея в виду все указанные особенности движений земной коры: очень контрастные и сильные опускания и поднятия ее, сильную складчатость, энергичную магматиче-

скую деятельность, т. е. все особенности исторического развития складчатых зон, эти зоны обычно называют *геосинклиналями*, оставляя название «складчатая зона» лишь для характеристики современного их строения, явившегося результатом всех предшествовавших бурных событий в земной коре. Термином «геосинклиналь» мы и будем в дальнейшем пользоваться, когда речь будет идти не о современном строении складчатой зоны, а об особенностях ее предшествующего развития.

Платформы и складчатые зоны значительно отличаются друг от друга по тем полезным ископаемым, которые находятся на их территории. На платформах мало магматических пород, которые внедрились в спокойно лежащие слои осадочных пород. Поэтому на платформах лишь редко встречаются полезные ископаемые магматического происхождения. Зато в спокойно залегающих осадочных слоях платформы широко распространены угли, нефть, природные газы, а также каменная соль, гипс, строительные материалы и т. д. В складчатых зонах преимущество на стороне магматических полезных ископаемых. Это — различные металлы, которые образовались в разные стадии застывания магматических очагов, как об этом было рассказано в главе 2.

Впрочем, когда мы говорим о преимущественной приуроченности осадочных полезных ископаемых к платформам, не надо забывать, что речь идет о слоях, залегающих спокойно, а не о тех сильно метаморфизованных и смятых кристаллических породах древнего «складчатого фундамента» платформ, который лучше всего виден на «щитах». Эти породы фундамента отражают ту эпоху, когда платформы здесь еще не было, а существовала геосинклиналь. Поэтому полезные ископаемые, находимые в складчатом фундаменте, по типу своему — геосинклинальные, т. е. преимущественно магматические. Следовательно, на платформах существует как бы два этажа полезных ископаемых: нижний этаж — древний, принадлежащий фундаменту, геосинклинальный; для него характерны металлические руды; верхний этаж — собственно платформенный, принадлежащий спокойно лежащему на фундаменте покрову осадочных пород; это — осадочные, т. е. преимущественно неметаллические полезные ископаемые.

Несколько слов надо сказать о складках.

Выше упоминалась сильная складчатость в складчатых

зонах и слабая складчатость на платформах. Следует отметить, что речь должна идти не только о разной интенсивности складчатости, но и о том, что для складчатых зон и платформ характерны складки разных типов. В складчатых зонах складки принадлежат типу, который называется линейным, или полным. Это — длинные узкие складки, которые, как волны, следуют друг за другом, примыкая друг к другу и покрывая сплошь большие площади. Складки имеют разную форму: некоторые из них округлые, другие острые, одни прямые, вертикальные, другие — наклонные (см. рис. 9). Но все они похожи друг на друга, а главное, покрывают складчатую зону непрерывной чередой.

На платформах — складки иного типа. Это — отдельные изолированные поднятия слоев. Некоторые из них имеют столообразную или, как говорят, сундучную или коробчатую форму, многие имеют вид пологих куполов или валов. Складки здесь не вытянуты, как в складчатой зоне, в полосы, а располагаются более сложными фигурами или разбросаны довольно беспорядочно. Это складчатость «прерывистая», или куполовидная (рис. 28).

Складки прерывистого типа — сундучные поднятия, купола и валы — встречаются не только на платформе, но и на краю складчатых зон. Так что существует в некоторой мере постепенный переход от складок платформенных к тем, которые типичны для складчатых зон.

На платформах и на краю складчатых зон встречается еще один своеобразный тип складок — так называемые «диапировые купола». Они образуются там, где на какой-то глубине лежат мощные пласты каменной соли, гипса или мягких глин. Удельный вес каменной соли меньше, чем удельный вес других осадочных пород (каменной соли 2,1, песков и глин 2,3). Таким образом, более легкая соль оказывается под более тяжелыми глинами, песками, известняками. Благодаря способности горных пород медленно пластически деформироваться под действием малых механических сил (явление ползучести, о котором упоминалось выше), соль стремится всплыть к поверхности, проткнув и раздвинув вышележащие более тяжелые слои (рис. 29, а). Этому помогает то, что соль под давлением оказывается чрезвычайно текучей и в то же время прочной: она легко течет, но не ломается. Соль всплывает в виде колонн. При этом она приподнимает вышележащие слои, изгибает их куполообразно и, выпирая вверх, вызывает их раскалывание



на отдельные куски. Поэтому на поверхности такие диапировые купола часто имеют вид «разбитой тарелки». Аналогичным способом образуются диапировые складки, в «ядрах протыкания» которых мы находим не соль, а мягкие глины. Но глиняные диапировые складки обычно имеют вид не круглых колонн, как соляные диапировые купола, а длинных вытянутых гребней (рис. 29, б). В главе 6 мы подробнее поговорим о причинах смятия слоев в складки разных типов.

Встречающиеся на платформах купола (в том числе и диапировые) и валы играют большую роль в образовании скоплений нефти и газов, как об этом говорилось в главе 2. В складчатых зонах месторождения полезных ископаемых большей частью приурочены к трещинам.

Обратимся теперь к более глубоким слоям земной коры. Нам придется покинуть область, которая нам известна по непосредственным наблюдениям с поверхности, и направиться туда, где сведения можно получить только путем геофизических исследований.

Как уже говорилось, в пределах видимой части земной коры глубже всего лежат метаморфические породы архейского возраста. Среди них больше всего распространены гнейсы и граниты. Наблюдения показывают, что чем более глубокий срез земной коры наблюдаем мы на поверхности, тем больше встречаем гранитов. Поэтому можно думать, что еще глубже — в нескольких километрах под поверхностью кристаллических щитов или примерно в 10 км под поверхностью платформ и складчатых зон — мы встретили бы под материками сплошной слой гранита. Верхняя поверхность этого гранитного слоя очень неровна: она то поднимается к дневной поверхности, то опускается на 5—10 км ниже нее.

Глубину нижней поверхности этого слоя нам остается только предполагать на основании некоторых данных о скорости распространения в земной коре упругих сейсмических колебаний. Скорость движения так называемых продольных сейсмических волн<sup>1</sup> в гранитах в среднем около 5 км/сек. Но в ряде мест было обнаружено, что на глубине в 10, 15, 20 км скорость распространения тех же

---

<sup>1</sup> В продольных волнах колебания частиц происходят в направлении движения волн: вперед и назад. Так называемые поперечные волны характеризуются колебаниями поперек направления движения волны: вверх — вниз или вправо — влево.

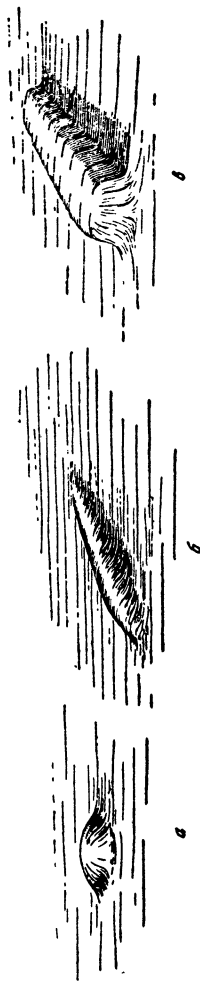


Рис. 28. Складки, встречающиеся на платформе

а — купол, б — вал, в — сундучная складка

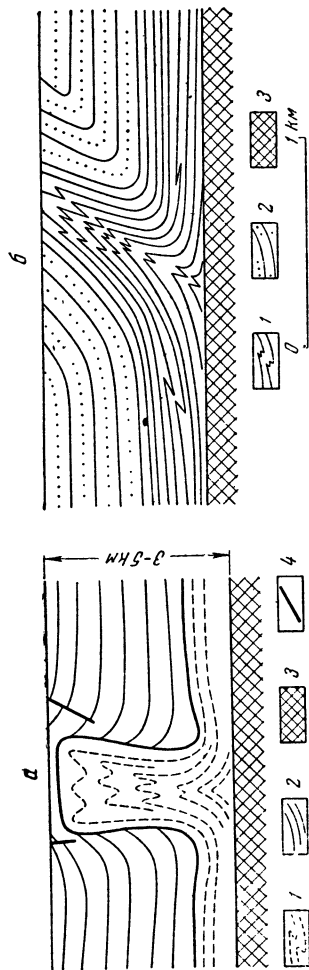


Рис. 29. Диapiroвые складки в разрезе

а — соляной купол; 1 — соль; 2 — разные осадочные породы, покрывающие соль; 3 — породы, подстилающие соль; 4 — расколы в покрывающей толще пород, образовавшиеся под напором соли; б — глиняный диапир: 1 — пластичная глина; 2 — покрывающие глину другие, менее пластичные, породы — песчаники, известняки и т. п.; 3 — подстилающие породы. Масштабы указывают приблизительные размеры складок в природе

продольных сейсмических волн становится больше и достигает 6 или 6,5 км/сек. Поскольку эта скорость слишком велика для гранита и близка к скорости распространения упругих колебаний, характеризующей по лабораторным испытаниям такую породу, как базальт, слой земной коры с большей скоростью распространения сейсмических волн получил название *базальтового*. В разных районах он начинается на разной глубине — обычно на глубине в 15 или 20 км, но в некоторых районах подходит гораздо ближе к поверхности, и скважина глубиной 6—8 км могла бы его достичь.

Однако до сих пор ни одна скважина не проникла в базальтовый слой и никто не видел тех пород, которые лежат в этом слое. Действительно ли это базальты? По этому поводу высказываются сомнения. Некоторые думают, что вместо базальтов мы найдем там те же гнейсы, граниты и метаморфические породы, которые свойственны вышележащему гранитному слою, но которые на большей глубине сильно уплотнены давлением вышележащих пород, и поэтому скорость распространения в них сейсмических волн больше. Решение этого вопроса представляет огромный интерес и не только теоретический: где-то в нижней части гранитного и верхней части базальтового слоев происходят процессы образования гранитов и зарождения тех горячих растворов и газов, из которых выше, при их движении к поверхности, кристаллизуются различные рудные минералы. Знать, что представляет собой в действительности базальтовый слой, — это означает лучше понять процессы образования металлических руд в земной коре и законы их распространения. Вот почему заслуживает всяческой поддержки проект бурения сверхглубинных скважин для изучения строения всего гранитного и по крайней мере верхней части базальтового слоя.

Базальтовый слой — нижний слой материковой земной коры. Внизу он отделяется от более глубоких частей Земли очень резким разделом, который называется *разделом Мохоровичича* (по имени югославского сейсмолога, открывшего существование этого раздела в начале нашего века). На этом разделе Мохоровичича (или, сокращенно, Мохо) скорость продольных сейсмических волн изменяется резким скачком: выше раздела она обычно равна 6,5 км/сек, а сразу же ниже его увеличивается до 8 км/сек. Этот раздел считается нижней границей земной коры. Расстояние

его от поверхности, следовательно, является толщиной земной коры. Наблюдения показывают, что толщина коры под материками далеко не одинакова. В среднем она равна 35 км, но под горами увеличивается до 50, 60 и даже 70 км. При этом чем выше горы, тем толще земная кора: крупному выступу поверхности земли вверх соответствует значительно больший по размеру выступ вниз; таким образом, горы имеют как бы «корни», глубоко опускающиеся в более глубокие слои Земли. Под равнинами, наоборот, толщина коры оказывается меньше средней. Изменяется также от района к району и относительная роль в разрезе земной коры гранитного и базальтового слоев. Особенно интересно, что под одними горами «корни» образованы главным образом за счет увеличения толщины гранитного слоя, а под другими — за счет возрастания толщины базальтового слоя. Первый случай наблюдается, например, на Кавказе, второй — в Тянь-Шане. Дальше мы увидим, что происхождение этих гор различно; это отразилось и на различном строении под ними земной коры.

Одно свойство земной коры, тесно связанное с «корнями» гор, следует особо отметить: это так называемая изостазия, или равновесие. Наблюдения над величиной силы тяжести на поверхности Земли показывают, как мы видели, наличие некоторых колебаний этой величины от места к месту, т. е. существование некоторых аномалий силы тяжести. Однако эти аномалии (после вычета влияния географического и высотного положения точки наблюдения) чрезвычайно малы; они могут вызвать изменение веса человека всего на несколько граммов. Такие отклонения от нормальной силы тяжести чрезвычайно малы по сравнению с теми, которые можно было бы ожидать, имея в виду рельеф земной поверхности. В самом деле, если бы горные хребты представляли собой нагромождение излишних масс на поверхности Земли, то эти массы должны были бы создавать более сильное притяжение. Наоборот, над морями, где вместо плотных горных пород притягивающим телом является менее плотная вода, сила тяжести должна была бы ослабевать.

На самом деле таких различий нет. Сила тяжести не становится больше в горах и меньше на море, она всюду приблизительно одинакова, а наблюдающиеся отклонения от средней величины значительно меньше того влияния, которое должны были бы оказывать неровности рельефа

или замена пород морской водой. Отсюда возможен лишь один вывод: дополнительным массам на поверхности, образующим хребты, должна соответствовать недостача масс на глубине; только в этом случае общая масса и общее притяжение пород, находящихся под горами, не превысит нормальной величины. Наоборот, недостатку масс на поверхности в морях должны соответствовать какие-то более тяжелые массы на глубине. Указанные выше изменения толщины коры под горами и равнинами как раз и отвечают этим условиям. Средняя плотность пород земной коры равна 2,7. Под земной корой, сразу же ниже раздела Мохо, вещество имеет более высокую плотность, достигающую 3,3. Поэтому там, где земная кора тоньше (под низменностями), ближе к поверхности подступает тяжелый подкоровый «субстрат» и его притягивающее влияние компенсирует «недостачу» масс на поверхности. Напротив, в горах увеличение толщины легкой коры снижает общую силу притяжения, компенсируя тем самым то увеличение притяжения, которое вызывается дополнительными поверхностными массами. Создаются условия, при которых земная кора как бы плавает на тяжелой подстилке подобно льдинам на воде: более толстая льдина глубже погружается в воду, но и выше выдается над ней; менее толстая льдина погружается меньше, но и меньше выступает.

Такое поведение льдин соответствует известному закону Архимеда, определяющему равновесие плавающих тел. Этому ж закону подчиняется и земная кора: там, где она толще, она глубже уходит в субстрат в виде «корней», но и выше выступает на поверхности; где кора тоньше, тяжелый субстрат подступает ближе к поверхности, а поверхность коры оказывается относительно опущенной и образует либо равнину, либо дно моря. Таким образом, состояние коры соответствует равновесию плавающих тел, почему это состояние и называется изостазией.

Следует оговориться, что вывод о равновесии земной коры по отношению к ее тяжести и субстрату справедлив в том случае, если мы будем учитывать среднюю толщину коры и среднюю высоту ее поверхности для больших площадей — диаметром в несколько сот километров. Если же мы будем выяснять поведение значительно меньших участков земной коры, то обнаружим отклонения от равновесия, несоответствия между толщиной коры и высотой ее поверхности, которые и выражаются в виде соответствующих:

аномалий силы тяжести. Представим себе большую льдину. Ее равновесие, как тела, плавающего на воде, будет зависеть от ее средней толщины. Но в разных местах льдина может иметь очень разную толщину, она может быть разъедена водой и ее нижняя поверхность может иметь много мелких карманов и выпуклостей. В пределах каждого кармана или каждой выпуклости положение льда по отношению к воде может сильно отличаться от равновесного: если мы выколем соответствующий кусок льда из льдины, то он либо погрузится глубже окружающей льдины, либо всплывает выше нее. Но в целом льдина находится в равновесии, и это равновесие зависит от средней толщины льдины.

Под земной корой мы входим в следующую, очень мощную оболочку Земли, называемую *мантией Земли*. Она простирается вглубь на 2900 км. На этой глубине находится следующий резкий раздел в веществе Земли, отделяющий мантию от *ядра Земли*. Внутри мантии, по мере углубления, скорость распространения сейсмических волн растет и внизу мантии достигает для продольных волн 13,6 км/сек. Но нарастание этой скорости неравномерно: оно значительно быстрее в верхней части, до глубины около 1000 км, и чрезвычайно медленно и постепенно на большей глубине. В связи с этим мантию можно разделить на две части — верхнюю и нижнюю мантию. Сейчас накапливается все больше данных, указывающих, что такое разделение мантии на верхнюю и нижнюю имеет большое принципиальное значение, так как развитие земной коры, по-видимому, непосредственно связано с процессами, происходящими в верхней мантии. О характере этих процессов речь будет дальше. Нижняя мантия, видимо, мало влияет непосредственно на земную кору.

Вещество, из которого состоит мантия, твердое. Это подтверждает характер прохождения через мантию сейсмических волн. Относительно химического состава мантии имеются расхождения во взглядах. Некоторые думают, что верхняя мантия состоит из горной породы, называемой перидотитом. Эта порода содержит очень немного кремнезема; основной составной частью ее является минерал оливин — силикат, богатый железом и магнием. Другие предполагают, что верхняя мантия значительно богаче кремнеземом и по своему составу соответствует базальту, но минералы, из которых состоит этот глубинный базальт, более

плотные, чем минералы поверхностного базальта. Например, в глубинном базальте существенную роль играют гранаты — минералы с очень плотной «упаковкой» атомов в кристаллической решетке. Такой глубинный базальт, получившийся как бы в результате спрессовывания обычного поверхностного базальта, называется эклогитом.

Существуют аргументы в пользу обеих точек зрения. В частности, вторую точку зрения подтверждает огромное количество изливавшихся и изливающихся сейчас во время вулканических извержений очень однообразных по своему химическому составу базальтов. Источник их может быть только в верхней мантии.

Если эта точка зрения окажется правильной, то тогда мы должны считать, что на разделе Мохо происходит не изменение химического состава вещества, а переход одного и того же по химическому составу вещества в новое, более плотное, «глубинное» состояние, в другую, как говорят, «фазу». Такие переходы называются «фазовыми переходами». Этот переход зависит от изменения с глубиной давления. При достижении определенной величины давления обычный базальт переходит в эклогит и менее плотные полевые шпаты заменяются более плотными гранатами. На такие переходы влияет также температура: повышение ее при одном и том же давлении затрудняет переход базальта в эклогит. Поэтому нижняя граница земной коры становится подвижной, зависимой от изменения температуры. Если температура повышается, то некоторая часть эклогита переходит обратно в обычный базальт, граница коры опускается, кора становится толще; при этом объем вещества увеличивается на 15 %. Если же температура понижается, то при том же давлении часть базальта в нижних слоях коры переходит в эклогит, граница коры поднимается, кора становится тоньше, и объем перешедшего в новую фазу материала уменьшается на 15 %. Этими процессами можно объяснить колебания земной коры вверх и вниз: в результате своего утолщения кора будет всплывать, подниматься, при уменьшении же толщины она будет тонуть, прогибаться.

Однако окончательно вопрос о химическом составе и физическом состоянии верхней мантии будет решен, видимо, только в результате сверхглубокого бурения, когда буровые скважины, пройдя насквозь всю кору, достигнут вещества верхней мантии.

Важной особенностью строения верхней мантии является «пояс размягчения», расположенный на глубине между 100 и 200 км. В этом поясе, который называется также *астеносферой*, скорость распространения упругих колебаний немного меньше, чем выше и ниже его, а это свидетельствует о несколько менее твердом состоянии вещества. В дальнейшем мы увидим, что «пояс размягчения» играет в жизни Земли очень важную роль.

В нижней мантии вещество становится значительно более тяжелым. Его плотность повышается, по-видимому, до 5,6. Предполагается, что оно состоит из силикатов, очень богатых железом и магнием и бедных кремнеземом. Возможно, что в нижней мантии широко распространен сульфид железа.

На глубине 2900 км, как указывалось, мантия кончается и начинается *ядро Земли*. Важнейшей особенностью ядра является то, что оно пропускает продольные сейсмические колебания, но оказывается непроходимым для поперечных колебаний. Поскольку поперечные упругие колебания проходят через твердые тела, но быстро угасают в жидкостях, тогда как продольные колебания проходят и сквозь твердые, и сквозь жидкие тела, следует сделать вывод, что ядро Земли находится в жидком состоянии. Конечно, оно далеко не такое жидкое, как вода; это очень густое вещество, близкое к твердому состоянию, но все же значительно более текучее, чем вещество мантии.

Внутри ядра выделяется еще *внутреннее ядро*, или ядрышко. Верхняя граница его находится на глубине 5000 км, т. е. на расстоянии 1370 км от центра Земли. Здесь наблюдается не очень резкий раздел, на котором скорость сейсмических колебаний еще раз быстро падает, а потом, по направлению к центру Земли, снова начинает возрастать (рис. 30). Есть предположение, что внутреннее ядро твердое и что в жидком состоянии находится только внешнее ядро. Однако, поскольку последнее препятствует прохождению поперечных колебаний, вопрос о состоянии внутреннего ядра не может быть пока окончательно решен.

О химическом составе ядра было много споров. Они продолжаются до сих пор. Многие еще придерживаются старой точки зрения, считая, что ядро Земли состоит из железа с небольшой примесью никеля. Прототипом этого



состава являются железные метеориты. Метеориты вообще рассматриваются либо как осколки ранее существовавших и распавшихся планет, либо как оставшиеся «неиспользованными» мелкие космические тела, из которых несколько миллиардов лет назад были «собраны» планеты. В обоих случаях метеориты должны как будто представлять химический состав той или иной оболочки планеты.

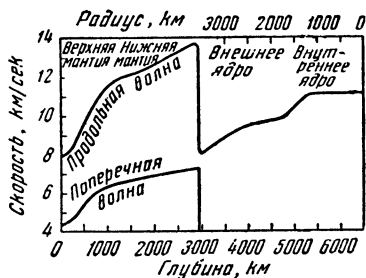


Рис. 30. Кривые, показывающие, как изменяется скорость распространения продольных и поперечных сейсмических волн с глубиной

Цифры внизу — глубина от поверхности Земли; цифры вверх — расстояние от центра Земли. По вертикальной оси отложены скорости волн в километрах в секунду

ления в ядре (на верхней границе ядра оно равно 1,3 млн. атмосфер, а в центре Земли 3 млн. атм.). Это значит, что под влиянием давления атомы силикатов частично разрушились и от них откололись отдельные электроны, которые получили возможность независимо двигаться. Этим, как и в металлах, обусловлены некоторые металлические свойства ядра: большая плотность; достигающая в центре Земли 12,6 электропроводность, теплопроводность.

Наконец, существует и промежуточная точка зрения, начинающая теперь преобладать, а именно, что внутреннее ядро — железное, а внешнее сложено силикатами в металлическом состоянии.

Согласно современной теории, с внешним ядром связано магнитное поле Земли. Заряженные электроны движутся во внешнем ядре на глубине между 2900 и 5000 км,

Каменные метеориты, вероятно, отвечают химическому составу мантии, во всяком случае нижней. Более тяжелые, железные метеориты соответствуют, как многие думают, более глубоким недрам — ядру планеты.

Однако другие исследователи находят аргументы против представления о железном составе ядра и полагают, что ядро должно состоять из силикатов, в общем таких же, какие составляют мантию, но что эти силикаты находятся в «металлическом» состоянии в результате огромного да-

описывая круги или петли, и это их движение и приводит к возникновению магнитного поля. Хорошо известно, что советские ракеты, пущенные к Луне, не обнаружили у нашего естественного спутника магнитного поля. Это вполне соответствует предположениям об отсутствии у Луны ядра, подобного земному.

Рассмотрим теперь строение земных недр под океанами.

Хотя за последнее время, начиная с Международного Геофизического Года, дно океана и глубины Земли под океанами изучаются чрезвычайно интенсивно (хорошо известны многочисленные рейсы советского исследовательского корабля «Витязь»), мы знаем геологическое строение территорий океанов все же много хуже, чем строение материков. Установлено, впрочем, что на дне океанов нет щитов, платформ и складчатых зон, подобных тем, которые известны на материках. По рельефу дна в океанах можно выделить в качестве наиболее крупных элементов равнины (или бассейны), океанические хребты и глубоководные рвы.

Равнины занимают широкие пространства на дне всех океанов. Они располагаются почти всегда на одной глубине (5—5,5 км).

Океанические хребты представляют собой широкие бугристые валы. Особенно характерен Атлантический подводный хребет. Он протягивается с севера на юг, в точности по средней линии океана, изгибаясь параллельно берегам окаймляющих материков. Его гребень находится обычно на глубине около 2 км, но отдельные вершины поднимаются выше уровня моря в виде вулканических островов (острова Азорские, Св. Павла, Вознесения, Тристан-да-Кунья). Прямо на продолжении подводного хребта расположена Исландия с ее вулканами.

Подводный хребет в Индийском океане тянется также в меридиональном направлении вдоль средней линии океана (см. рис. 26). У островов Чагос этот хребет разветвляется. Одна его ветвь идет прямо на север, где на его продолжении в районе Бомбея известны огромные застывшие потоки вулканических базальтов (плато Деккан). Другая ветвь направляется к северо-западу и теряется перед входом в Красное море.

Атлантический и Индийский подводные хребты соединены между собой, как это видно на рис. 26. В свою оче-

редь Индийский хребет соединяется с Восточно-Тихоокеанским подводным хребтом. Последний тянется в широтном направлении южнее Новой Зеландии, но на меридиане 120° западной долготы резко поворачивает к северу. Он приближается к берегам Мексики и здесь теряется в мелководье перед входом в Калифорнийский залив.

Ряд более коротких подводных хребтов занимает центральную часть Тихого океана. Почти все они вытянуты с юго-востока на северо-запад. На вершине одного такого подводного хребта расположены Гавайские острова, на вершинах других — многочисленные архипелаги более мелких островов.

Примером подводного океанического хребта является также открытый советскими учеными в Северном Ледовитом океане хребет Ломоносова.

Почти все крупные подводные хребты соединены между собой и образуют как бы единую систему. Неясно пока взаимоотношение хребта Ломоносова с другими хребтами.

Глубоководные океанические рывтины представляют собой узкие (100—300 км) и длинные (несколько тысяч километров) желоба в дне океана, в пределах которых наблюдаются максимальные глубины. Именно в одной из таких рывтин, Марианской, была найдена советским экспедиционным судном «Витязь» наибольшая глубина Мирового океана, достигающая 11034 м. Глубоководные рывтины расположены по периферии океанов. Чаще всего они окаймляют островные дуги. Последние в ряде мест являются характерной особенностью строения переходных зон между материками и океаном. Островные дуги особенно широко развиты по западной периферии Тихого океана — между океаном, с одной стороны, и Азией и Австралией, с другой. С севера на юг гирляндами спускаются дуги островов Алеутских, Курильских, Японских, Бонино-Марианских, Филиппинских, Тонга, Кермадек и Новой Зеландии. Почти все эти дуги с внешней (выпуклой) стороны окаймляются глубоководными рывтинами (см. рис. 26). Такая же рывтина окаймляет Антильскую островную дугу в Центральной Америке. Другая рывтина окаймляет со стороны Индийского океана островную дугу Индонезии. Некоторые рывтины, находясь на периферии океана, не связаны с островными дугами. Такова, например, Атакамская рывтина у берегов Южной Америки. Периферическое положение глубоководных рывтин, конечно, не случайно.

Говоря о геологическом строении дна океана, прежде всего следует отметить, что в открытом океане толщина накопившихся на дне рыхлых осадков невелика — не больше километра, а часто и меньше. Эти осадки состоят из очень тонких известковых илов, образованных преимущественно микроскопически мелкими раковинками одноклеточных организмов — глобигерин, а также из так называемых красных глубоководных глин, содержащих мельчайшие крупинки окислов железа и марганца. За последнее время во многих местах на огромных расстояниях от берегов обнаружены целые полосы осадков обломочного происхождения — песков. Они явно принесены в эти районы океанов из прибрежных областей и своим существованием указывают на наличие сильных глубоководных течений в океанах.

Другой особенностью является огромное и повсеместное развитие следов вулканической деятельности. На дне всех океанов известно большое количество конусовидных огромных гор; это — погасшие древние вулканы. Много на дне океанов и действующих вулканов. Из этих вулканов изливались и изливаются только базальты и при этом очень однообразные по своему составу, всюду одинаковые. По периферии океанов, на островных дугах, известны и другие лавы, содержащие больше кремнезема, — андезиты, но в средних частях океанов вулканические излияния — только базальтовые. И вообще в средних частях океанов почти неизвестно никаких других твердых горных пород, кроме базальтов. Океанографическая драга всегда поднимала со дна обломки только базальтов, если не считать некоторых осадочных пород. Следует еще упомянуть о глубоких огромных широтных трещинах длиной в несколько тысяч километров, пересекающих дно северо-восточной части Тихого океана (см. рис. 26). Вдоль этих трещин прослеживаются резкие уступы в дне океана.

Глубинное строение земной коры в океане значительно проще, чем под материками. В океанах отсутствует гранитный слой и рыхлые осадки непосредственно лежат на базальтовом слое, толщина которого значительно меньше, чем на материках: обычно она равна всего 5 км. Таким образом, твердая часть земной коры в океанах состоит из одного километра рыхлых осадков и пяти километров базальтового слоя. То, что этот слой действительно состоит из базальта, для океанов гораздо вероятнее, чем для

материков, если учесть широкое распространение базальтов на дне океана и на океанических островах. Если к этому прибавить пять километров средней толщины слоя океанической воды, то глубина нижней границы земной коры (раздела Мохо) под океанами будет всего 11 км — много меньше, чем под материками. Таким образом, океаническая кора тоньше материковой. Поэтому американские инженеры и начали бурение сквозь всю земную кору именно в океане, с плавучей буровой установки, рассчитывая там легче достичь верхних слоев мантии и выяснить их состав.

Есть данные, заставляющие предполагать, что океаническая кора становится толще под подводными хребтами. Там ее толщина 20—25 км и она остается базальтовой. Интересно, что кора имеет океаническое строение не только под открытыми океанами, но и под некоторыми глубокими морями: базальтовая кора и отсутствие гранитного слоя были установлены под глубокой частью Черного моря, под Южным Каспием, под наиболее глубокими впадинами Карибского моря, под Японским морем и в других местах. Моря промежуточной глубины имеют и промежуточное строение коры: она под ними тоньше типичной материковой, но толще океанической, имеет и гранитный и базальтовый слой, но гранитный слой много тоньше, чем на материке. Такая промежуточная кора наблюдается в мелких районах Карибского моря, в Охотском море и в других местах.

Строение мантии и ядра под океанами в общем сходно со строением их под материками. Отличие наблюдается в верхней мантии: «пояс размягчения» (астеносфера) под океанами толще, чем под материками; под океанами этот пояс начинается уже на глубине 50 км и продолжается в глубину до 400 км, тогда как на материках он сосредоточен между 100 и 200 км глубины. Таким образом, различия в строении между материками и океанами распространяются не только на всю толщу земной коры, но и на верхнюю мантию до глубины по крайней мере 400 км. Глубже — в нижних слоях верхней мантии, в нижней мантии, во внешнем и внутреннем ядре — никаких изменений в строении в горизонтальном направлении, никаких различий между материковыми и океаническими секторами Земли пока не найдено.

В заключение скажем несколько слов о некоторых общих свойствах земного шара.

Земной шар излучает тепло. Постоянный поток тепла течет из внутренних частей Земли к поверхности. В связи с этим существует так называемый температурный градиент — повышение температуры с глубиной. В среднем этот градиент принимается равным  $30^\circ$  на 1 км, т. е. с углублением на 1 км температура повышается на  $30^\circ$  Цельсия. Этот градиент, однако, изменяется в очень широких пределах от места к месту. Кроме того, он правилен только для самых поверхностных частей земной коры. Если бы он сохранялся таким же вплоть до центра Земли, то во внутренних областях Земли температура была бы столь высока, что наша планета по-просту взорвалась бы. Сейчас нет сомнений в том, что с глубиной температура повышается все медленнее и медленнее. В нижней мантии и в ядре она повышается очень слабо и в центре Земли, видимо, не превышает  $4000^\circ$ .

Исходя из температурного градиента близ поверхности, а также из теплопроводности горных пород, можно вычислить, какое количество тепла притекает из глубины наружу. Оказывается, что каждую секунду Земля со всей своей поверхности теряет  $6 \cdot 10^{12}$  калорий. За последнее время было произведено довольно много измерений размера теплового потока Земли в разных местах — на материках и на дне океанов. Оказалось, что в среднем тепловой поток равен  $1,2 \cdot 10^{-6}$  кал/см<sup>2</sup> в секунду. В отдельных наиболее обычных случаях он колеблется между 0,5 и  $3 \cdot 10^{-6}$  кал/см<sup>2</sup> в секунду, причем нет каких-либо различий в выделении тепла на материках и в океане. Однако на этом равномерном фоне были обнаружены аномальные зоны — с очень высокой отдачей тепла, в 10 раз превышающей нормальный тепловой поток. Такими зонами являются подводные океанические хребты. Особенно много измерений было сделано на Восточно-Тихоокеанском хребте.

Эти наблюдения ставят перед геофизиками интересный вопрос. Сейчас вполне ясно, что источником тепла внутри Земли являются радиоактивные элементы. Они присутствуют во всех горных породах, во всем материале земного шара и при своем распаде выделяют тепло. Если учесть среднее содержание радиоактивных элементов в горных породах, принять, что содержание их в мантии равно содержанию их в каменных метеоритах, а содержание в ядре считать равным содержанию в железных метеоритах, то окажется, что общего количества радиоактивных

элементов более чем достаточно для образования наблюдаемого потока тепла. Но известно, что граниты содержат в среднем в 3 раза больше радиоактивных элементов, чем базальты, и соответственно должны больше вырабатывать тепла. Поскольку гранитный слой имеется в земной коре под материками и отсутствует под океанами, можно было бы предполагать, что поток тепла на материках должен быть больше, чем на дне океана. В действительности это не так, в общем поток везде одинаков, но на дне океанов имеются зоны с ненормально высоким тепловым потоком. В дальнейшем мы попытаемся объяснить эту аномалию.

Форма Земли, как известно,— шар, немного сплюснутый у полюсов. Благодаря сплюснутости радиус от центра Земли к полюсу на  $\frac{1}{300}$  долю короче радиуса, направленного от центра к экватору. Эта разница составляет примерно 21 км. На глобусе диаметром в 1 м она составит немного больше полутора миллиметров и практически незаметна. Было высчитано, что такую форму должен был бы принять жидкий шар, размером с Землю, вращающийся с той же скоростью. Это значит, что благодаря свойству ползучести, о чем мы говорили выше, материал Земли, подвергаемый очень длительному воздействию центробежной силы, деформировался и принял такую равновесную форму, которую (конечно, гораздо быстрее) приняла бы жидкость.

Интересна противоречивость свойств вещества Земли. Упругие колебания, вызванные землетрясениями, распространяются в нем как в очень твердом теле, а перед лицом длительно действующей центробежной силы то же вещество ведет себя как очень подвижная жидкость. Такая противоречивость обычна для многих тел: они оказываются твердыми, когда на них действует кратковременная сила, удар, подобный сейсмическому толчку, и становятся пластичными, когда сила воздействует на них медленно, исподволь. Об этом свойстве уже говорилось при описании смятия слоев твердых горных пород в складки. Впрочем, за последнее время появились данные, позволяющие думать, что вещество Земли приспособляется к действию центробежной силы с некоторым опозданием. Дело в том, что Земля постепенно замедляет свое вращение. Причиной этому служат морские приливы, вызываемые притяжением Луны. На поверхности Мирового океана всегда существуют две выпуклости, одна из которых обра-

щена к Луне, а другая — в противоположную сторону. Эти выпуклости перемещаются по поверхности в связи с вращением Земли. Но вследствие инерции и вязкости воды гребень выпуклости, обращенной к Луне, всегда немного

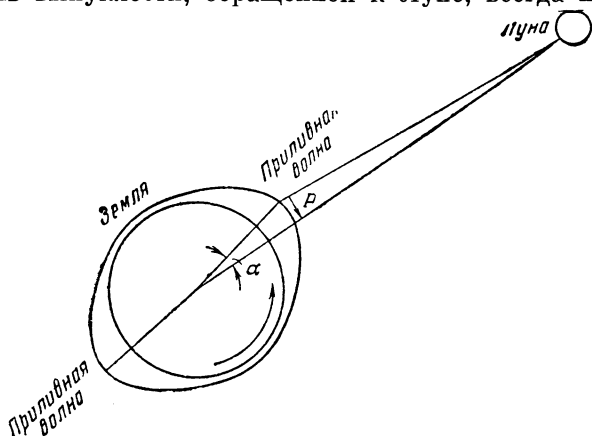


Рис. 31. Схема, показывающая, как Луна своим притяжением тормозит вращение Земли

Благодаря внутреннему течению в воде, гребень приливной волны направлен не прямо к Луне, а под углом  $\alpha$  к линии, соединяющей центр Земли с Луной. Смещение гребня происходит в направлении вращения Земли (показано большой стрелкой). Притяжение Луны, действующее на приливную волну, разлагается на вертикальную и горизонтальную ( $P$ ) составляющие; последняя направлена против вращения Земли и тормозит его

опаздывает, всегда немного смещен по направлению вращения Земли. Поэтому Луна притягивает волну не по перпендикуляру к земной поверхности, а по несколько наклонной линии. Вот этот наклон и приводит к тому, что притяжение Луны все время немного тормозит вращение Земли (рис. 31). Торможение это очень мало. Благодаря ему сутки увеличиваются на две тысячные доли секунды каждые 100 лет. Если такой темп замедления сохранялся в течение геологического времени неизменным, то в юрском периоде сутки были короче на один час, а два миллиарда лет назад — в конце архейской эры — Земля вращалась вдвое быстрее.

Вместе с замедлением вращения должна уменьшаться и центробежная сила; следовательно, должна изменяться форма Земли — постепенно уменьшаться ее сплюснутость.



Однако расчеты показывают, что наблюдаемая сейчас форма Земли отвечает не теперешней скорости ее вращения, а той, которая была приблизительно 10 млн. лет назад. Вещество Земли хотя и текуче в условиях длительных давлений, но обладает значительной вязкостью, большим внутренним трением и поэтому подчиняется новым механическим условиям с заметным опозданием.

В заключение укажем на некоторые интересные последствия землетрясений. Колебания, вызываемые обычными землетрясениями, имеют разные периоды. У некоторых землетрясений период короткий — около секунды. Регистрация таких колебаний крайне важна для изучения землетрясений, происшедших недалеко от сейсмической станции, т. е. землетрясений местных. С удалением от очага землетрясения такие колебания быстро затухают. Наоборот, колебания с длинным периодом (18—20 сек.) распространяются далеко; при землетрясении большой силы они могут пройти земной шар насквозь или обойти его по поверхности. Такие колебания регистрируются на многих сейсмических станциях и удобны для изучения далеких землетрясений. Именно с помощью длиннопериодных колебаний сейсмическая станция «Москва» может регистрировать землетрясения, происходящие в Южной Америке или на Филиппинах.

В последние годы были обнаружены колебания, вызванные землетрясениями, с очень длинным периодом, равным приблизительно часу. Сверхдлинные сейсмические волны были, например, образованы сильнейшим землетрясением в Чили в 1960 г. Такие волны, раньше чем угаснуть, обходят вокруг земного шара семь-восемь раз, а то и больше.

Расчеты показывают, что сверхдлинные волны вызывают колебаниями всего земного шара. Энергия некоторых землетрясений настолько велика, что они как бы раскачивают весь земной шар, заставляя его целиком пульсировать. Правда, амплитуда таких колебаний незначительна: вдали от очага землетрясения она может быть замечена только чувствительными приборами и полностью угасает в течение нескольких суток. Однако все же явление «дрожания» всей Земли в целом не может не производить впечатления. Общие колебания всей Земли оказались полезными для определения некоторых физических свойств земного шара.

## Как развивается земная кора?

В предыдущей главе мы говорили, что поверхность материков разделяется на платформы и геосинклинали, или складчатые зоны. При этом мы видели, что и платформы и геосинклинали могут быть разного возраста — более древние и более молодые. Геосинклинали — полосы большой подвижности земной коры. В них медленные колебания земной коры происходят с большим размахом — 10—12 км. Эти колебания чрезвычайно контрастны: рядом находятся очень тесно расположенные друг к другу сравнительно узкие (десятки километров в ширину) глубокие прогибы и высокие поднятия. Интенсивны в геосинклиналях и другие процессы, связанные с проявлением внутренних сил: смятие слоев в складки, образование разломов, внедрение и извержение магмы.

Платформы, напротив, представляют собой участки слабых движений земной коры. Медленные колебания коры, ее поднятия и опускания происходят здесь с небольшим размахом — обычно не более 2—3 км вверх и вниз (хотя местами отдельные прогибы достигают большей глубины). Области, медленно поднимающиеся и опускающиеся, имеют поперечник в сотни и даже тысячи километров. Примером медленно поднимающейся области является Балтийский щит, охватывающий Карелию, Кольский полуостров, Финляндию и Швецию. Пример опускающейся области — Подмосковский бассейн, занимающий всю центральную часть Русской платформы. Слабой на платформах была складчатость, мало проявлялась магматическая деятельность.

Большой размах колебаний земной коры в геосинклиналях является причиной возникновения в них резко расчлененного рельефа: геосинклинали — это места образо-

вания глубоких морских впадин и высоких горных хребтов. Впадины и хребты чередуются не только на площади геосинклиналей, но и во времени: где раньше были морские впадины, позже вырастают хребты и, наоборот, хребты опускаются и превращаются в морские бассейны.

Почти все горы на земном шаре образовались в разное время в подвижных зонах (геосинклиналях) и поднялись из глубоких морских впадин, когда-то существовавших на их месте. Моря в свое время существовали на месте Урала, Кавказа, Карпат, Альп и других горных областей. Спокойный характер движений земной коры на платформах приводит к тому, что рельеф платформ представляет собой невысокую равнинную сушу, которая может частично заливаться морем, но морем мелким, с плоским дном и плоскими берегами.

Изучение истории земной коры показывает, что расположение геосинклиналей и платформ с течением времени изменялось.

Есть основания предполагать, что в древнейшие — архейские времена платформ либо не было вовсе, либо они были очень малы и неустойчивы. Вся та часть поверхности Земли, которая сейчас занята материками, была чрезвычайно подвижной; повсеместно происходили сильные колебания земной коры, слои сминались в складки, пронизывались магмой и подвергались метаморфизации. Вся поверхность Земли была изборозжена глубокими морскими впадинами и горными хребтами. В частности, древние горы существовали и на месте Русской равнины, но потом были полностью размыты.

В середине протерозойской эры, приблизительно полтора миллиарда лет назад стали появляться крупные платформы. С течением времени они увеличивались в размерах за счет геосинклиналей или, другими словами, последние постепенно превращались в платформы. Шел, следовательно, процесс постепенного успокоения движений земной коры. Но тектонические движения ослабевали не одновременно повсюду, а сначала в одном месте, потом в другом. Когда в каком-нибудь месте геосинклиналь превращалась в платформу, это означало, что горы переставали подниматься и быстро размывались до основания, впадины переставали прогибаться и быстро заносились осадками. Горная страна превращалась в равнину, а глубокие морские впадины — в мелкое море.

Увеличение платформ за счет геосинклиналей отражает основное направление эволюции земной коры, хотя в отдельных случаях и наблюдалось частичное «разрушение» платформ с новым усилением их подвижности.

Чрезвычайно интересно, что расширение платформ и сокращение геосинклиналей шло как бы отдельными толчками, с перерывами между ними. Некоторое время расположение и размеры геосинклиналей и платформ на поверхности Земли сохранялись более или менее неизменными. Затем наступало время, когда платформы быстро увеличивали свои размеры в результате присоединения к ним новых участков за счет геосинклиналей, а размеры последних соответственно сокращались. И снова соотношения между платформами и геосинклиналями сохранялись в течение определенного времени, а затем происходило новое быстрое приращение платформ и т. д.

Таким образом, история геосинклиналей и платформ на поверхности материков распадается на ряд этапов, которые называются «тектоническими циклами». Средняя продолжительность каждого такого цикла около 200 млн. лет. Лучше всего изучены циклы от начала палеозойской эры до нынешнего времени. Обычно выделяют три цикла: *каледонский*, *герцинский* и *альпийский* (так же как были названы выше и приуроченные к ним эпохи складкообразования). Каледонский цикл, начавшийся около 600 млн. лет назад, обнимает кембрийский, ордовикский и силурийский геологические периоды; герцинский цикл, начавшийся около 400 млн. лет назад, охватывает девонский, каменноугольный и пермский периоды; альпийский цикл начался около 200 млн. лет назад и обнимает мезозойскую и кайнозойскую эры. Он продолжается до сих пор.

Некоторые исследователи предпочитают разделять историю земной коры не на эти, наиболее крупные тектонические циклы, продолжительностью в 200 млн. лет каждый, а на большее число более коротких циклов. Например, после герцинского цикла выделяют иногда не один альпийский цикл, а два: мезозойский и собственно альпийский, или кайнозойский. Несомненно, много тектонических циклов было в допалеозойские времена — в протерозое и архее. Но они пока еще плохо известны из-за трудностей изучения истории этих отдаленных от нас эпох. Больше других известен последний из допалеозойских циклов — так называемый байкальский, наилучшим

образом выраженный в районе озера Байкал. Он начался в конце протерозоя (в рифее) и закончился в кембрийском периоде, когда в других местах уже начинался каледонский цикл.

Если продолжительность крупных циклов сохранялась приблизительно одинаковой в течение всей истории Земли, то в архейские и протерозойские времена должно было пройти около 20 тектонических циклов. Поскольку нам более или менее хорошо известны лишь три-четыре последних цикла, становится ясной ограниченность наших сведений об истории земной коры. Нам приходится делать выводы о закономерностях ее развития, исходя из данных, относящихся к периоду, охватывающему лишь 10—15% общего возраста земной коры.

История платформ и геосинклиналей показана на рис. 26, где обозначены платформы и геосинклинали разного возраста. Русская платформа, например, очень древняя: она существовала уже к началу каледонского цикла; тогда она со всех сторон была окружена подвижными зонами — геосинклиналями. Последние охватывали почти всю остальную Европу. После силурийского периода, когда кончился каледонский тектонический цикл, Русская платформа увеличилась в размерах: к ней присоединились территории, занятые сейчас Скандинавскими горами и Англией. Но во всей остальной Европе продолжала существовать геосинклиналь, и земная кора сохраняла свою подвижность.

Еще позже, в начале мезозойской эры, к платформе присоединились территории Германии, почти всей Франции и Испании. Геосинклиналь же сохранилась в областях, примыкающих к Средиземному морю: на юге Испании, в Италии, Альпах, Карпатах, на Балканском полуострове, в Малой Азии, Крыму, на Кавказе. Во всех этих местах земная кора до сих пор очень подвижна, что выражается, например, в происходящих там землетрясениях.

Аналогичным образом от одного тектонического цикла к другому увеличивали свои размеры платформы и на других материках.

История земной коры, как она запечатлелась в горных породах, позволяет установить, что в течение каждого цикла была некоторая правильная последовательность событий. Каждый цикл, и в геосинклиналях, и на платформе, начинался с того, что процесс прогибания земной коры

преобладал. Поэтому в течение первой половины цикла моря увеличивали свои размеры за счет суши. Высоких гор в это время не было; геосинклинали представляли собой архипелаги небольших островов, где широкие морские проливы чередовались с узкими островными грядами. На платформах плоские участки суши омывались обширными мелкими морями. Подводные вулканы в геосинклиналях изливали лаву прямо на морское дно; застывшие лавовые потоки чередовались здесь со слоями морских осадочных пород, среди которых сначала преобладали глины и пески, а потом, когда суша сильно сократилась и с нее стало смываться мало глинистых и песчаных частиц, — известняки или кремнистые породы. На Земле устанавливался морской влажный климат с небольшими сезонными колебаниями температуры.

Во второй половине цикла, напротив, главную роль играли поднятия земной коры. В геосинклиналях вырастали высокие горные хребты, и море постепенно почти совсем уходило с их территории. Поднятие гор сопровождалось внедрением в земную кору гранитов и других магматических пород, а также смятием слоев в складки.

Поднимались в это время и платформы в виде больших плоских участков суши, отесняя моря. В последних, особенно в геосинклинальных морях, откладывались преимущественно грубообломочные породы — пески, галечники, образовавшиеся за счет размыва поднимавшихся гор. Климат становился континентальным, с резкими сезонными колебаниями температуры; высокие горы, покрытые снегом и ледниками, способствовали охлаждению атмосферы, что приводило к большим оледенениям. В частности, последний ледниковый период, относящийся к четвертичному периоду, когда вся северная половина Русской равнины оказалась под сплошным покровом льда, как раз следовал за поднятием во многих районах за пределами равнины высоких горных хребтов в конце альпийского тектонического цикла. Такие же оледенения случались и раньше, хотя проявлялись они в других областях. Например, большое оледенение было на Земле в конце герцинского тектонического цикла — в каменноугольном и пермском периодах. Проявилось оно главным образом в Южном полушарии — в Австралии, Африке, Южной Америке, а также в Индии. Большое оледенение было на Земле в самом конце протерозойской эры, когда кончался

байкальский тектонический цикл, предшествовавший каледонскому.

Эти примеры показывают, что существовала связь между ледниковыми периодами на поверхности Земли и движениями земной коры. Периодичность последних, выражавшаяся в том, что высокие горы и большие участки суши не всегда существовали, а появлялись в конце каждого очередного тектонического цикла, приводила и к периодической повторяемости ледниковых периодов.

Периодичность движений земной коры, ее опусканий и поднятий, представляет собой замечательное явление. Это как бы медленное дыхание планеты. Оно происходило на фоне постепенного, от цикла к циклу, разрастания платформ за счет геосинклиналей. Мы наблюдаем развитие как бы по спирали: циклические изменения накладываются на поступательный ход эволюции.

Сокращение геосинклиналей и увеличение размеров платформ свидетельствует об общем успокоении движения земной коры с течением времени. Отсюда, казалось бы, можно сделать вывод, что все развитие земной коры направлено в сторону постепенного угасания всякой активности — и тектонической, и магматической.

Такой вывод был бы, однако, неправильным. В самое последнее геологическое время (в неогеновом периоде) некоторые районы платформ, даже древних, вдруг снова оживились и в них опять стали происходить очень сильные движения земной коры.

Примером этому является Тянь-Шань. Северный Тянь-Шань уже после каледонского цикла, а Южный Тянь-Шань после герцинского цикла превратились в платформу и движения земной коры в этих районах стали быстро успокаиваться. Но в начале неогенового периода, приблизительно 25 млн. лет назад, движения коры вдруг стали снова очень сильными: они выразились в интенсивных поднятиях и прогибаниях. Размах этих вертикальных движений с тех пор достиг десяти километров и, несмотря на быстрый размыв хребтов и заполнение впадин осадками, привел к образованию того рассеченного высокогорного рельефа, который характерен для Тянь-Шаня. Интересно, что до нового оживления или, как говорят, до *тектонической активизации*, история Тянь-Шаня была сходной с историей Центрального Казахстана. Эти две области развивались почти одинаково в течение каледонского и

герцинского циклов, а также в течение мезозойской эры и палеогенового периода. В неогеновом периоде Тянь-Шань подвергся тектонической активизации, а Центральный Казахстан нет. В результате этого сейчас между указанными областями наблюдается большое различие: в Тянь-Шане высочайшие хребты чередуются с глубокими депрессиями, в Центральном Казахстане — низкий пологий мелкосопочник.

А вот другой пример тектонической активизации. Мы уже видели (см. рис. 26), что почти вся Африка представляет собой древнюю платформу. В течение палеозойской и мезозойской эр земная кора в Африке вела себя очень спокойно. Но в конце мезозойской эры в Восточной Африке образовалось обширное высокое вздутие земной коры. Оно протягивалось от Сирии на севере через район Красного моря, Эфиопию, Кению, Уганду, Танганьiku, Мозамбик вплоть до устья р. Замбези. В палеогеновом периоде вдоль всей этой огромной выпуклости земной коры образовались глубокие трещины и по ним осели длинные полосы земной коры. Образовались Большие грабены Восточной Африки; общая их длина превышает 6000 км. Такими тектоническими провалами — грабенами являются: впадина Мертвого моря, расположенного, как известно, на 400 м ниже уровня Мирового океана; Красное море с Аденским заливом; озера Эфиопии — Звай, Абая, Чамо и др.; восточная озерная долина Восточной Африки с озерами Рудольф, Натрон, Эяси, западная озерная долина с озерами Альберт, Эдуард, Киву, Танганьика, впадина озера Ньяса (рис. 32). Вдоль трещин изливалась базальтовая лава. И сейчас здесь существуют действующие вулканы, большинство которых расположено около оз. Киву. Эта грандиозная Восточно-Африканская система разломов представляет собой интереснейшее явление на поверхности Земли. Оно показывает, что Африканская древняя платформа подверглась оживлению, хотя и в иной форме, чем Тянь-Шань.

Сходные явления, хотя и меньшего масштаба, наблюдаются в районе озера Байкал. Там тоже в конце мезозойской эры образовалась большая выпуклость земной коры, которую в палеогеновом периоде рассекли трещины, и по ним полосы земной коры осели, что привело, в частности, к образованию самого Байкала. И в этом случае вдоль трещин сохранились следы излияний базальтовой лавы.



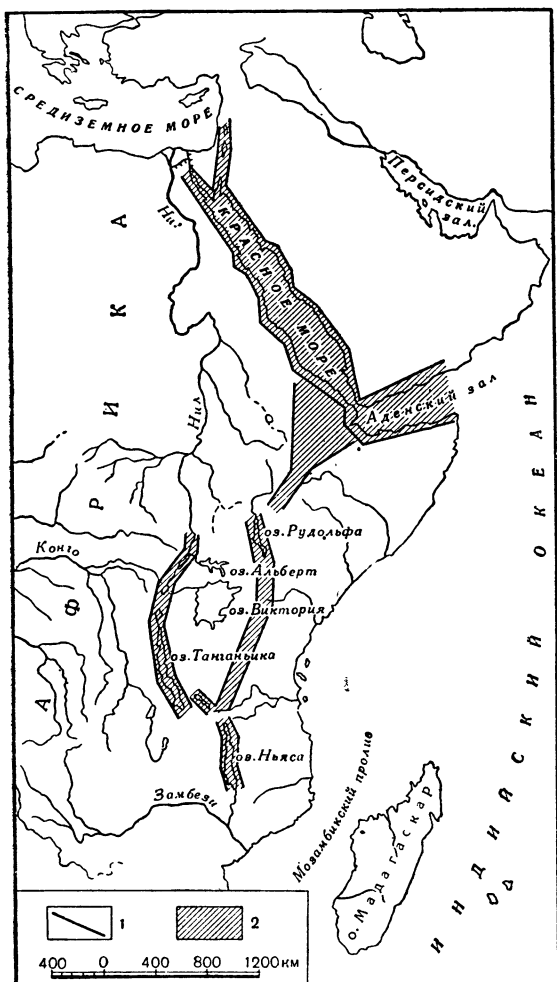


Рис. 32. Восточно-Африканские грабены  
**1** — сбросы, **2** — опущенные по сбросам участки земной коры

Можно предполагать, что к явлению тектонической активизации относится и огромное поднятие плато Тибета.

Важнейшим и в то же время наиболее трудным вопросом современной науки о Земле является вопрос об истории материков и океанов. Здесь существуют разные взгляды.

Некоторые ученые думают, что расчленение земной поверхности на материки и океаны произошло на самой ранней стадии жизни нашей планеты и с тех пор сохранялось почти неизменным. Другие считают, что океаны раньше были значительно большими и что с течением времени они уменьшаются, а материки растут. Третьи полагают, что, наоборот, океаны разрастаются за счет материков, которые постепенно обрушаются.

Хотя этот вопрос нельзя считать решенным, есть все же основания думать, что последняя точка зрения, во всяком случае для сравнительно недалекого от нас геологического прошлого, наиболее близка к истине.

На дне современных океанов, в наиболее глубоких частях их, накапливаются осадки особого характера, среди которых наиболее типична так называемая глубоководная красная глина. Таких осадков не было найдено нигде среди осадочных пород, находящихся сейчас на материках. Поэтому весьма сомнительно, чтобы когда-нибудь на месте современных материков существовали глубокие океанические впадины. С другой стороны, есть много данных, указывающих, что суша существовала раньше во многих местах, где теперь катятся волны океана. На это указывает прежде всего то, что строение материков обрезано береговыми линиями. Отдельные тектонические зоны материков (платформенные поднятия и прогибы, складчатые зоны разного возраста и т. п.) не затухают у берега океана, а явно обрезаются берегом; видно, что многие тектонические зоны материков, несомненно, раньше продолжались на какое-то расстояние в пределы теперешнего океана. Такая «оборванность» особенно характерна для южных материков — Африки, Австралии, Южной Америки. Обрезана южная оконечность Азиатского материка в Индии, а также Европы на значительном протяжении атлантического побережья. Тектонические зоны Евразии на севере упираются в Северный Ледовитый океан так, как будто они по его краю обрезаны ножницами (см. рис. 26).

Отсюда создается впечатление, что современные материки представляют собой обломки прежних более обширных материков. Во многих случаях по распространению горных пород и древней фауны и флоры можно установить, что раньше между некоторыми материками существовали сухопутные связи, сейчас отсутствующие. Так, в конце палеозойской эры одна и та же наземная флора населяла Южную Америку, Африку, Индию, Австралию и Антарктику. При теперешнем положении это было бы невозможно. В то время между указанными материками должны были существовать «мосты», по которым растения могли мигрировать. Аналогичные соображения приводят к выводу, что еще в палеогене, а может быть, частично и в неогене острова Индонезии составляли единый материковый массив; соединяясь между собой, они соединялись и с Азиатским материком. Япония тогда представляла собой неотъемлемую часть того же материка, а на месте Охотского и Японского морей существовала суша. Следует думать, что такие моря, как Берингово, Охотское, Японское, Восточно-Китайское и Южно-Китайское, образовались совсем недавно — в неогене и даже частично в четвертичное время.

В самих океанах существуют особенности строения дна, указывающие на недавнее значительное их углубление. Во всех океанах на дне известны так называемые *гйоты* — высокие конические горы с усеченными плоскими вершинами. Горы эти являются потухшими вулканами и первоначально они были, конечно, коническими. Вершины их могли стать усеченными только в результате разрушающего действия морского прибоя. Следовательно, первоначально усеченная поверхность гйотов должна была находиться на уровне моря или весьма близко к нему. Сейчас же вершины гйотов опущены на сотни метров и даже на несколько километров под уровень океана. Например, гйоты в центральной части Тихого океана опущены на глубину 2,5 км. Это значит, что со времени образования подводных вулканов дно под ними опустилось на 2,5 км. Когда это опускание началось? На вершинах некоторых гйотов были обнаружены породы с окаменелыми организмами, жившими в очень мелкой воде (кораллы, водоросли, толстостенные раковины, приспособленные к тому, чтобы выдерживать удары прибоя). Возраст этих организмов везде оказался не древнее мелового пе-

риода. Таким образом, погружение центральной части Тихого океана началось в меловом периоде и с тех пор достигло 2,5 км.

С этой точки зрения очень интересны результаты бурения скважин на одном из островов Маршалльской группы в Тихом океане. Поверхность этого острова образована

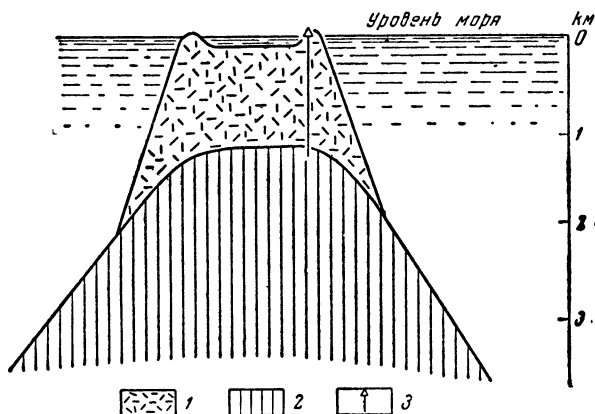


Рис. 33. Разрез через коралловый остров

1 — коралловый риф, образовавшийся по мере погружения дна океана; 2 — древний подводный вулкан, сложенный базальтом; 3 — буровая скважина

коралловым рифом. Скважины углубились в него более чем на 1200 м. На всей этой глубине они проходили через слежавшееся нагромождение известковых скелетов кораллов. Под кораллами была встречена вулканическая порода — базальт. Она образует вершину подводного вулкана, на котором и выросла коралловая постройка (рис. 33). Но известно, что кораллы могут жить только на глубине не больше 30 метров. Если сейчас скелеты кораллов оказались на глубине 1200 м, то это могло произойти только в результате последующего опускания земной коры: по мере того, как она опускалась, старые кораллы погружались все глубже, а на их обломках селились и росли все новые и новые колонии кораллов, как бы догонявших уходившую вверх поверхность океана. По облику кораллов можно установить, что их рост и, следовательно, прогибание

земной коры продолжались в течение палеогенового, неогенового и четвертичного периодов.

Суммируя все подобные данные, можно высказать предположение, что глубокие океаны образовались на поверхности Земли в начале мезозойской эры, или около 200 млн. лет назад. С тех пор они становились глубже и

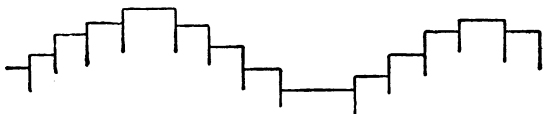


Рис. 34. Ступенчатое строение склонов поднятий и прогибов земной коры, вызванное ее глыбовым строением

больше, отвоевывая мало-помалу пространство от материков, которые с краев постепенно «обрушались». Раньше, до мезозойской эры, на месте океанов могли существовать мелкие моря. Конечно, увеличение глубины и площади океанов требовало увеличения объема океанической воды. О происхождении последней мы будем говорить позже.

Необходимо остановиться еще на одной чрезвычайно важной особенности развития земной коры. Как показывают многие данные, земная кора не представляет собой цельного тела. Глубокими разрывами, которые получили название «глубинных разломов», она разделена на огромное количество глыб разных размеров и форм. Поднимаясь и опускаясь при колебательных движениях земной коры, эти глыбы ведут себя как льдины на волнах. Благодаря такой «глыбовости» земной коры, склоны тектонических поднятий и прогибов не являются гладкими: они ступенчаты, так как каждая глыба, поднимаясь или опускаясь, остается горизонтальной или наклоняется лишь немного (рис. 34).

Границы между глыбами представляют собой ослабленные «швы» внутри земной коры. Поэтому когда глубинные процессы, о которых мы будем говорить дальше, вызывают поднятие или опускание какого-либо участка коры, форма этого участка в значительной степени подчиняется сетке глубинных разломов. Границы хребтов и морей следуют глубинным разломам. Целые тектонические

зоны приобретают определенную ориентировку, подчиняясь направлению глубинных разломов. Например, если посмотреть на тектоническую или геологическую карту, то можно видеть, что на огромном пространстве от Байкала до Италии почти все хребты вытянуты в одном, северо-западном направлении: Восточный и Западный Саян,

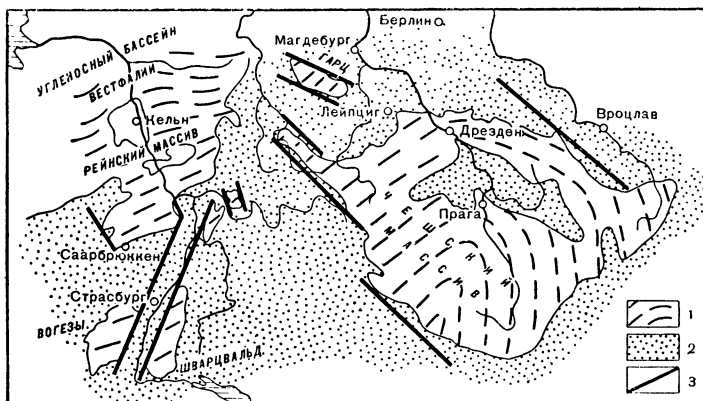


Рис. 35. Древние складки и молодые разломы в Западной Европе  
1 — направление складок, образовавшихся в конце палеозойской эры; 2 — области, где древние складки не видны, так как они покрыты более молодыми (мезозойскими) породами; 3 — разломы, образовавшиеся в начале мезозойской эры

Алтай, Чингиз, Ферганский, Кара-Тау, Копет-Даг, Эльбурс, Кавказ, Балканы, Восточные Карпаты, Динариды, Апеннины. И лишь незначительное число хребтов в этой полосе не подчиняется указанной закономерности (Северный и Южный Тянь-Шань, хребты Турции и, конечно, Урал, хотя в полярной его части снова появляется северо-западное направление).

Следует думать, что такая правильность не случайна. Вероятно, на этом отрезке земная кора была пронизана глубинными разломами северо-западного направления, вдоль которых и происходили поднятия и прогибы земной коры.

В некоторых местах можно установить, что глубинные разломы того или иного направления не всегда существо-

вали, а возникали на каком-либо этапе развития земной коры. Например, в Западной Европе поднятия и прогибы, развивавшиеся в герцинском тектоническом цикле, т. е. в палеозое, имели дугообразную форму. А поднятия и прогибы альпийского тектонического цикла, развивавшиеся в течение мезозоя и кайнозоя, были вытянуты в северо-западном направлении, явно подчиняясь глубинным разломам, возникшим здесь при переходе от герцинского тектонического цикла к альпийскому (рис. 35).

Разделение земной коры глубинными разломами на глыбы играет очень большую роль во всех внутренних геологических процессах.

## Почему слон сминаются в складки?

Если присмотреться к процессам, происходящим внутри земной коры, то их можно разделить на две категории. Одни из них вызываются причинами, находящимися заведомо на большой глубине, во многих случаях — глубоже земной коры. Таковы магматические явления — излияние расплавленной магмы на поверхность или подъем ее в верхние слои коры. Таковы же поднятия и опускания больших участков земной коры. Если поднимающийся или прогибающийся участок имеет в поперечнике несколько сотен, а то и больше тысячи километров, то весьма вероятно, что причина, вызывающая такое движение коры, должна находиться где-то на большой глубине, также измеряемой сотнями километров.

Другие процессы могут быть причислены к разряду поверхностных — они полностью разворачиваются в верхних слоях земной коры, их проникновение в глубину ограничивается несколькими километрами или, скажем, пятнадцатью — двадцатью километрами. Как показывают последние исследования, к этому разряду поверхностных процессов относится смятие слоев горных пород в складки. Хотя, как мы увидим, смятие слоев в складки находится в зависимости от глубинных процессов, непосредственно оно выражается в деформации пород в пределах двух верхних десятков километров.

В этой главе мы будем говорить о смятии слоев в складки; возможные причины более глубинных процессов рассмотрены в следующей главе.

Первые научные попытки объяснить смятие слоев горных пород в складки тесно связаны с гипотезой сжатия земного шара и сморщивания его коры при этом сжатии. В следующей главе мы увидим, что эта гипотеза уже



не отвечает современным научным данным: земной шар не сжимается, во всяком случае не сжимается так, как это предполагала указанная гипотеза. Интересно, что и наблюдения над самой складчатостью показывают неправильность этой гипотезы. Дело в том, что раньше, когда только начинали изучать складки, все они представлялись едиными в своем происхождении: они казались результатом сморщивания слоев при сокращении земной поверхности. Между тем в последние десятилетия было установлено, что существуют разные типы складок и что эти разные типы, несомненно, имеют и разное происхождение.

Об основных двух типах складок уже говорилось в главе 4. Только линейная, или полная, складчатость, характерная для складчатых зон, могла бы быть в принципе объяснена горизонтальным сжатием земной коры. Куполовидная, или прерывистая, складчатость, широко развитая на платформах и на окраинах складчатых зон, не может быть объяснена таким образом: горизонтальным сжатием земной коры никак нельзя объяснить образование изолированных куполовидных вспучиваний слоев в отдельных точках среди обширной территории, в пределах которой слои в общем лежат почти горизонтально.

В свете новейших исследований явление складчатости оказалось еще более сложным. Специальные исследования, организованные в ряде складчатых областей Советского Союза и в некоторых зарубежных странах, привели к выделению уже не двух, а четырех типов складок, различающихся способом своего образования. Больше того, в линейном типе складок были обнаружены такие особенности, которые заставили думать, что даже этот тип не мог быть образован общим сокращением всей поверхности земного шара или ее крупных участков. Хотя эти складки и связаны с горизонтальным сжатием в земной коре, но сжатие это имеет местный характер и вызвано местными, а не общими для Земли процессами.

Наиболее простая разновидность складок была названа *глыбовой складчатостью*. Ее образование непосредственно связано с вертикальным поднятием отдельных глыб земной коры. Такие глыбы на некоторой глубине (например, в относительно твердых породах кристаллического фундамента платформы) ограничены вертикальными разрывами. Но в более пластичных осадочных породах, покрывающих этот фундамент, поднятие глыбы может при-

вести только к изгибанию слоев вверх и к образованию в них куполов или валов.

Для этого типа характерна сундучная или коробчатая форма складок. Нередко они бывают асимметричными: одно крыло крутое, другое пологое (см. рис. 28). При большой толщине покрывающих пластичных пород форма изгиба слоев постепенно переходит от сундучной в глубине к пологой, куполовидной или валообразной наверху. Так, очень пологие валы и купола в восточных нефтяных районах Русской платформы, с углами наклона слоев всего  $1-2^\circ$ , по своему происхождению являются глыбовыми и связаны на глубине с поднятием блоков земной коры по разрывам. Глыбовые складки широко распространены на платформах. Однако есть основания думать, что они встречаются во множестве и в геосинклиналях, хотя там они не всегда наблюдаются в «чистом» виде: часто они усложнены другими разновидностями складок.

Следующий тип складок — *складки нагнетания*. К ним относятся те диапировые складки, о которых уже шла речь в главе 4. Если среди мощной толщи осадочных пород залегают свита особенно пластичных пород (соль, гипс, глина и др.), то при некоторых условиях она может прийти в движение. При этом пластичный материал оттекает из одних мест и, переместившись на некоторое расстояние в горизонтальном направлении, нагнетается в другие места. В первом случае толщина пластичной свиты уменьшается, свита расплющивается, во втором — наоборот, происходит ее раздувание и толщина ее увеличивается. Форма раздува может быть различна: линзовидная, куполовидная, валообразная. В других случаях пластичный материал собирается в виде колонны высотой в несколько километров при диаметре в сотни метров и образуется диапировая складка (см. рис. 29). Форма, которую принимает пластичная масса, в значительной степени зависит от разрывов в вышележащей толще, которыми пластичный материал может воспользоваться как путями для своего движения. Сама вышележащая толща изгибается вверх либо в виде купола, либо в форме вытянутого вала. Приподнимаясь, она растягивается и раскалывается.

Каковы же причины подземного горизонтального перетекания пластичных пород с образованием ядер нагнетания и протыкания? Общая причина — потеря равновесия в осадочной толще. Равновесие теряется, если, например,

удельный вес пластичной серии меньше удельного веса тех пород, которые лежат выше. В этом случае, о котором уже говорилось в главе 4, легкие пластичные породы выжимаются в некоторых местах вверх.

Выжимание пластичных пород может осуществиться и при равенстве их удельного веса с покрывающими породами, если поверхностная нагрузка на пластичные породы неравномерна по другой причине. Такая неравномерность может возникнуть при пересеченном рельефе местности. В этом случае пластичные породы под возвышенностями несут на себе большую нагрузку, чем под впадинами рельефа, и это создает условия для выжимания пластичного материала из-под возвышенностей в долины. Неравномерность нагрузки может быть вызвана и просто наличием разрывов в породах, покрывающих пластичную толщу. Тектонический разрыв, особенно крупный и сложный, состоящий из серии параллельных мелких разрывов, служит причиной понижения давления на глубине, поскольку каждый разрыв является в какой-то мере щелью в вышележащих породах. Если разрыв проникает вниз до поверхности пластичной свиты, то материал последней как бы подсасывается к разрыву, внедряется в него и поднимается по нему вверх, приподнимая и раздвигая окрестные слои. При этом вес покрывающих пород должен быть достаточным, чтобы вызвать течение в пластичной толще. Условия, когда складки нагнетания связаны с разрывами в вышележащих породах, наиболее распространены в природе.

Выше говорилось, что крупные поднятия и прогибы земной коры, вызванные ее колебательными движениями, это не простые плавные изгибы, а ступенчатые — вследствие глыбового строения коры. Каждая ступень отделяется от другой разрывом или резким перегибом слоев. Такие разрывы или перегибы между ступенями — излюбленное место для образования над ними складок нагнетания путем выжимания пластичного материала (рис. 36).

Складки нагнетания очень широко распространены в природе. Особенно много их в предгорьях складчатых хребтов, а также в наиболее глубоких прогибах на платформах.

К складкам нагнетания по условиям своего образования близки складки *глубинного*, или *метаморфического* типа.

Давно было замечено, что характерной особенностью строения относительно глубоких зон земной коры, которые можно наблюдать на кристаллических щитах, например, в Карелии или Финляндии, являются огромные гранитные купола и валы, поднявшиеся сквозь окружающие метаморфические породы. По своей форме и в некоторой мере по способу своего образования такие купола аналогичны соляным диапировым куполам, но значительно крупнее их и образуются на значительно большей глубине. Как сейчас принимается геологами, «свежий» гранит образуется либо путем переплавления ранее возникшего гранита, либо путем «гранитизации», т. е. превращения в гранит различных осадочных и метаморфических горных пород. Под влиянием нагревания осадочные породы понемногу плавятся и перекристаллизовываются на месте. В результате из них получается гранит.

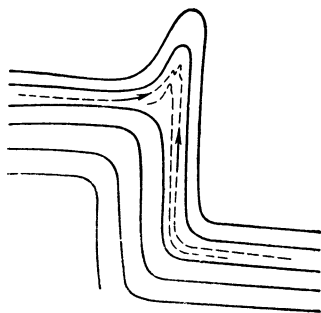


Рис. 36. Складка нагнетания, образовавшаяся над ступенеобразным изгибом слоев. Вертикальный разрез  
Стрелки показывают направление нагнетания

При этом в «старые» граниты или в гранитизируемые породы просачиваются из глубины горячие растворы, пары и газы. Большое количество паров и газов образуется и в самих расплавляемых или гранитизируемых породах. Пропитывание пород летучими компонентами приводит к понижению их плотности. Поэтому «свежий» гранит, не успевший окончательно затвердеть, еще пропитанный летучими веществами, имеет меньший удельный вес, чем покрывающие его «сухие» метаморфические и осадочные породы. Это и заставляет «свежий» гранит всплывать и образовывать выступы и купола.

Гранитные купола приподнимают вышележащие метаморфические сланцы и изгибают их. Раздаваясь в стороны, гранитные купола давят на сланцы, находящиеся между куполами и залегающие круто или вертикально, и сжимают их. В участках, сдавленных сильнее, слои расплющиваются, выжимаются отсюда и их материал нагнетается в более «свободные» пространства между куполами, где

они скапливаются и изгибаются в мелкие, очень сложные и неправильные складки (см. рис. 27).

Гранитные купола нередко имеют сложную форму. Они приобретают грибообразный вид, от них отделяются в стороны «козырьки» (рис. 37). Такие усложнения вызваны тем, что при своем поднятии гранитные купола преодолевают сопротивление вышележащих толщ и растекаются под ними в стороны.

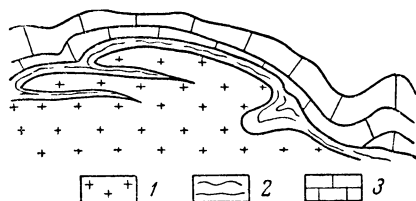


Рис. 37. Сложная форма гранитного купола

1 — гранит, 2 — метаморфические породы, 3 — осадочные породы

Породы, окружающие гранитные купола (чаще всего это бывают метаморфические сланцы), во время гранитизации тоже пропитываются летучими компонентами и становятся легче. Поэтому и они, подобно гранитам, стремятся вверх сквозь покрывающие их менее метаморфизованные породы. Используя разломы в этих верхних слоях, они внедряются в покрывающие породы, приподнимают их и раздвигают в стороны. При этом сами метаморфические сланцы сминаются в мелкие, тесно сжатые складки. Глубинная складчатость наблюдается не только на древних кристаллических щитах, но и в глубине более молодых складчатых зон.

Наконец, последний тип складок может быть назван *складками смятия*. Это — та линейная или полная складчатость, которая наблюдается в складчатых зонах. Раньше предполагалось, что в последних бывает складчатость только этого типа. В действительности же оказалось, что в складчатых зонах значительно большие площади заняты складчатостью глыбовой, нагнетания и глубинной. Складчатость смятия образует лишь узкие зоны в тех частях, где наиболее тесно соприкасаются максимальные поднятия и максимальные прогибы. Например, на Кавказе складчатость смятия встречается почти исключительно вдоль юж-

ного склона Главного хребта. На остальной территории и Большого и Малого Кавказа развита складчатость других типов.

Складчатость смятия образуется в результате горизонтального сжатия некоторого участка земной коры. Однако горизонтальные силы сжатия — местные и не имеют ничего общего с предполагавшимся ранее сжатием всей земной коры или хотя бы крупных ее участков.

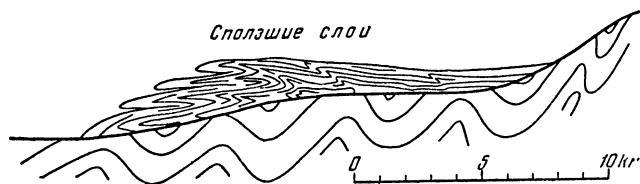


Рис. 38. Складки, образовавшиеся в результате сползания пластических горных пород со склона

Изучение строения складчатых зон позволяет установить ряд конкретных причин, вызывающих местное горизонтальное сжатие, при котором образуются складки смятия. Эти причины связаны с некоторыми характерными особенностями развития геосинклинали. Наиболее простой способ возникновения горизонтального сжатия — гравитационное оплывание или соскальзывание пород по склонам поднятий, образующихся в геосинклиналях. Очень пластичные породы (например, глины) могут медленно стекать в виде оплывин по склонам возвышенностей, образующихся в геосинклиналях. Глины увлекают с собой и другие породы. Встречая препятствия, нагромождаясь внизу склона, слои изгибаются в складки смятия. При этом образуются не только складки, но и так называемые «тектонические покровы» или «шарьяжи» — смятые в складки пластины пород, соскользнувшие со своего места и переместившиеся вниз по склону иногда на несколько десятков километров (рис. 38). Интересно, что пластичные, насыщенные водой осадочные породы могут всплывать под влиянием сил тяжести по склонам, угол наклона которых едва больше  $1^\circ$ .

Другой способ возникновения местного горизонтального сжатия связан с глыбовым строением земной коры. Каждая ступень на крыльях тектонического поднятия в

геосинклинали образована отдельной глыбой земной коры, поднятой над той, которая расположена ниже по склону, и опущенной относительно той, которая расположена выше. Оказывается, что относительно приподнятая глыба

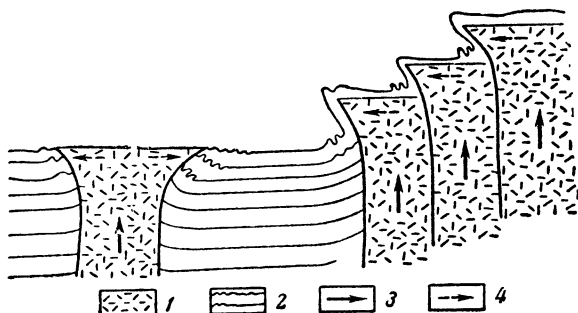


Рис. 39. Образование складок под влиянием расползания вершечек поднятых глыб земной коры

1 — породы поднимающихся глыб, 2 — слоистые осадочные горные породы, 3 — направление поднятия глыбы, 4 — направление давления расползающейся вершечки глыбы на окружающие слои

стремится под влиянием силы тяжести расползаться в своей верхней части в сторону соседней опущенной глыбы. В случае ступенчатого расположения глыб, все глыбы расползаются в своей верхней части в одну сторону — вниз по общему склону, — опрокидываясь последовательно друг на друга. Если же глыба поднялась изолированно и возвышается над обеими соседними глыбами, расположенными по обе стороны, то она расползается веерообразно, в обе стороны (рис. 39). Верхняя, расползающаяся часть приподнятой глыбы давит в горизонтальном направлении на слои, лежащие на поверхности соседней, относительно опущенной глыбы, и сминает их в складки.

Наконец, еще один способ смятия слоев связан с раздвигающим действием на вышележащие слои складок нагнетания и глубинных складок. При своем внедрении ядро нагнетания раздвигает окружающие толщи и вокруг него могут образоваться складки смятия (рис. 40). Аналогичным образом проявляет себя и нагнетание, связанное с глубинной, или метаморфической складчатостью. Когда гранитизируемая или метаморфизуемая масса всплывает,

внедряясь в покрывающие породы, она раздвигает их и сминает на том или ином расстоянии в складки смятия. Иногда при этом смятие происходит на очень большом расстоянии, как, например, в Аппалачах в Северной Америке, где, видимо, большая часть складок образовалась в результате раздвигающего действия огромных гранитных куполов.

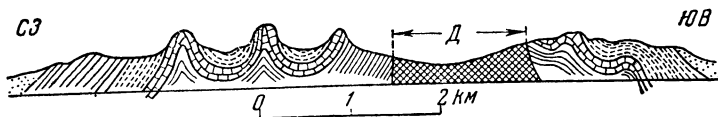


Рис. 40. Складки, образовавшиеся под раздвигающим действием внедрившегося в покрывающие породы диапирового ядра (D), по Гогелю

Стрелки показывают направление давления внедряющегося диапирового ядра на окружающие слои. Прованс (Франция)

Комбинация этих способов возникновения горизонтального сжатия ведет к тому или иному распределению складок смятия внутри геосинклинали. Все такие складки закономерно связаны с обстановкой, характерной для геосинклинали: они вызваны интенсивными вертикальными движениями земной коры, контрастностью вертикальных движений и крутыми наклонами и в залегании пород и в рельефе; поэтому складки смятия развиты именно в геосинклиналях.

Мы теперь можем видеть, что различные типы складок родственны между собой. Они отражают различную степень реакции слоев земной коры на вертикальные ее движения. Наиболее простой реакцией оказывается в случае глыбовых складок, когда слои только приподнимаются, следуя за движением глыбы. Сложнее эта реакция в случае складок нагнетания, когда на фоне вертикального движения глыб происходит горизонтальное перетекание в наиболее пластичной свите слоев, а затем вертикальное нагнетание, использующее разрывы в вышележащих породах. Наконец, образование складок смятия отражает еще более сложную реакцию: слои либо стекают по склону, либо сминаются под давлением расползающейся поднятой глыбы и ядра нагнетания. Глубинные складки имеют много общего со складками нагнетания. Но они специфичны, и вся их специфика видна, когда мы пытаемся выяснить,



как же характер складчатости изменяется с глубиной. Наиболее вероятной является следующая картина (рис. 41).

В глубине, на нижнем «этаже» гранитного слоя лежит область гранитизации и регионального метаморфизма с ее глубинной складчатостью. Там образуются гранитные купола и валы. Эта зона лежит на разной глубине; местами она расположена в 5—6 км от поверхности, местами значительно глубже. Выше лежит «этаж», характеризующийся глыбовым строением. Здесь происходят движения глыб вверх и вниз. Движущей силой, толкающей глыбы на ту или иную высоту вверх, являются в основном гранитные купола и валы предыдущего, более глубокого «этажа». Наконец, движения глыб среднего «этажа» вызывают в слоях наиболее верхнего «этажа» образование глыбовых складок, складок нагнетания и смятия, как это было изложено выше.

Может возникнуть вопрос: если складки смятия возникают в результате сжатия местного происхождения, то почему они образуются во многих складчатых зонах почти одновременно? В истории Земли выделяют «эпохи складчатости», в которых происходило особенно интенсивное смятие слоев в складки в самых разных, удаленных друг от друга, складчатых зонах. Здесь сказывается тот ритм колебательных движений земной коры, о котором мы уже говорили. Эпохи складчатости приурочены ко второй половине тектонических циклов, когда в геосинклиналях растут поднятия, горы. В каледонском цикле такая эпоха складчатости приурочена к силурийскому периоду, в герцинском — к концу каменноугольного и пермскому, а в альпийском — к палеогеновому и неогеновому периодам. Именно в эти эпохи в геосинклиналях создается наиболее резкий рельеф, способствующий образованию складок смятия путем оползания горных пород со склонов или путем «разваливания» в стороны поднятых блоков коры.

Следовательно, одновременность эпох складкообразования отражает одновременность определенных стадий в развитии колебательных движений земной коры. Непосредственно смятие слоев вызывается местными причинами — контрастными движениями вверх и вниз глыб земной коры в том месте, где образуются складки. Но сами эти движения глыб, поскольку они происходят почти одновременно в разных областях земного шара, должны вызываться какими-то общими глубинными процессами. О последних речь будет идти в следующей главе.

Г е о с и н к л и н а л ь  
(центральное поднятие)

передовой прогиб

Парагеосинклиналь

передовой прогиб

П л а т ф о р м а

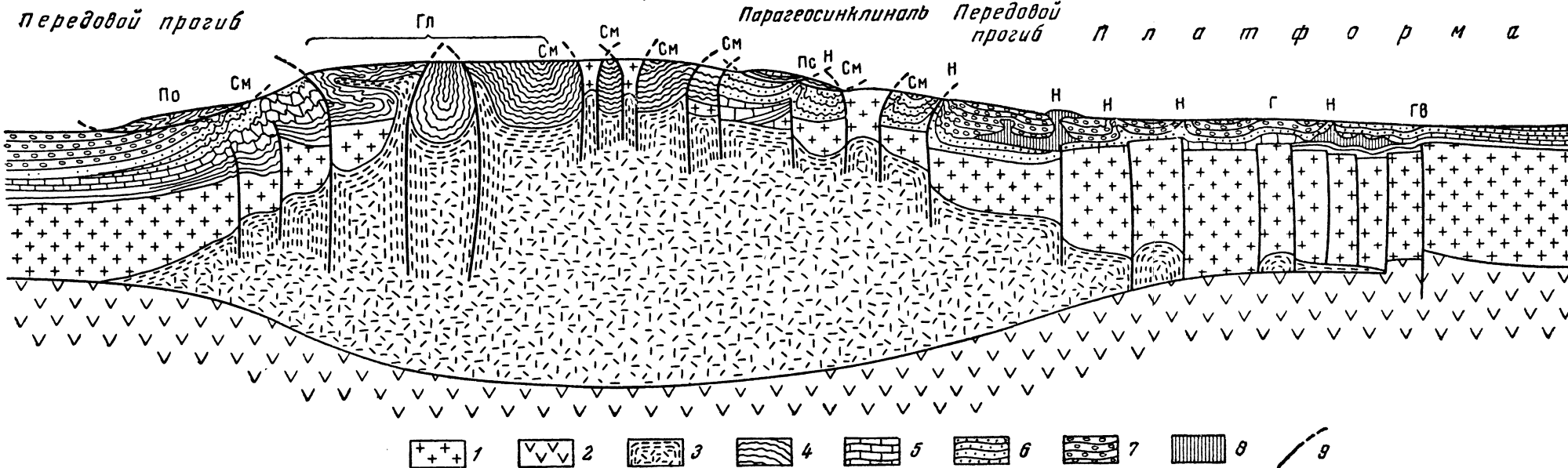


Рис. 41. Связь поверхностной складчатости с глубинными процессами

1 — древний кристаллический фундамент; 2 — базальтовый слой земной коры; 3 — молодые гранито-гнейсы; 4 — 7 — различные осадочные породы; 8 — соль, гипс; 9 — тектонические разрывы; Гл — глубинная складчатость; См — складчатость общего смятия; По, Пс — тектонические покровы (шприжи); Н — складки нагнетания; Г — глыбовая складка; Гв — вал глыбового происхождения



## Что происходит внутри Земли?

До сих пор мы говорили о составе, строении и движениях земной коры, но вопросы о том, почему кора имеет тот или иной состав, то или иное строение, и какие причины вызывают ее движения, что заставляет подниматься к поверхности расплавленную магму, не рассматривались.

Правда, шла речь об условиях смятия слоев в складки. Но мы разбирали только поверхностные условия, которые непосредственно приводят к изгибанию слоев в складки и ничего не говорили о первопричинах поднятий и опусканий земной коры, лежащих в основе всякого складкообразования. Сейчас мы займемся вопросом о глубинных процессах. Мы постараемся выяснить, какие явления происходят внутри Земли, отражаясь на поверхности в виде движений земной коры и поднятия магмы, как развивается земной шар в целом, каково направление его эволюции.

Следует, однако, сразу же оговориться. Когда мы говорим «выяснить», это не означает, что будет что-то твердо установлено и доказано. Из предыдущего было видно, что наши знания о составе и строении глубоких слоев земной коры, тем более мантии, крайне ограничены и неопределенны. Это мешает твердо установить, какие именно процессы происходят в глубине коры и под ней и в чем состоит причина тектонических движений. Наши заключения по этим вопросам носят пока характер предположений, гипотез. И наша задача состоит в том, чтобы из различных возможных предположений выбрать наиболее вероятные, наиболее отвечающие современному уровню науки, и наиболее полезные для дальнейшего развития науки о Земле. Последнее замечание надо понимать так, что научная гипотеза должна не только давать наиболее вероятное объяснение наблюдаемым фактам: она должна также указы-

вать вопросы и пути для дальнейших исследований и для ее собственной проверки.

В течение долгого времени в науке господствовала так называемая контракционная гипотеза или гипотеза сжатия Земли, высказанная первоначально французским ученым Эли де Бомоном и развитая главным образом австрийским геологом Зюссом. Согласно этой гипотезе, Земля

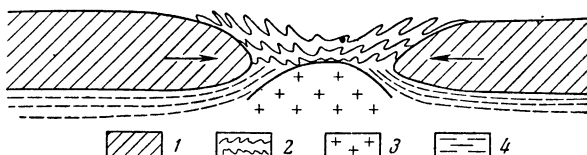


Рис. 42. Образование складчатой зоны по гипотезе сжатия земного шара

1 — жесткие платформы; 2 — сминаемые в складки пластичные слои, накопившиеся в геосинклинали; 3 — граниты, внедряющиеся в ослабленную геосинклиналиную зону; 4 — метаморфические породы; стрелками показано направление движения жестких платформ, сминающих слои в геосинклинали

находилась первоначально в раскаленном состоянии и потом постепенно остывала. Предполагалось, что остывание продолжается и до сих пор на большой глубине, тогда как поверхностная часть Земли, ее кора, уже остыла и затвердела. Охлаждение вызывает уменьшение объема. Внутренние части Земли, остывая, сокращаются в объеме, и земная кора оказывается для них слишком просторной. Опускаясь под действием силы тяжести, она вынуждена сморщиваться, сминаться, приспосабливаясь к меньшей поверхности сжимающегося ядра. По этой гипотезе вертикальные движения земной коры, изгибание слоев в складки, образование гор и впадин — все это вызывается сморщиванием и короблением земной коры вследствие ее сжатия. Поднятие магмы также рассматривалось как выжимание ее под давлением оседающей коры. Предполагалось, что платформы являются жесткими глыбами земной коры, затвердевшими после многократного смятия их в складки, тогда как геосинклинали представляют собой мягкие участки коры, еще не отвердевшие и поэтому при сокращении поверхности Земли слои в геосинклиналих, между сближающимися, как тиски, жесткими платформами, раздавливаются и изгибаются (рис. 42). Гипотеза остывания и

сжатия Земли была тесно связана с гипотезой Лапласа о происхождении солнечной системы из раскаленной туманности.

В настоящее время гипотеза сжатия, как и космогоническая гипотеза Лапласа, не отвечает больше уровню науки и тем фактам, которыми мы располагаем. Эта гипотеза получила распространение во второй половине XIX в., задолго до открытия радиоактивности. Когда стали известны радиоактивные превращения, выяснилось, что радиоактивные элементы выделяют тепло. Поскольку радиоактивные элементы содержатся, хотя обычно и в малом количестве, в любой горной породе и любом минерале, в каждой горной породе идет выделение тепла. Кислые породы (например, граниты) содержат радиоактивных элементов и выделяют тепла больше, чем основные породы (например, базальты). Можно приблизительно подсчитать, сколько вырабатывается радиоактивного тепла в земном шаре, а сколько этого тепла выделяется наружу — мы уже знаем. Оказывается, что тепла образуется в Земле столько, что не приходится говорить об ее остывании. Только через 10 миллиардов лет количество радиоактивных элементов уменьшится настолько, что может начаться остывание планеты. В течение же 4,5 миллиардов лет своего существования Земля могла только постепенно разогреваться.

Наибольшим признанием в настоящее время пользуется гипотеза «холодного» происхождения Земли. Согласно этой гипотезе, земной шар, как и другие планеты, образовался путем собирания и «склеивания» мелких и крупных холодных частиц и обломков, летавших в космосе в виде огромного роя. И только когда Земля была уже большой, внутри нее начало накапливаться радиоактивное тепло. Эта гипотеза, как известно, была разработана академиком О. Ю. Шмидтом.

Таким образом, сама основа гипотезы сжатия — представление об охлаждении Земли — опровергается современной наукой.

Но контракционную гипотезу опровергают и многие геологические наблюдения. Например, медленные колебательные движения земной коры, ее поднятия и опускания никак нельзя считать сморщиванием коры при сокращении ее поверхности: этот процесс колебательных движений земной коры слишком сложен для такого толкования и

в то же время слишком правилен и закономерен. Поднятия и опускания земной коры должны вызываться не общим грубым сморщиванием коры, а какими-то процессами, происходящими под земной корой и воздействующими на нее снизу, в вертикальном направлении.

В свое время главным достоинством контракционной гипотезы считалось то, что она будто бы хорошо объясняет смятие слоев в складки. В то время думали, что все складки образовались в результате горизонтального сжатия земной коры, сокращения ее поверхности. С тех пор, как мы видели в предыдущей главе, наши взгляды на складки значительно изменились и усложнились. Теперь мы знаем, что не всякие складки, а только одна группа их связана с горизонтальным сжатием в земной коре; при этом выяснилось, что горизонтальное сжатие проявляется лишь в некоторых отдельных местах на небольших площадях. Зато существуют гораздо более многочисленные складки — глыбовые и нагнетания, которые заведомо не могли образоваться при горизонтальном сжатии: они возникали при вертикальных движениях глыб земной коры или при выдавливании вверх пластичных толщ под тяжестью вышележащих пород. Таким образом, и в вопросе о происхождении складок гипотеза сжатия более не соответствует современным данным.

Взамен гипотезы сжатия было выдвинуто немало новых гипотез. Перечислить их все нет возможности, и мы кратко остановимся лишь на некоторых из них.

Американский геолог Бухер в начале 30-х годов нашего столетия выдвинул так называемую пульсационную гипотезу. Он предположил, что Земля периодически то сжимается, то, наоборот, увеличивается в объеме, в связи с чем кора то сжимается, то растягивается. Поскольку эта гипотеза, как и контракционная, связывает многие движения земной коры (в частности, всю складчатость) с общим сжатием земной поверхности, она повторяет ошибки контракционной гипотезы и должна быть отвергнута.

Еще раньше, в 40-х годах нашего века, немецкий геофизик Вегенер предложил гипотезу горизонтальных перемещений (плавания) материков. Эта гипотеза сразу привлекла внимание и завоевала много сторонников. Позже возникли многочисленные сомнения в ее правдоподобности, и одно время она была почти совсем забыта. Однако в последние годы снова повышается интерес к этой гипотезе

в связи с тем, что она как будто подкрепляется результатами так называемых палеомагнитных исследований. В связи с возобновлением интереса к предположению, что материки «плавают» по поверхности Земли, мы остановимся на этой гипотезе несколько подробнее.

В те годы, когда выдвигалась эта гипотеза, сведения о строении земной коры были весьма ограничены. Было известно, что под материками земная кора близ поверхности сложена гранитами, а под океанами она состоит из базальтов. Предполагалось, что гранит, как более легкий материал, плавает поверх более тяжелого базальта. Вегенер полагал, что первоначально гранитный материал был распространен по всей поверхности Земли тонким слоем. Приливные силы, увлекающие все предметы на поверхности Земли с востока на запад, и центробежная сила, вызывающая давление, направленное от полюсов к экватору, заставили этот гранит собраться в один более толстый блок, в единый материк Пангеа (рис. 43). Это произошло в палеозойскую эру. Позже те же силы раскололи единый массив гранита на части, ставшие отдельными материками.

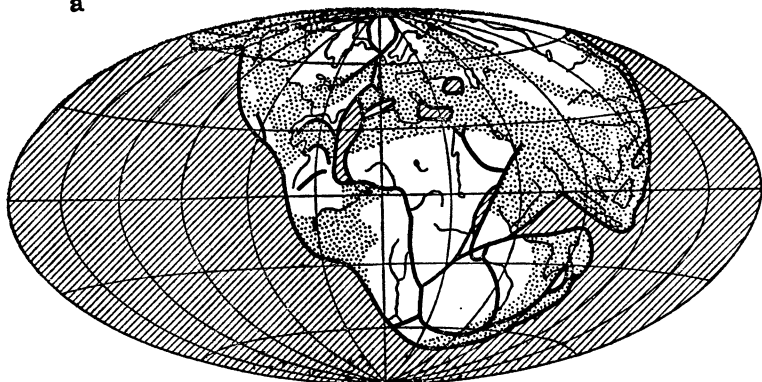
Америка откололась от Европы и Африки и, опережая остальную материковую массу в общем движении на запад, отошла вперед, что привело к образованию в промежутке, возникшем между материками, Атлантического океана с базальтовой корой. Встречая при своем движении сопротивление базальтовой подстилки, американский материк сминался впереди в складки, в результате чего возникли Кордильеры и Анды.

Африка наполовину откололась от Азии и несколько повернулась южным концом по часовой стрелке, в результате чего между нею и Индостаном, ранее к ней примыкавшим, образовался океан. Антарктида и Австралия откололись от Африки и Азии, сместились на юг и отодвинулись друг от друга. Складчатая зона, протянувшаяся от Средиземного моря до Гималаев, образовалась под давлением, направленным к ней, с обеих сторон и вызванным центробежной силой. Островные дуги, опоясывающие материки с востока (Алеутская, Курильская, Японская, Филиппинская, Индонезийская и т. д.), представляют собой обломки материков, отколовшиеся и отставшие от последних в их движении к западу.

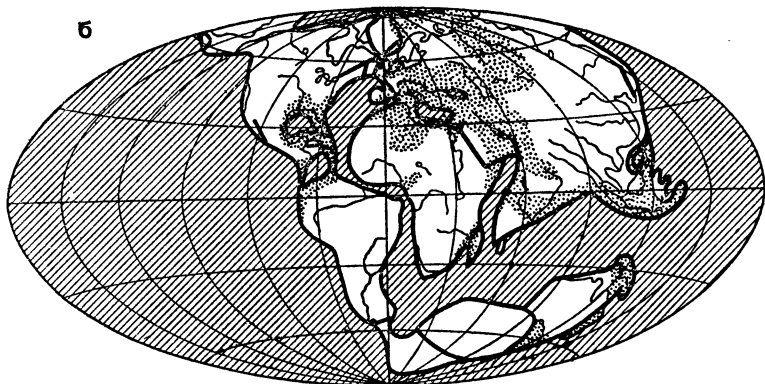
В пользу своей гипотезы Вегенер высказывал разные соображения. Он указывал на разнородность строения



а



б



в

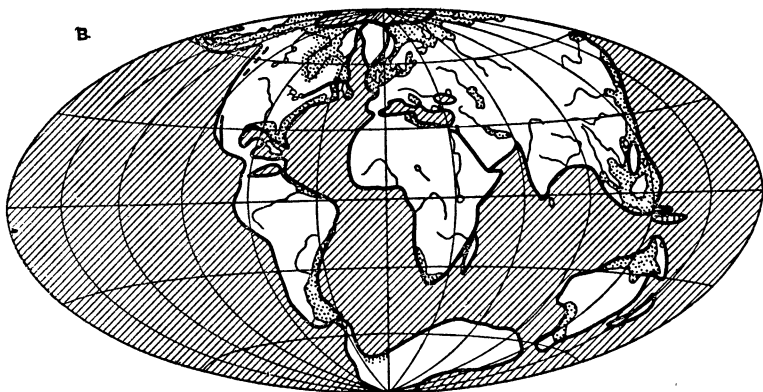


Рис. 43. Движение материков по гипотезе Вегенера  
 а — положение 300 миллионов лет назад; б — положение 50 миллионов лет  
 назад; в — положение 1 миллион лет назад

земной коры — гранитной под материками и базальтовой под океанами. Он подчеркивал, что контуры многих материков параллельны друг другу и что, пользуясь этим, можно сдвинуть материки в единый блок, переместив их навстречу друг другу и поворачивая на тот или иной угол. Так, восточный берег Америки почти повторяет изгибы западного побережья Европы и Африки; при сближении этих материков выступ Бразилии может поместиться в Гвинейском заливе и т. д. Соответствие будет еще лучше, если с севера между Америкой и Европой заклинить треугольник Гренландии. Аналогичный параллелизм можно найти и для берегов других материков.

Вегенер ссылаясь также на общность строения материков, разделенных океаном. Например, было указано, что геологическое строение Южной Америки настолько близко строению Африки, как будто они представляют части бывшего единого целого. С помощью своей гипотезы Вегенер объяснял большое сходство между флорой и фауной Южной Америки, Африки, Индии, Австралии для некоторых геологических периодов. Пытаясь восстановить по характеру осадочных горных пород распределение климатических зон на Земле в прежние периоды, Вегенер пришел к заключению, что это распределение легче понять, если предположить, что взаимное расположение материков было раньше не таким, как теперь.

Однако в свете современных научных данных вся основа гипотезы Вегенера неприемлема. Земная кора под материками состоит не только из гранитного, но также из базальтового слоя, который продолжается и под океанами. Таким образом, нельзя уже говорить о плавлении гранитных «льдин» по базальту. Больше того, в главе 4 указывалось, что различия между материками и океанами распространяются и на верхнюю мантию: строение ее оказывается различным под материками и океанами. Значит, смещаться должны были бы и кора и верхняя мантия вместе, а не только одна кора и тем более не один гранитный слой. Ясно, что когда поднимается такой огромный участок земной коры, как Балтийский щит, имеющий свыше 1500 км в поперечнике, причина этого явления должна находиться на большой глубине — на глубине многих сотен километров под поверхностью. Так же глубока должна быть причина прогибания обширного Подмосковского бассейна. Мы знаем и глубокофокусные землетрясения, оча-

ги которых находятся на глубине более 700 км. Магматические очаги вулканов, по геофизическим наблюдениям, расположены на глубине во всяком случае более 100 км. Если бы земная кора двигалась относительно мантии, то области поднятия и прогибания на платформах и в геосинклиналях, зоны землетрясений и вулканических извержений должны были бы перемещаться по поверхности материков в обратном направлении, оставаясь над одними и теми же участками мантии, поскольку причины этих явлений лежат в мантии, а не в коре. В действительности все эти области поднятия и прогибания устойчиво остаются на своих местах. Например, Подмосковский бассейн как область медленного чапеобразного прогибания земной коры существует на одном и том же месте свыше 600 млн. лет; не менее стар и находящийся рядом медленно поднимающийся Балтийский щит.

Мы видели, что наблюдается непосредственная связь между строением дна океана и строением соседних материков. Восточно-Австралийские Альпы и горы Новой Зеландии далеко распространяются по дну океана в виде подводных валов. Средне-Индийский вал на севере прямо приводит к базальтам плато Деккана в Индии. Это излияние базальтов, несомненно, связано со Средне-Индийским валом, а произошло оно в конце мелового периода. Таким образом, во всяком случае с тех пор здесь не могло происходить никаких смещений материка относительно дна океана. Это в корне опровергает мнение некоторых сторонников Вегенера, предполагающих, что совсем недавно, в начале неогенового периода, Индия находилась далеко от теперешнего своего места.

Остается непонятным, почему одни и те же силы сначала стянули весь гранитный слой в один массив, а потом, продолжая действовать все в том же направлении, разорвали его на части. К тому же подсчеты показывают, что силы эти далеко не достаточны, чтобы двигать гранитные материк. Тем более они не смогли бы сдвинуть с места гранитный слой вместе с находящейся под ним верхней мантией, которой к тому же и двигаться некуда, так как она упирается в такую же верхнюю мантию, находящуюся под океаном.

Мы видели, что колебательные движения земной коры, ее поднятия и опускания, являются **основным** типом тектонических движений. Но где эти движения в гипотезе

Вегенера? Что говорит эта гипотеза о разделении земной коры на геосинклинали и платформы, о периодичности тектонических движений? Дает ли она возможность объяснить складчатость во всем ее разнообразии? Все эти вопросы, а вместе с ними и многие другие весьма важные проблемы развития земной коры совершенно не находят себе места в этой гипотезе.

Возникает вопрос: как же обстоит дело с теми аргументами, которые приводились в пользу гипотезы плавления материков?

Сходство геологического строения между различными материками существует, но те или иные черты сходства всегда наблюдаются между тектоническими зонами одного типа, даже если они и удалены друг от друга. Например, можно найти черты сходства между Кавказом и Гималаями, хотя заведомо известно, что они всегда были удалены друг от друга. Сходство вызвано тем, что и Кавказ и Гималаи представляют собой складчатые зоны альпийского цикла, поэтому возраст пород, время смятия их в складки, время поднятия гор и т. п. в значительной степени сходны. Есть черты сходства между Африкой и Южной Америкой, так как и та и другая являются древними платформами. Но подобное сходство не доказывает, что они когда-то соприкасались друг с другом.

Переселение фауны и флоры с одного материка на другой, конечно, могло происходить только при условии непосредственной сухопутной связи между ними. Но вовсе не обязательно, чтобы такая связь устанавливалась путем подплывания одного материка к другому. Между современными материками, связывая их, могла существовать в прошлое время суша, которая потом погрузилась. Иногда это могли быть «мосты» в виде перешейков или гряд островов. А с острова на остров через неширокие проливы наземные животные и растения, как известно, мигрируют достаточно легко, например, с помощью плавающих и переносимых течениями деревьев или просто с помощью ветра (перенос ветром семян и спор).

В пользу гипотезы Вегенера остается, в сущности, только параллелизм контуров материков. Это, конечно, интересное явление. По-видимому, причина его лежит в том, что границы материков совпадают с глубинными разломами, которые образуют на поверхности Земли правильную сетку. Естественно, что при этом контуры материков, по

крайней мере частично, должны быть параллельны между собой.

Обратимся теперь к палеомагнитным исследованиям. В некоторых горных породах было обнаружено так называемое остаточное намагничение, сохранившееся в породе со времени ее образования. Можно восстановить направление этого древнего намагничения. Оно указывает, в какой стороне находился магнитный полюс в ту эпоху, когда образовалась порода. Изучение большого числа образцов горных пород разного возраста показало, что магнитные полюса в течение геологической истории перемещались по поверхности Земли. Северный магнитный полюс в кембрийском периоде находился в середине Тихого океана; в дальнейшем он перемещался на северо-запад и в каменноугольном периоде оказался на территории современного Приморья, в пермском периоде — около Камчатки, а в течение триаса и юры пересек северо-восток Азии и постепенно, к нашим дням, приблизился к своему теперешнему положению. Так как считается очевидным, что магнитная ось всегда была близка к оси вращения Земли, то значит, таким же образом менял свое положение и географический Северный полюс. Изучение расположения на поверхности Земли различных климатических зон в прежние геологические эпохи, выполненное академиком Н. М. Страховым по распространению различных осадочных горных пород, показало, что палеомагнитные данные в общем согласуются с геологическими. Поэтому можно считать, что земная ось действительно поворачивалась так, как это было только что указано <sup>1</sup>.

Но некоторые исследователи идут дальше. Они подметили, что образцы, собранные в Европе и Северной Америке, указывают для одних и тех же геологических периодов различное положение магнитных полюсов. Это расхождение было истолковано как подтверждение гипотезы плавления материков: в свое время, мол, северный магнитный полюс, как и сейчас, был один, но если сейчас, по образцам из Европы и Америки, он оказывается в двух разных местах, то это может быть понято только так, что с того времени материк переместились и повернулись. Однако внимательное рассмотрение всех фактов приводит к выво-

---

<sup>1</sup> Правильнее сказать, что ось вращения Земли сохраняла в пространстве свое положение, а все тело Земли поворачивалось относительно нес.

ду, что такое заключение никак нельзя считать обоснованным: точность палеомагнитных измерений слишком мала, чтобы можно было придавать наблюдаемым расхождениям серьезное значение. Это расхождение, оказывается, вполне можно объяснить и некоторыми систематическими ошибками, вызванными взаимным положением Европы и Северной Америки относительно Северного полюса.

Иногда палеомагнитными данными пытаются обосновать движения таких материков, как Африка, Австралия, Индия, или островов Японского архипелага. Количество изученных образцов из этих стран настолько мало, что при большой неточности измерений полученные результаты невозможно считать достоверными, тем более что в ряде случаев они приводят к совершенно фантастическим выводам. Например, по некоторым палеомагнитным измерениям оказывается, что в меловом периоде Япония должна была находиться на Памире!

Общий наш вывод тот, что палеомагнитные данные не могут служить подтверждением гипотезы плавления материков.

Наблюдающийся некоторый параллелизм очертаний материков, помимо предположений об их перемещении по поверхности земного шара, вызвал также предположения о чрезвычайно большом расширении Земли. Такую гипотезу высказал, например, венгерский геофизик Эдьед. Он предполагает, что первоначально земной шар был значительно меньше, чем сейчас: его поверхность была равна суммарной поверхности материков, которые составляли единое целое, покрывая всю Землю. Радиус Земли в то время равнялся 3500—4000 км. В дальнейшем радиус Земли увеличивался приблизительно на 0,6 мм каждый год в результате того, что вещество внутри земного шара становилось все менее плотным. При этом единый континентальный покров растрескался, разделился на отдельные материки, которые по мере увеличения поверхности земного шара отодвигались все дальше и дальше друг от друга.

Эта гипотеза совершенно неприемлема. Нет никаких оснований предполагать, что вещество внутри Земли постепенно становилось все менее плотным. Если бы это было так, то в недавнее геологическое время сила тяжести на поверхности Земли должна была бы быть значительно больше современной. А это не могло бы не отразиться на строении организмов, чего однако не наблюдается: нет ни-

каких признаков того, что организмы, жившие в былые времена, были приспособлены к большей силе тяжести, чем современные. Предполагаемое увеличение радиуса земного шара на 80% находится в противоречии с астрономическими данными.

Большая группа широко распространенных в настоящее время гипотез находит причину тектонических движений земной коры, ее сжатия и растяжения, в конвекционных течениях, происходящих, по предположению, в мантии Земли. Предполагается, что в результате нагревания

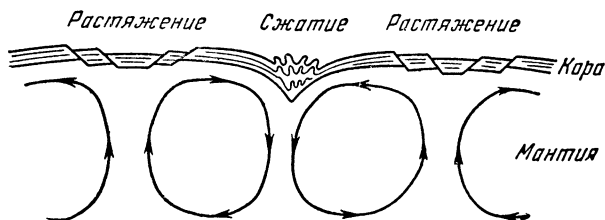


Рис. 44. Гипотеза конвекционных потоков в мантии

Потоки описывают петли с попеременным направлением движения. Сходящиеся под корой потоки вызывают сжатие коры, расходящиеся — растяжение

снизу радиоактивным теплом вещество мантии, расширяясь, всплывает вверх отдельными потоками. После охлаждения оно опускается обратно. В результате происходит круговращение материала, частицы которого описывают петли внутри мантии. Между восходящими и нисходящими ветвями таких петель вещество должно двигаться горизонтально и тянуть с собой земную кору. Там, где горизонтальные течения в двух соседних петлях движутся навстречу друг другу, земная кора сжимается, там же, где они расходятся, она растягивается (рис. 44). Иногда предполагается, что именно такие потоки, а не центробежные и приливные силы, могут смещать материки. Наиболее известна гипотеза конвекционных потоков в мантии, предложенная голландским геофизиком Венинг-Мейнесом.

До сих пор, однако, не найдено никаких фактических данных, которые достаточно убедительно подтверждали бы, что в мантии Земли действительно происходит конвекция. Эта гипотеза все тектонические движения в земной коре снова сводит к сжатию и растяжению. Мы видели, что сжатием и растяжением нельзя удовлетворительно объяс-

нить ни колебательные движения, ни складчатость. Так что и эта гипотеза, подобно предыдущим, оказывается бесплодной.

За последние годы некоторую популярность приобрели взгляды, согласно которым многие, если не все, события внутренней истории Земли вызваны не столько внутренними силами, сколько внешними «космическими» воздействиями со стороны Солнца, Луны и даже отдаленных звезд. Это «астрогеологическое» направление приобретает весьма разные формы.

Привлечение внимания к взаимодействию между Землей и другими небесными телами или к возможной тектонической роли тех или иных форм движений земного шара как планеты не может вызвать, конечно, возражений. То, что такие взаимодействия существуют, не подлежит сомнению. Результатами взаимодействия между Землей, Солнцем и Луной являются форма орбиты Земли, движение ее полюсов, приливы в жидкой и твердой оболочках планеты и т. п. Главный вопрос заключается в правильном определении размера влияния этих космических факторов на тектонические явления. В этом пункте как раз и таятся основные ошибки «астрогеологов», которые обычно необоснованно преувеличивают роль космических факторов, а иногда в «астрогеологических» работах встречаются ссылки на факторы вовсе фантастические, в природе не существующие. Так, например, некоторые предполагают, что энергия солнечного излучения периодически сильно изменяется и что это влияет на развитие тектонических явлений на Земле. Нет никаких научных данных о наличии больших периодических изменений солнечной радиации, а те, которые происходят, как показывают точные расчеты, не могут заметно влиять на процессы в земной коре.

Недавно в научной печати промелькнуло предположение, что временное усиление в июле 1957 г. потоков частиц, излучаемых Солнцем, вызвало изменение скорости вращения земного шара. Тщательная проверка опровергла это предположение.

С геологической точки зрения наиболее интересным космическим явлением представляется замедление скорости вращения земного шара под влиянием приливного трения. При изменении формы Земли (уменьшении ее полярного сжатия) в результате такого замедления в земной



коре должны возникать напряжения. Некоторые предполагают, что именно они вызывают образование в земной коре правильной сети глубинных разломов. Этот вопрос до сих пор недостаточно исследован. Но то, что уже известно, заставляет сильно сомневаться в том, что приливное замедление вращения Земли может иметь заметные тектонические последствия: возникающие напряжения слишком малы, а их распределение не находится в соответствии с расположением глубинных разломов.

Исходя из всей совокупности имеющихся данных, можно утверждать, что господствующая роль в развитии земной коры принадлежит не космическим, а внутренним силам, связанным с процессами, развивающимися в недрах земного шара, главным образом в глубоких слоях коры и в верхней мантии. На это указывает наблюдаемая связь глубинного строения земной коры и верхней мантии с тектоническими зонами на поверхности Земли.

В настоящее время наиболее перспективны гипотезы, которые основными движениями в земной коре предполагают не сжатие и растяжение, а вертикальные перемещения — поднятия и опускания. Из гипотез этой группы наибольший интерес представляют те, которые среди процессов, происходящих под земной корой, основное место отводят процессу гравитационной дифференциации, т. е. разделению вещества на более легкое и более тяжелое. Более легкое вещество, отделившись, всплывает потоками вверх, а на его место потоками же опускается вниз более тяжелое вещество. Причину такого разделения обычно видят в нагревании и частичном плавлении вещества. При этом легкие составные части вещества, которые одновременно являются и наиболее легкоплавкими, плавятся раньше и поднимаются. По этой гипотезе предполагается, что земная кора образовалась путем постепенного выплавления относительно легкого материала из мантии. Поднятия и опускания земной коры объясняются воздействием на кору поднимающихся и опускающихся потоков соответственно легкого и тяжелого вещества. Складчатость рассматривается как реакция слоев земной коры на вертикальные ее движения, в полном соответствии с тем, что говорилось по этому поводу в предыдущей главе.

Эта гипотеза, несомненно, дает правильную основу для понимания того, что происходит в недрах Земли. Она ближе всего отвечает всем имеющимся научным фактам.

Но и она встречает трудности и относительно ее возникают разногласия, когда ставится вопрос о происхождении и истории материков и океанов. Логично думать, что по мере того как выплавляются все новые и новые порции легкого вещества, площадь, занятая на поверхности гранитным слоем, должна увеличиваться и вместе с тем должны расти материки, которые представляют собой скопление легкого вещества, выплавленного из мантии. Постепенно выплавление распространяется на все новые площади, ранее не затронутые этим процессом, и, следовательно, материки должны увеличиваться, а океаны сокращаться. Эта вполне логичная точка зрения не соответствует, однако, многому из того, что мы знаем, об истории материков и океанов. В главе 5 говорилось о бесспорных признаках углубления океанов и увеличения их площади за счет материков. Так что дело обстоит не так просто, как думают сторонники прямой и необратимой дифференциации вещества Земли. Следует предполагать, что происходит значительно более сложный процесс. К попытке представить себе этот более сложный процесс мы и перейдем сейчас.

Земной шар образовался путем слипания холодных пылевых частиц, летавших в космическом пространстве в виде роя. В дальнейшем он постепенно нагревался изнутри в результате радиоактивного распада. Благодаря малой теплопроводности вещества Земли радиоактивное тепло до сих пор накапливается на большой глубине (свыше 700 км).

История верхних слоев мантии Земли сложнее. Расчеты показывают, что первоначально верхняя мантия вся нагревалась. Потом, приблизительно полтора миллиарда лет назад, в связи с расхождением радиоактивных элементов, должно было начаться охлаждение, постепенно распространяющееся сверху вниз.

Сравнивая предполагаемые температуры с температурой плавления вещества верхней мантии, можно заключить, что радиоактивный разогрев должен был привести к частичному плавлению вещества в верхней части мантии. Выше мы говорили, что по скорости распространения сейсмических колебаний в верхней мантии был установлен размягченный слой, залегающий под материками на глубине между 100 и 200 км, а под океанами — между 50 и 400 км. Это, наверно, и есть тот слой, в котором происходит

частичное плавление. Легкие составные части выплавляются из него и поднимаются столбами и полосами к поверхности. Из этого легкого материала образуется земная кора и, в частности, ее гранитный слой. А вниз из частично расплавленного слоя опускается более тяжелый материал.

На этот процесс дифференциации должны оказывать влияние глубинные разломы. Они являются теми путями, по которым легкий материал поднимается к поверхности наиболее легко.

Дифференциация в верхней части расплавленного слоя происходит быстрее и более интенсивно, чем в его нижней части, так как вверху благодаря меньшему давлению вязкость вещества меньше. Потоки легкого вещества вверх и тяжелого вниз вызывают на поверхности поднятия и опускания земной коры (рис. 45). Энергичная дифференциация в верхней части расплавленного слоя создает контрастное разделение коры на интенсивные поднятия и опускания, характерные для геосинклиналей. Дифференциация в нижней части расплавленного слоя, значительно более медленная, тоже вызывает поднятия и опускания на поверхности, но медленные и небольшие, и они незаметны на фоне тех энергичных движений, которые вызываются дифференциацией в верхней части того же слоя плавления.

Однако по мере того как охлаждение, распространяющееся в мантии сверху вниз, захватывает все новые слои, дифференциация в верхней части слоя плавления становится все более затруднительной и, наконец, совсем останавливается. Это вызывает окончание интенсивных вертикальных движений земной коры на поверхности. Геосинклинальные условия заканчиваются и геосинклиналь превращается в платформу. Теперь на поверхности отражаются те медленные вертикальные потоки материала, которые происходят в нижней части расплавленного слоя. Они выражаются на поверхности в виде медленных, спокойных поднятий и опусканий коры, характерных для платформ. Таким образом, энергичными вертикальными движениями коры в геосинклиналях «заведуют» процессы, происходящие в верхней мантии на меньшей глубине, чем те процессы, которые вызывают спокойные движения платформ.

Периодичность тектонических процессов обусловлена явлением, которое можно сравнить с поведением крышки

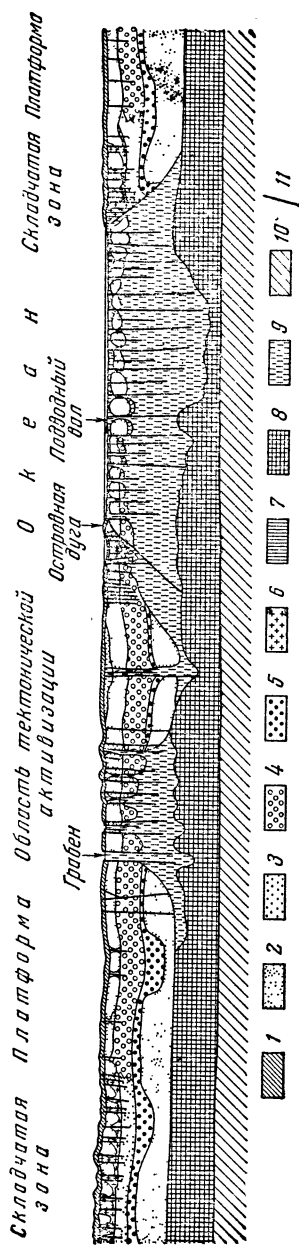


Рис. 45. Предполагаемое строение мантии Земли в различных тектонических зонах

1 — кора континентального типа; 2 — недифференцированный эклогит; 3 — подвергшийся плавлению и дифференциации эклогит; 4 — эклогит, в котором дифференциация завершилась; 5 — основные продукты дифференциации эклогита; 6 — кислые продукты дифференциации эклогита; 7 — средние и щелочные продукты дифференциации эклогита; 8 — нижний слой плавления эклогита; 9 — области подъема базальта, выплавленного из нижнего слоя эклогита; 10 — нижняя мантия; 11 — глубокие разломы

на кипящем чайнике. Радиоактивный разогрев, а тем более плавление ведут к увеличению объема мантии. Растяжение приводит к образованию новых и к большему открытию старых глубинных разломов, что в свою очередь способствует более быстрому поднятию легкого материала и опусканию тяжелого. Такая усиленная циркуляция вещества ведет к более быстрому выносу к поверхности тепла и к понижению температуры на глубине и, как следствие отсюда, к временному успокоению тектонических процессов, пока радиоактивное тепло вновь накапливается на глубине.

Все эти процессы относятся к той стадии развития Земли, которую можно назвать «гранитной». С ней связано образование и развитие на поверхности Земли геосинклиналей и платформ и образование гранитного слоя коры в результате процесса гранитизации.

Следующая стадия может быть названа «базальтовой». Она знаменуется массовым подъемом к поверхности базальта и разрушением гранитного слоя коры. На поверхности эта стадия выражена в различных явлениях. Какое из них конкретно имеет место — зависит от свойств земной коры, от ее проницаемости для поднимающегося из глубины базальта.

В некоторых местах подъем базальта вызывает тектоническую активизацию, например в Тянь-Шане. Выше (в главе 4) говорилось, что под хребтами Тянь-Шаня обнаружены базальтовые «корни». Поднявшийся из глубины мантии базальт «припаялся» снизу к земной коре и вызвал поднятие ее над собой. В других случаях поднятие коры над базальтовыми глубинными потоками сопровождается раскалыванием ее и образованием провалов — грабенов (например, в Восточной Африке или на Байкале).

Когда базальт может вытечь на поверхность, образуются большие поля — плато базальтов, как в Индии (плато Деккан) или на Сибирской платформе.

Наконец, поднимающийся из глубины горячий базальт может расплавить и «растворить» земную кору и своим воздействием так изменить ее химический состав и строение, что вместо материковой коры с ее гранитным и «базальтовым» слоями образуется океаническая кора, значительно более тонкая и состоящая только из базальтового слоя. Такая кора тяжелее материковой, поэтому при ее об-

разовании земная поверхность опускается, получается впадина. Эта впадина заполняется водой, выделенной из расплавленной материковой коры, а также из самих поднявшихся базальтов. Таким образом возникают океаны на месте бывших материков. По мере того, как все новые и новые массы базальтов поднимаются к поверхности, они все больше «разъедают» материковую кору и океаны растут за счет материков. Вода же, наполняющая океаны, имеет глубинное происхождение: она, подобно другим легким составным частям, выделилась в конечном счете из мантии Земли, первоначально в виде пара. То, что в недрах Земли содержится много воды (вероятно, в форме различных соединений внутри минералов), подтверждают огромные объемы водяного пара, которые выбрасываются в атмосферу при каждом вулканическом извержении.

Откуда же берется этот «разрушительный» базальт? Расчеты показывают, что тот слой плавления в верхней мантии, о котором мы говорили выше, с течением времени должен перемещаться все глубже за счет остывания сверху и все большего разогревания на глубине. Возможно также, что в результате все большего разогревания земных недр образуется новый расплавленный слой на большей глубине; на какой именно — сказать трудно, но можно предполагать, что на глубине свыше 400 км. Вот там и происходит выплавление базальта, оттуда он и начинает свое «наступление» на земную кору. Выплавление базальта ведет к увеличению объема, верхние слои мантии и земная кора растягиваются и образуются те глубинные разломы, по которым и поднимается базальт. Известно, что океаны представляют собой чрезвычайно раздробленные участки земной коры, где излияния базальта происходили повсеместно, а во многих местах происходят и сейчас.

Тихий океан окружен «огненным кольцом» — сплошной полосой действующих вулканов. Особенно активны они в Японии, на Филиппинских островах, в Новой Зеландии, в Южной Америке. Можно предположить, что излияние лавы вокруг Тихого океана вызвано расплавлением окраины материковой коры под влиянием поднимающихся под океаном перегретых базальтов.

Хотя в целом «базальтовая» стадия развития Земли следует во времени за «гранитной», частично они пере-

крывают друг друга. Развитие земной коры идет неравномерно: одни участки развиваются быстрее, другие отстают. Поэтому когда на некоторых участках «базальтовая» стадия уже в полном разгаре и там образуются и углубляются океаны, другие участки живут еще в «гранитной» стадии и там сохраняются материки с их платформами и геосинклиналями. На поверхности Земли одновременно существуют участки, находящиеся на разных стадиях развития, и именно путем их сравнения мы только и можем восстанавливать историческое течение геологических событий, обнимающих собой сотни миллионов и миллиарды лет.

Напрашивается интересная аналогия между формированием океанов на Земле и образованием «морей» на Луне. Установлено, что лунные «морья», кажущиеся темными пятнами на ее поверхности, но, как известно, не содержащие ни капли воды, образовались в результате опускания по разрывам некоторых участков, ранее обладавших высоким «материковым» рельефом. Высокие области на Луне отличаются от морей по характеру пород, которые их слагают. Выяснить точно, какие это породы, с Земли нельзя, однако с помощью оптических наблюдений определено, что высокие области («материки») сложены более кислыми породами, чем моря. Возможно, что дно последних покрыто потоками базальтов. Таким образом, подобно земным океанам, лунные моря представляют собой места проплавления лунной «материковой» коры поднявшимися снизу горячими базальтами. В настоящее время этот процесс на Луне, видимо, прекратился, тогда как на Земле он еще продолжается.

Это сопоставление показывает, что те космонавты, которые, несомненно, в скором времени посетят Луну, добудут там крайне интересные сведения по геологии и геофизике. Многие будущие наблюдения на Луне и соседних планетах прольют свет на проблемы внутреннего строения и развития нашей собственной планеты.

\* \* \*

Изложенные здесь предположения о процессах, развивающихся в недрах нашей планеты, ни в коем случае нельзя считать окончательным словом науки. Сейчас они как будто лучше других представлений соответствуют известным научным фактам, но по мере появления новых

фактов ранее установленные будут пересматриваться, придется видоизменять и сами предположения. Поворотным пунктом в развитии науки о Земле будет тот день, когда человек, наконец, доподлинно узнает, из какого вещества сложены нижние слои земной коры и хотя бы самые верхние слои мантии. В тот день нам, возможно, придется значительно изменить наши представления о том, что делается под нашими ногами.

Однако думается, что несмотря на неминуемые дальнейшие изменения взглядов, кое-что, может быть — как раз наиболее существенное, в них все же сохранится. Так, едва ли можно сейчас сомневаться, что основными движениями земной коры являются вертикальные и что именно они приводят не только к поднятиям и опусканиям земной коры, но и к образованию в ней складок разных типов. По-видимому, останется и представление о дифференциации вещества мантии, как об основном глубинном процессе, дающем энергию тектоническим и магматическим явлениям. В свою очередь несомненно, что дифференциация вызывается радиоактивным разогреванием недр. Таким образом, основа наших представлений, наверное, сохранится. Но многие существенные стороны их будут, конечно, с течением времени пересмотрены.

Для того чтобы предположения превратились в научную теорию развития Земли и земной коры, необходимо значительно расширить наши знания о составе и строении земных недр. В этом направлении — непочатый край работы.

Сейчас можно только выразить уверенность, что в конце концов человек, конечно, проникнет в сокровенные части планеты и вынесет оттуда образцы вещества для исследования. Как это будет сделано? Путем грандиозной буровой скважины или с помощью автономного снаряда, который, гонимый атомным двигателем, как гигантский металлический крот прогрызет себе путь на сотни километров в глубь Земли и вынесет оттуда куски встреченного там вещества? Ответ на этот вопрос дадут ближайшие десятилетия.



---

## Л и т е р а т у р а

### ПОПУЛЯРНАЯ

- В. И. Влодавец. Вулканы Советского Союза. Географгиз, 1949.
- Н. А. Гвоздецкий. Карст. Географгиз, 1954.
- Г. П. Горшков. Землетрясения на территории Советского Союза. Географгиз, 1949.
- В. А. Магницкий. Внутреннее строение Земли. Изд-во «Знание», 1961.
- Ю. А. Мещеряков. Современные движения земной коры. «Природа», 1958, № 9.
- В. А. Обручев. Занимательная геология. Изд-во АН СССР, 1961.
- Б. А. Петрушевский. Землетрясения и возможности их предсказания. Изд-во «Знание», 1961.
- В. В. Тихомиров и В. Е. Хаин. Краткий очерк истории геологии. Госгеолтехиздат, 1956.
- Б. А. Федорович. Лик пустыни. Изд-во «Молодая гвардия», 1954.
- В. Е. Хаин. Происхождение материков и океанов. Изд-во «Знание», 1961.
- Д. И. Щербаков. Геология на новых путях. Изд-во «Знание», 1962.
- Д. И. Щербаков. Пучины океана. Изд-во АН СССР, 1962.

### УЧЕБНАЯ

- В. В. Белоусов. Структурная геология. Изд. МГУ, 1961.
- Г. П. Горшков и А. Ф. Якушева. Общая геология. Изд. 2. Изд-во МГУ, 1962.
- П. П. Климентов. Гидрогеология. Госгеолтехиздат, 1955.
- Е. А. Кузнецов. Курс петрографии магматических и метаморфических пород. Изд-во МГУ, 1956.
- Курс общей геологии. Под ред. В. И. Серпухова. Госгеолтехиздат, 1960.
- Г. П. Леонов. Историческая геология. Изд-во МГУ, 1956.
- К. К. Марков. Палеогеография. Изд. 2. Изд-во МГУ, 1960.

# СПЕЦИАЛЬНАЯ

- В. В. Белоусов. Основные вопросы геотектоники. Изд. 2. Госгеолтехиздат, 1962.
- Ю. А. Билибин. Металлогенические провинции и металлогенические эпохи. Госгеолтехиздат, 1955.
- Б. Гутенберг и Ч. Рихтер. Сейсмичность Земли. ИЛ, 1948.
- Земная кора. Сборник статей под ред. А. Полдерварта. ИЛ, 1957.
- А. П. Карпинский. Очерки геологического прошлого Европейской России. Изд-во АН СССР, 1947.
- Д. В. Наливкин. Учение о фациях, т. I, II. Изд-во АН СССР, 1956.
- Неотектоника СССР. Сборник статей. Изд-во АН Латв. ССР, Рига, 1961.
- Л. Б. Рухин. Основы литологии. Гостоптехиздат, 1953.
- Л. Б. Рухин. Основы общей палеогеографии. Гостоптехиздат, 1959.
- И. Е. Старик. Ядерная геохронология. Изд-во АН СССР, 1961.
- Н. М. Страхов. Основы теории литогенеза, т. I. Изд-во АН СССР, 1960.
- Н. М. Страхов. Основы теории литогенеза, тт. II и III. Изд-во АН СССР, 1962.
- Строение земной коры по сейсмическим данным. Сборник статей. ИЛ, 1959.
- Ф. Тернер и Дж. Ферхуген. Петрология изверженных и метаморфических пород. ИЛ, 1961.
- Физика и химия Земли. Сборник статей. ИЛ, 1958.
- В. Е. Хаин. Геотектонические основы поисков нефти. Азнефтеиздат, Баку, 1954.
- О. Ю. Шмидт. Четыре лекции о теории происхождения Земли. Изд. 4. Изд-во АН СССР.

## Оглавление

|                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Вступление . . . . .                                                                                        | 3   |
| Глава 1. Из чего состоит земная кора? . . . . .                                                             | 13  |
| Глава 2. Процессы, изменяющие лик Земли . . . . .                                                           | 24  |
| а) Внутренние геологические процессы . . . . .                                                              | 26  |
| Медленные движения земной поверхности, смятие горных пород в складки и образование в них расколов . . . . . | 26  |
| Землетрясения . . . . .                                                                                     | 35  |
| Поднятие магмы и вулканы . . . . .                                                                          | 36  |
| б) Внешние геологические процессы . . . . .                                                                 | 41  |
| Разрушение горных пород . . . . .                                                                           | 43  |
| Силы, вызывающие перенос обломков разрушенных горных пород . . . . .                                        | 46  |
| Отложение осадков и образование новых горных пород в морях и озерах . . . . .                               | 54  |
| Глава 3. Как человек изучает строение и развитие Земли . . . . .                                            | 60  |
| Глава 4. Что известно о внутреннем строении Земли? . . . . .                                                | 81  |
| Глава 5. Как развивается земная кора? . . . . .                                                             | 105 |
| Глава 6. Почему слои сминаются в складки? . . . . .                                                         | 119 |
| Глава 7. Что происходит внутри Земли? . . . . .                                                             | 129 |
| Литература . . . . .                                                                                        | 150 |

*Владимир Владимирович Белоусов*

### Земля, ее строение и развитие

*Утверждено к печати редколлегией научно-популярной литературы Академии наук СССР*

Редактор Издательства *Б. А. Петрушевский*. Художник *Е. К. Манкв*  
Технический редактор *В. В. Волкова*

РИСО АН СССР № 28-159В. Сдано в набор 23/II 1963 г.

Подписано к печати 10/V 1963 г. Формат 84×108<sup>1/2</sup>.

Печ. л. 4,75+3 вкл. Усл. печ. л. 7,79. Уч. изд. л. 7,4 + 0,4 вкл. = 7,8

Тираж 55 000 экз. Т-05134. Изд. № 1591. Тип. зак. № 1896.

Цена 23 коп.

Издательство Академии наук СССР. Москва, К-62, Подсосенский пер., 21

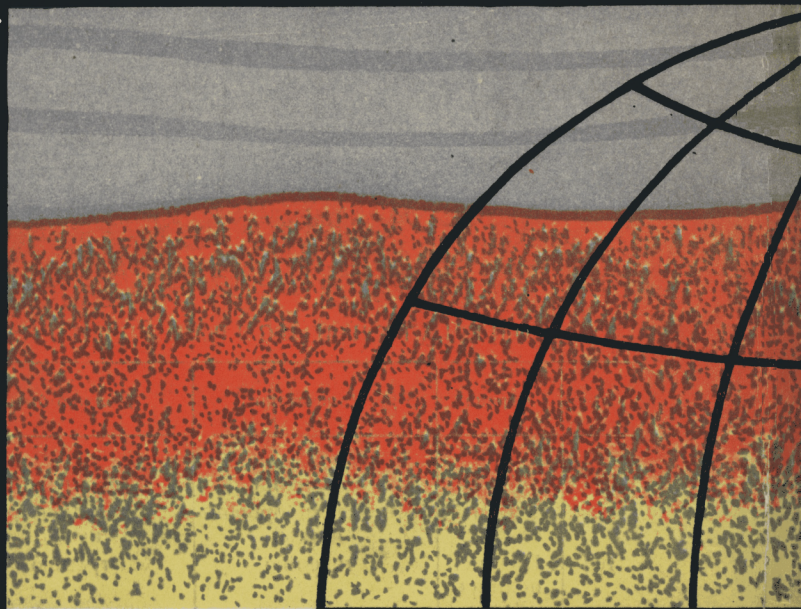
2-я типография Издательства АН СССР. Москва, Г-99, Шубинский пер., 10

# ОПЕЧАТКИ И ИСПРАВЛЕНИЯ

| Стр. | Строка  | Напечатано          | Должно быть          |
|------|---------|---------------------|----------------------|
| 74   | 14 сл.  | изменения           | измерения            |
| 96   | 9 сл.   | 12,6 электропровод- | 12,6, электропровод- |
|      |         | ность               | ность                |
| 103  | Подрис. | течению             | трению               |
|      | подпись |                     |                      |
|      | 3 сл.   |                     |                      |

**В. В. Белоусов**

23 коп.



ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР