

МР И знаний

К. Г. СТАФЕЕВ

Жизнь вулкана



МИР ЗНАНИЙ

К. Г. СТАФЕЕВ

Жизнь вулкана

*Книга для внеклассного чтения
VIII—X классов*

Рецензенты:

зав. кафедрой геологии и геохимии, доктор географических наук,
профессор *Добровольский В. В.* (МГПИ им. В. И. Ленина),
учитель химии школы № 138 (Москва) *Пантелева Н. А.*

Стафеев К. Г.

С78 Жизнь вулкана: Кн. для внекл. чтения VIII—
X кл. — М.: Просвещение, 1982. — 127 с., ил. —
(Мир знаний).

Книга содержит современные сведения о вулканической деятельности Земли. Она расширяет знания учащихся в области химии природных процессов, происходящих на нашей планете при вулканических извержениях. В ней рассказывается о зависимости типов вулканических извержений от химического состава пород, приводятся данные о составе вулканических продуктов в зависимости от их агрегатного состояния. Рассмотрены петрохимические типы пород, сообщено о содержании различных элементов в вулканических газах и жидкостях, показана связь ряда месторождений полезных ископаемых с вулканическими породами разного химизма.

С 4306021400—450
103(03)—82 КБ—11—16—1982

ББК 26.321
552

ВВЕДЕНИЕ

В этой книге будет рассказано об одном удивительном и интересном явлении природы — возникновении и развитии вулканов, о том, какие физические и химические процессы лежат в основе вулканических извержений, что происходит с вулканами после того, как они прекращают свою активную деятельность. Читатель не найдет здесь полной классификации вулканов и вулканических извержений. Характеристика того или иного процесса приводится лишь для того, чтобы с его помощью показать основные закономерности вулканической деятельности.

Большинство популярных книг о вулканах и вулканизме имеет описательный характер. В них в меньшей степени затрагивается внутренний механизм извержений, причины их возникновения. Поступательное развитие науки с каждым днем приносит нам все новые доказательства того, что в основе всех явлений на поверхности и в глубинах Земли лежат химические и физико-химические процессы. Поэтому в этой книге жизнь вулканов рассматривается сквозь призму химии, популярно рассказывается о химической и физико-химической природе основных вулканических явлений.

Из курса географии читатель уже знаком с понятием «вулкан». Живущие на Камчатке или Курильских островах, возможно, видели извержения вулканов в действительности. И, наверное, все видели в кино или по телевизору, как происходит извержение вулкана. Ведь в последнее время эти события происходят на глазах наших современников и снимаются теле- и кинооператорами. Так, в

1975 г. было заспано извержение вулкана Толбачик, а в 1979 г. — Карымского вулкана на Камчатке. Поэтому у каждого из нас при слове «вулкан» возникает представление огнедышащей горы, извергающей тучи раскаленных камней и пепла, которые все сметают на своем пути. В большинстве книг обычно описываются именно эти процессы. Это и понятно, так как наиболее яркие моменты жизни вулкана связаны с его активной деятельностью, часто приносящей огромные бедствия людям и народному хозяйству. Знание причин вулканических извержений необходимо для предвидения и принятия мер по защите от них.

Роль вулканизма в строении и развитии Земли огромна. Многие горные породы, покрывающие поверхность Земли или дно морей и океанов, образовались в результате вулканической деятельности или при размывании *вулканических пород*¹. По подсчетам А. Б. Ропова и А. А. Ярошевского², объем вулканических пород в верхней оболочке Земли (до глубины 2 км) превышает 150 млн. км³, что составляет почти 20% объема этой оболочки.

Вулканизм является частью еще более грандиозного процесса, происходящего в недрах Земли, — магматизма. В земных глубинах на всех этапах развития нашей планеты образовывались расплавленные вещества. Эта расплавленная масса, называемая *магмой*, проникала из глубоких недр Земли на разные уровни земной коры и на поверхность. Застывая, она образовывала магматические горные породы. Все глубинные и поверхностные процессы, связанные с действием магмы, носят название магматизма. Обычно различают интрузивный магматизм и вулканизм. Первый процесс связан с застыванием магмы на глубине, второй — с поверхностными и приповерхностными магматическими явлениями. Последние и рассматриваются в данной книге.

В настоящее время на земном шаре существует около 450 действующих вулканов, располагающихся в различных районах. В среднем при извержениях выбрасывается

¹ Объяснение этого и других терминов (выделенных в тексте *курсивом*) можно найти в «Энциклопедическом словаре» или в Большой Советской энциклопедии.

² См.: Ропов А. Б., Ярошевский А. А. Химическое строение земной коры. — Геохимия, 1967, № 11.

в атмосферу до 3 млрд. т пепла ежегодно. Около 1 млн. т этой массы представляют соединения углерода. Ученые считают, что с вулканической деятельностью связано образование предбиологических веществ и, возможно, возникновение самой жизни на Земле.

Извержения вулканов происходят и в наши дни. В 1979 г. газеты принесли известие о том, что начались извержения на самом активном вулкане Камчатки — Карымском. Извержения повторялись через 2—3 мин и столб пепла над вулканом достигал в высоту 1,5 км. С другой стороны нашей планеты, из Италии, дошли известия о том, что пробудился самый высокий европейский вулкан — Этна. В результате извержения на восточном склоне вулкана на высоте более 3 км образовался новый кратер, из которого вылился поток лавы. Этот поток спустился вниз по склону и остановился в 100 м от деревни Форматцо, население которой эвакуировано. 27 апреля 1981 г. пробудился вулкан Алайд — самый высокий и самый активный среди вулканов Курильских островов. Произошел взрыв, и началось сильное извержение. Оно достигло наибольшей силы 1 мая. Высоко в воздух поднялась огромная пепловая туча, которая понеслась в восточном направлении. Город Северо-Курильск, расположенный в 45 км от вулкана, был засыпан слоем пепла толщиной до 20 см. Пепел выпал на Камчатке. Группа вулканологов сделала несколько облетов района извержения на самолетах и вертолетах. С риском для жизни вулканологи несколько раз высаживались на остров-вулкан. Дальнейшие исследования проводились с помощью научно-исследовательского судна «Вулканолог».

Но не только на нашей планете известны вулканы. На ее небесном спутнике совсем еще недавно происходили извержения. Наличие вулканов на Луне предполагалось астрономом Гершелем еще в XVIII в. Спектрограммы, полученные советским ученым Н. А. Козыревым, показали, что газы, подобные вулканическим, выделяются в настоящее время в кратерах Альфонса и Аристарха. Поэтому можно утверждать, что многочисленные кратеры, известные на Луне, произошли не только в результате падения метеоритов, но и вследствие вулканической деятельности.

Американские космические корабли «Вояджер» I и II в марте 1979 г. зафиксировали вулканические изверже-

ния на спутнике Юпитера Ио. Здесь обнаружено 7 действующих вулканов. Пепел и пыль, вырывающиеся из них со скоростью до 1 км/с, поднимаются в разреженной атмосфере спутника на высоту до 270 км. На Венере также есть все основания предполагать существование действующих вулканов. Об этом свидетельствует как высокое содержание оксида углерода (IV) в атмосфере утренней звезды, так и высокие температуры на ее поверхности, зарегистрированные советскими космическими станциями типа «Венера». По радиолокационным данным установлено, что так называемая область Бета на Венере представляет собой гигантский вулкан. Это округлое возвышение диаметром около 700 км и высотой около 10 км. На вершине гигантской горы находится крупная впадина диаметром до 90 км, которая напоминает увеличенный во много раз кратер земного вулкана. Для сравнения можно указать, что самый крупный вулкан Земли — остров Гавайи — имеет в основании 120 км и возвышается над дном океана на 9 км.

Обилие вулканов установлено и на Марсе в результате полетов межпланетных станций «Марс», «Викинг», «Маринер». Наиболее крупным вулканическим сооружением является щитовой вулкан Гора Олимп, имеющий диаметр в основании около 600 км. На вершине вулкана, возвышающейся над уровнем поверхности Марса на 27 км, располагается обширная *кальдера* диаметром 65 км. Другие вулканы — Гора Арская, Гора Павлина, Гора Аскрейская — входят в состав крупных вулканических цепей, которые тянутся почти на 1800 км.

Приведенные факты свидетельствуют, что вулканизм — обычное явление для планет солнечной системы и, может быть, для всей вселенной.

Но вернемся на Землю. Кроме действующих вулканов, на нашей планете существуют еще тысячи вулканов *потухших* и *захороненных*, или *ископаемых*. Их изучение также имеет большое значение. Исследуя эти вулканы, специалисты познают историю земного шара. На нашей планете вулканы действовали в течение всех 6 млрд. лет ее существования. Было время, когда даже в самых спокойных районах Земли, например где-нибудь под Москвой, извергались вулканы. Остатки этих сооружений находят среди различных геологических слоев, возраст которых составляет миллионы и миллиар-

ды лет. Реликты древних вулканов имеют большое практическое значение. Многие месторождения полезных ископаемых (меди, свинца, цинка и других металлов), многие источники минеральных вод знаменитых и малоизвестных курортов обязаны своим существованием древней вулканической деятельности. На подземной теплоте горячих вулканических вод работают *геотермальные* электростанции, и их значение возрастет в связи с нехваткой энергии. Вот почему в этой книге рассказано также и о том, что происходит с вулканами после того, как прекращается их активная деятельность, когда основную роль играют химические процессы. Агрессивные вулканические воды, содержащие значительные количества серной, угольной и других кислот, производят свое разрушительное действие; они растворяют вулканические породы, извлекают металлы и переоткладывают их, создавая месторождения полезных ископаемых.

Деятельность современных земных вулканов изучают *вулканологи*, геологи, геофизики, химики, а также представители некоторых других профессий. В задачу исследователей входит определение химического состава, температуры и вязкости изливающихся лав, температуры газов, их притока, давления. Все эти анализы проводят либо непосредственно на самом вулкане, либо в лаборатории, после того как отобраны пробы газа, лавы или застывшей горной породы. Многие измерения делают в непосредственной близости от раскаленного жерла, в местах, где температура достигает нескольких сот градусов Цельсия. Поэтому вулканологи, подобно рабочим горячих цехов, одеты в огнестойкую одежду и обувь. Вулканолог должен быть хорошим спортсменом, ему часто приходится подобно альпинисту подниматься на обрывистые склоны *кратеров*. Исследователь вулканов должен быть хорошим химиком, потому что в основном анализы газов и жидкостей проводятся в полевых условиях с помощью переносных лабораторий, и нужно уметь обращаться с реактивами и химическими приборами. Также необходимо ему и знание физики, так как в настоящее время при изучении вулканов широко применяются методы, основанные на различных физических свойствах веществ. Например, сейсмологическими методами исследуют упругие свойства веществ, магнитометрическими — магнитные свойства горных пород и т. д. Знание

Законов физики и химии во многом способствует получению объективных данных о вулканических извержениях.

Изучением потухших и ископаемых вулканов занимается наука, которая называется палеовулканологией (от греч. «палео» — *древний*). Палеовулканологам обычно приходится иметь дело с руинами древних вулканов, расположенными на земной поверхности, или вскрытыми горными выработками и буровыми скважинами. Зная законы и формы образования современных вулканов, геологи и палеовулканологи реконструируют по остаткам древних вулканов полную картину вулканической деятельности. Это имеет большое значение при поисках месторождений полезных ископаемых.

В нашей стране создан специальный научно-исследовательский институт вулканологии в городе Петропавловске-Камчатском. Сотрудники этого института проводят комплексное изучение современного наземного и подводного вулканизма на Камчатке, Курильских островах и в Тихом океане. В их распоряжении находится специальный корабль «Вулканолог».

Обо всем этом будет рассказано в книге. Читатель найдет в ней много познавательного материала. Учащимся старших классов книга может помочь в профессиональной ориентации. Не все, конечно, станут вулканологами или геологами, но, если это пособие пробудит интерес к познанию законов природы, автор будет считать свою задачу выполненной. Книга должна заинтересовать и тех, кто любит и понимает природу.

ЧТО ТАКОЕ ВУЛКАНЫ

Каждая наука имеет свои собственные термины и понятия, и вулканология не является исключением. Знать эти термины необходимо, так как они позволяют автору выразить свои мысли в краткой форме, без употребления длинных объяснений, а читателю — понять, о чем идет речь.

Слово «вулкан» пришло к нам от древних римлян, которые считали вулканы трубами кузнечных печей. В этих кузницах, по их представлениям, работает бог огня и кузнечного мастерства — Вулкан (в греческой мифологии — Гефест). Название «горы Вулкана» привилось в латинском языке ко всем горам, которые извергали раскаленную лаву и пепел. Затем оно перешло в немецкий, английский и другие европейские языки, а позже было заимствовано русским языком.

В старой русской литературе вулканы назывались огнедышащими горами. «Огнедышащие горы как бы некоторые проломы в теле показывают излишество материи, которая подобно внутренней болезни выходя наружу движет и надувает приближенные части... Горы таким же образом то вновь поднявшись загораются на некоторое время и погасают. Иные старую силу отыграют, иные совсем обрушившись кончают свое свирепство вовсе...»¹ — так писал Михаил Васильевич Ломоносов о зарождении и погасании вулканов, или огнедышащих гор.

Имеется более десятка определений термина «вулкан», но более всего для него подходит понятие, предложенное

¹ Ломоносов М. В. О слоях земных. М., 1949.

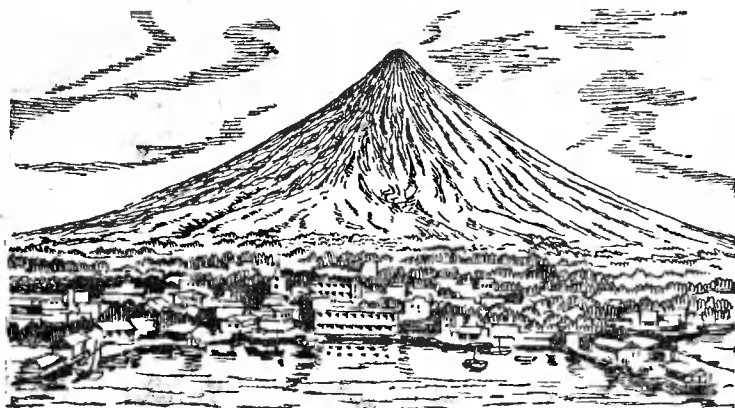


Рис. 1. Самый правильный вулканический конус на Земле — вулкан Майон на Филиппинах.

советским геологом, академиком В. А. Обручевым: «Горы, извергающие огонь, дым, мелкие обломки пород и изливающие лаву — расплавленную каменную породу, называются вулканами»¹.

Продукты вулканических извержений в зависимости от физического состояния делятся на твердые, жидкие и газообразные. Их общее количество и соотношение друг с другом неодинаковы для различных вулканов и во многом определяются химическим составом первичного вещества. Среди этих продуктов наиболее распространены расплавленные жидкие лавы — *магма*, расплавленная на глубине. На долю лавы в зависимости от типа извержения приходится от 10 до 90% от всего извергающегося материала. Остальную массу составляют застывшие обломки той же лавы, обломки других горных пород, которые были захвачены лавой при подъеме из глубины, а также магматические газы.

Обычно большинство вулканических гор имеет конусообразную форму (рис. 1). Конус имеет большое сходство с терриконами шахт, потому что образуется аналогичным образом. Чаще всего он сложен насыпными продуктами, которые выбрасываются из центра. При вулканических

¹ Обручев В. А. Основы геологии. М., 1956.

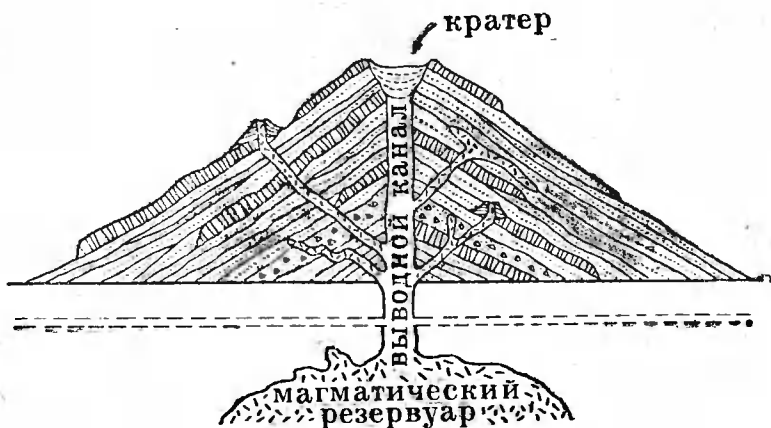


Рис. 2. Схема строения стратовулкана (в разрезе) со слоями лав, туфов и других пород.

взрывах обломки разлетаются в разные стороны, но большая их часть падает поблизости и, постепенно накапливаясь, образует гору. Эта гора складывается из различных слоев (рис. 2), представленных лавовыми потоками и слоями туфов, и в разрезе напоминает слоеный пирог. Такие вулканические постройки называются *стратовулканами* (от лат. *strata* — *слой*). На вершине конусовидной горы располагается впадина — кратер. Стенки его уходят в глубь горы круто или отвесно. На дне кратера можно увидеть одно или несколько отверстий, по которым продукты извержения поступают на поверхность. Это *жерла* вулкана. Они могут быть либо зияющими, либо заполненными последними порциями извергающейся лавы. Когда лава застывает внутри жерла, она образует жерловину, или *некк*.

Высота вулканических конусов может достигать больших размеров. Например, конус Ключевской Сопки на Камчатке имеет высоту 4850 м, самый высокий вулкан в Европе — Этна — 3313 м. В Андах в Южной Америке высота вулканических гор достигает 7 км. Хотя не вся гора может быть сложена из вулканического материала, тем не менее эти цифры показывают, что количество извергнутого материала должно быть весьма значительным.

У некоторых вулканов при грандиозных взрывах или

обрушениях кратер может быть очень велик по сравнению с самим вулканом. В таком случае кратер называется кальдерой (от исп. *caldega* — котел). Кальдеры в перечнике достигают 10 км и более. Если после образования кальдеры извержение продолжается, то внутри нее может сформироваться второй вулканический конус с кратером на вершине. Такое строение имеет, например, всем хорошо известный итальянский вулкан Везувий. Центральный конус этого вулкана окружен высоким валом, который представляет собой размытые края древней кальдеры, или, как ее называют, *Монте-Соммы*. Эта огромная кальдера образовалась в результате грандиозного взрыва 24 августа 79 г. Новый конус в кальдере, который и является нынешним вулканом Везувием, сформировался почти через 100 лет в результате извержения в 172 г.

Конусообразную форму имеют наиболее распространенные в настоящее время вулканы, так называемые *вулканы центрального типа*. К их числу принадлежат все камчатские, курильские, японские, средиземноморские, индийские вулканы. Лавы этих вулканов обычно имеют повышенное содержание оксида кремния (IV) (60—70%), что определяет высокую вязкость лав и является причиной преобладания взрывных явлений при извержениях. Образующиеся обломки (*пирокластический материал*) слагают конусовидную гору.

Еще одной интересной формой вулканов являются *вулканические купола* (рис. 3). Они появляются тогда, когда из жерла, как из тубика зубной пасты, выдавливается очень вязкая лава, которая почти не способна течь. Поэтому непосредственно над жерлом или вокруг него слагаются холмы, часто имеющие очень крутые склоны.

А вот в Исландии, которая также является страной современного вулканизма, строение вулканов совершенно иное. Здесь преимущественно распространены *вулканы трещинного типа*. Излияние лавы происходит в этой стране не из единого центра, а вдоль крупной трещины — раскола в земной коре. Длина трещин может достигать 30 км. Они протягиваются почти прямолинейно, пересекая горы и речные долины. Лишь изредка встречаются изгибы и коленчатые смещения трещин. При извержениях лава изливается почти на всем протяжении трещины. Она как бы переливается через край и затем течет в обе стороны от трещины, заливая и выравнивая все соседние участки.



Рис. 3. Небольшой вулканический купол на Гавайских островах.

После ее застывания образуется ровная поверхность лавового плато. Иногда вдоль трещины формируются небольшие вулканические конусы, состоящие из обломков той же лавы. Такая необычная текучесть лавы связана с ее химическим составом. Для трещинных вулканов Исландии характерны *базальтовые лавы*, содержащие относительно немного кремнезема, менее 55%. Такие лавы характеризуются очень низкой вязкостью и легко растекаются по поверхности. Это и определило простое геологическое строение острова Исландия. В настоящее время извержения происходят не только на основном острове, но и на прилегающих к нему с юга небольших островах, в районе, который называется Вестманнаэйяр. Здесь в результате подводных извержений зарождаются новые острова. Последним в 1963—1966 гг. возник островок Суртсэй. Образование островов начинается с подводных пелловых извержений, которые постепенно создают пелловый конус. Конус размывается морем, но вулканические взрывы поставляют новый материал. Как только кратер вулкана перестанет заливаться морской водой, из него начинает выливаться лава. Она покрывает конус плотной броней и предохраняет его от размыва. Но если извержение лавы не происходит, возникший остров быстро размывается. Так получилось в 1783 г. с островом Нийй.

И еще об одной форме вулканов следует рассказать. Это так называемые лавовые озера. В таком озере в большом плоском кратере диаметром до 5 км располагается почти незастывающая масса расплавленной базальтовой лавы с содержанием оксида кремния (IV) до 50%. Размеры озера сокращаются в периоды между извержениями и резко увеличиваются во время извержений. Происходят своеобразные наводнения: лавы выходят из берегов и затапливают значительные площади в пределах кратера, иногда выливаются за его пределы. Наиболее известные лавовые озера существовали на Гавайских островах. В результате последних извержений вулкана Килауэа, в 1959, 1963 и 1965 гг., образовалось три лавовых озера глубиной от 15 до 120 м. Эти озера уже застыли, хотя температура при излиянии лав составляла 1140—1285°C. Застывание продолжалось от 10 месяцев до 25 лет как с поверхности под воздействием воздуха и дождя, так и снизу под воздействием холодных горных пород. В этих застывших озерах еще есть линзы расплавленного материала на глубине 30—40 м. В настоящее время лавовое озеро имеется лишь в Африке на вулкане Нирагонго. Склоны кратера не позволяют расплавленной лаве свободно вытекать из озера. Но на поверхности озера непрерывно происходит движение расплавленной массы, возникают лавовые фонтаны высотой до 100 м и более. Поверхность озера непрерывно волнуется, возникают зыбь, волны (рис. 4). Застывшая корка, покрывающая поверхность озера, погружается на глубину и вновь плавится. Зрелище лавовых озер производит большое впечатление.

Существует еще очень большое число вулканов разнообразных по форме вулканической постройки и по характеру извержений. Обычно они представляют собой комбинации главных вулканических типов, о которых уже было рассказано. Кроме вулканических гор и холмов, располагающихся на поверхности Земли, действующие вулканы имеют *выводной канал*, по которому в вулканическое жерло поступает расплавленный материал снизу.

Вулканические области на Земле многочисленны. Своей необычной красотой, дикостью, беспорядочным нагромождением скал они напоминают первобытный хаос. Рельеф в областях современного вулканизма очень своеобразен. Это проявляется не только в образовании специфических форм: вулканических конусов, кальдер, лавовых

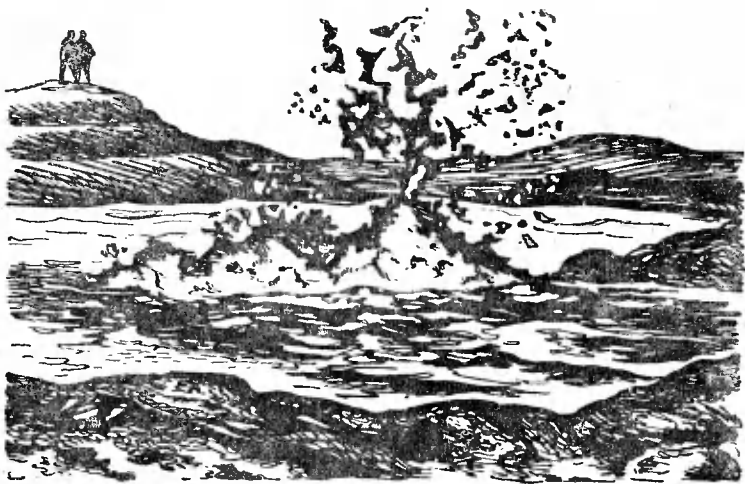


Рис. 4. Лавовое озеро.

потоков. При извержениях земная поверхность покрывается слоем рыхлых, легко проницаемых отложений. Это приводит к тому, что вода просачивается на глубину, и на поверхности Земли отсутствуют ручьи и реки. В таких местах очень часто можно видеть древние речные долины, «законсервированные» пеплопадом. Неудивительно поэтому, что во многих странах в вулканических областях организованы заповедники и национальные парки. Одним из самых старых национальных парков является Гавайский, организованный на островах Гавайского архипелага в 1916 г. Площадь его около 900 км². Гавайский архипелаг состоит из 8 больших и большого числа малых островов; мелкие острова — коралловые, крупные — вулканические. Вулканический остров Гавайя, на котором располагается заповедник, выступает из глади Тихого океана черными лавовыми утесами. Ближе к центру острова появляется все большее число вулканических конусов, многие из них очень высоки. Действующий вулкан Мауна-Лоа достигает в высоту 4170 м.

Если обычно люди в страхе убегают от извергающихся вулканов, посетители Гавайского национального парка, наоборот, мечтают стать свидетелями вулканического извержения и не боятся его. Происходит это потому, что ла-

ны гавайских вулканов с большим содержанием железа и магния и малой вязкостью не так опасны, как лавы другого химического состава. Поэтому, когда начинаются вулканические извержения, можно подойти даже к краю кратера. На вулкан Мауна-Лоа до высоты 2000 м ведет узкая мощеная дорога, затем до самой вершины проложена тропинка. По пути к кратеру можно отдохнуть в двух туристских приютах, один из которых расположен на высоте 3000 м, а второй — на самой вершине вулкана. Отсюда хорошо видна кальдера глубиной примерно 180 м, которую гавайцы называют Мокауеовео. Эллипсовидная кальдера в длину имеет около 5 км, в ширину примерно 500 м.

В 1926 г. лава прорвалась через трещину в юго-западной стене кальдеры вулкана Мауна-Лоа и ее поток уничтожил деревню. Самое большое последнее извержение этого вулкана произошло в июне 1950 г. По трещине в юго-западной стене кальдеры начала изливаться лава и, двигаясь очень медленно, через час достигла моря. Фронт потока высотой 15 м представлял собой крутой уступ, сложенный красновато-бурой, почти черной, спекшейся породой. В течение отдельных промежутков времени поток совершенно не двигался и казался застывшим. Лишь выделяющиеся сернистые газы и специфический запах горячего железа, как в литейной, свидетельствовали о том, что лава имеет высокую температуру. Был слышен непрерывный резкий треск застывающих глыб. Во время таких спокойных периодов лавовый поток выделял мало теплоты и можно было подойти к самому краю потока или даже взобраться на него.

Более доступным и чаще посещаемым является вулкан Килауэа высотой 1230 м. Самое интересное извержение его произошло в 1959 г. Фонтаны лавы взлетали на высоту 600 м над поверхностью лавового озера. В ночь с 13 на 14 сентября 1977 г. вулкан вновь начал действовать. На вершине вулкана построен музей, где собраны все данные о вулканической деятельности в Гавайском национальном парке. Экспозиция музея рассказывает об истории и развитии заповедника; в нем демонстрируют цветные фильмы, показывающие извержения отдельных вулканов. Тут же можно узнать, какие туристические тропы открыты. Вследствие продолжающейся вулканической деятельности тропы часто заливают потоками лавы

или заваливает глыбами. Вокруг кальдеры на вершине Килауэа идет вымощенная тропа. С нее можно видеть кратер и лавовый тоннель. Тарстон, который возник в результате того, что поверхность лавового потока застыла, а в его нижних частях лава продолжала течь. На месте вытекшей лавы образовался тоннель длиной более 120 м и высотой в отдельных местах до 6 м. Памятная тропа Мауана-Ики ведет туристов в те места, где когда-то извержение уничтожило гавайскую армию. До сих пор на окаменевшей земле видны многочисленные отпечатки босых ног. На тех участках,

до которых не достают потоки лавы, бурно развивается тропическая растительность. Многие растения являются эндемичными, т. е. они больше нигде не произрастают. Из них наиболее интересно огело (*Vaccinium reticulatum*), плоды которого подобны чернике. Об этом растении много говорится в старинных гавайских песнях и легендах. Древние обитатели Гавайев приносили его в дар богине огня Пеле. Имя этой богини увековечено и в некоторых лавовых образованиях, например так называемые слезы и волосы Пеле (рис. 5) — обломки базальтового стекла, образующегося при застывании лавовых фонтанов в воздухе.

В нашей стране к вулканическим районам, где очень ярко сочетаются удивительные контрасты природы, принадлежит Камчатка. Это область вулканов, красивейших гейзеров, горячих источников. Все здесь так или иначе связано с вулканическими извержениями. Многие возвышенности в этой горной стране имеют вулканическое происхождение. На сравнительно небольшой площади полуострова располагается 28 действующих, около 130 потухших вулканов, сотни горячих минеральных источников и гейзеров. Петропавловск — столица Камчатской области —

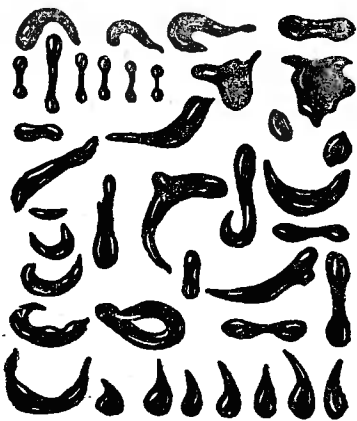


Рис. 5. Причудливые обломки базальтового стекла с вулкана Килауэа, которые называют «слезы Пеле».

располагается на сопках, которые тоже некогда извергали огонь. С них можно видеть группу вулканических гор. Высокий, ребристый, с белоснежной вершиной вулкан Вилуйчик, двухконусный Авачинский вулкан, неприступную заснеженную вершину Корякского вулкана высотой около 3,5 км. В глубине Камчатского полуострова над покрытой лесами и болотами долиной реки Камчатки возвышаются каменные склоны обширного Ключевского хребта. Здесь поднимаются к небу красноватые конусы величайших вулканов Азии. Склоны их изрезаны глубокими ущельями. Самым высоким среди них является вулкан Ключевская Сопка. Ее геометрически правильный конус, сложенный переслаивающимися пластами лав и туфов, поднимается на высоту 4850 м над уровнем моря. Покрытый снегом, с постоянно курящейся вершиной, вулкан необыкновенно красив. На его вершине располагается кратер диаметром 700 и глубиной 250 м.

На восточном берегу полуострова Камчатка, у холодных берегов Кроноцкого залива, тянется гряда вулканических сопкок. Отсюда начинается территория Кроноцкого государственного заповедника, занимающего площадь около миллиона гектаров. Здесь располагаются действующие и гаснущие вулканы, гейзеры, горячие источники и т. д. К заповеднику относится Долина Гейзеров, несколько озер, горные равнины, снежные поля и обширные лесные просторы. Все это находится под охраной государства.

Вблизи Тихоокеанского побережья располагается группа давно уснувших вулканов. Вершина одного из них, увенчанная рядом острых неприступных скал, уже не имеет правильной формы конуса. Это старый, давно потухший вулкан Семячик, или Сопка Зубчатая, как называют его местные жители. Отдельные скальные пики сопки достигают в высоту 1700 м. Чуть южнее расположена другая группа вулканов — Центральный Семячик. Среди вулканов этой группы наиболее известен вулкан Бурлящий — небольшой потухающий вулкан, почти не заметный на фоне окружающего горного рельефа. Но уже издали слышен грохот многочисленных *сольфатар* на склонах вулкана. На одном из склонов из двух темных отверстий со страшным грохотом непрерывно бьют струи перегретого пара. Одно из этих отверстий туристы прозвали Пастью дьявола: по краям черной дыры сидят словно зубы белые острые камни. В кратере вулкана, прорезанном руслами сту-

деных ручьев, лежит вечный снег, а рядом зеленеют травы, цветут летом и зимой цветы иван-чая, поодаль — обильная голубика.

Одной из самых красивых вулканических гор мира считается Кронцкий вулкан высотой 3528 м, удивительно правильный конус которого располагается около одноименного озера. У этого стратовулкана на вершине отсутствует кратер. Несмотря на крутые склоны (выше 3000 м угол склона достигает 45°), около вершины находится несколько ледников. Вокруг располагается несколько паразитических конусов. Самый крупный из них — сопка Красная на берегу Кронцкого озера, заполнившего кальдеру бывшего вулкана и имеющего площадь 200 км².

Но, пожалуй, к самым интересным явлениям природы в Кронцком заповеднике нужно отнести Долину Гейзеров и кальдеру Узон. Долина Гейзеров была обнаружена в 1941 г. Это открытие вызвало большой интерес в научных кругах. Долина реки Гейзерной располагается в 20 км от Кронцкого залива. Вверх по течению, после слияния рек Гейзерной и Шумной, насчитывается 31 гейзер и много горячих источников. Целый ряд *фумарол, грязевых вулканов*, озер с горячей водой свидетельствует о существовании на глубине расплавленных масс горных пород. Кальдера Узон образовалась в результате нескольких вулканических взрывов уже в давние времена и имеет в диаметре 10—11 км. В ней находятся небольшие озера — Центральное, Фумарольное и другие, а также большое поле, на котором распространены горячие источники и сольфатары. В юго-восточной части кальдера прорезана долиной речки Шумной, которая обрывается восьмидесятиметровым водопадом в ближайшую долину. На озерах масса водоплавающих птиц, их берега покрывает обильная растительность. В такой великолепной природной лаборатории работает комплексная экспедиция Вулканологического института Академии наук СССР. Она изучает вопросы использования термальной энергии, прогноза вулканических извержений и т. д., здесь исследуется влияние лавовых почв и теплых источников на рост растений.

На территории Кронцкого государственного заповедника, кроме вулканических феноменов, охраняются также некоторые виды редких растений и животных.

Вулкан Фудзияма высотой 3776 м является не только

самой высокой горой Японии, но и ее народным символом. Японцы утверждают, что он является самым красивым вулканом мира, а его кратер глубиной 220 м они почитают как святыню. Уже в старых народных песнях восхваляется красота Фудзиямы. Величественно возвышается эта гора над окрестностями в 90 км на запад от Токио. В ясную погоду она хорошо видна из столицы. Последнее извержение вулкана было в 1770 г. С тех пор его деятельность затихла, и пока ничто не предвещает возобновления извержений. В июле и августе на Фудзияме почти нет снега, и на вершину горы можно безопасно подняться. Для каждого японца дело чести по крайней мере раз в жизни совершить это восхождение. Поэтому каждый год летом большие группы людей устремляются на ее вершину. Между долиной и вершиной — десять остановок. До пятой, которая располагается на высоте 2500 м, можно доехать автомобилем. Но оставшиеся 1200 м каждый должен пройти пешком. Большинство японцев приходит к вулкану вечером и достигает вершины ночью. Около 7 ч вечера начинается массовое восхождение. За субботу и воскресенье на вулкан поднимается 60—80 тыс. человек.

Вулканы создают незабываемые пейзажи. Число национальных парков и заповедников в различных странах постоянно растет. Миллионы туристов имеют возможность посетить эти весьма своеобразные уголки нашей планеты. Извержения вулканов, наблюдаемые с близкого расстояния, представляют собой ни с чем не сравнимое зрелище. В кратере с шумом движущегося поезда непрерывно бьют ослепительные фонтаны лавы, дающие начало огненной реке. Движение этого потока напоминает ход гусеничного трактора. Крупные серо-бурые глыбы, постоянно меняющие свою форму, шевелятся, перекатываются, надвигаются одна на другую. От потока исходит сильный жар, между глыбами светятся красные огоньки. Поверхность только что расколовшихся глыб оранжево-желтая, но быстро тускнеющая. Над жерлом вулкана на головокругительную высоту взлетают фейерверки раскаленных *вулканических бомб*, выбрасываются черные клубы *пепла*. От непрерывного грохота закладывает уши. В темных облаках, окутывающих место извержения, время от времени сверкают молнии. Все это производит потрясающее впечатление, напоминает о поистине титанических силах, бушующих в недрах планеты.

В древние времена люди вследствие своего невежества объясняли все грозные явления природы действием сверхъестественных сил. Народы, живущие на вулканических островах или просто неподалеку от вулкана, считали их жилищем бога огня, огнедышащего дракона или другого порождения человеческой фантазии. Человек во все времена испытывал ужас перед вулканами и преклонялся перед ними. Даже сейчас, когда мы вооружены современными достижениями науки, невольно охватывает трепет, когда видишь устрашающий черный столб, поднимающийся на высоту в несколько километров, огненный поток лавы, стекающий по склонам и уничтожающий все на своем пути, дождь из пепла и камней, покрывающих плотным слоем землю, и слышишь грозные громовые раскаты вулканических взрывов. Что же можно говорить о наших темных неграмотных предках, которых при виде таких явлений охватывал панический ужас? Они считали, что это гnevаются подземные духи, и пытались как-то умиловить их.

У разных народов сохранилось много легенд и поверий, связанных с вулканическими извержениями. Известный вулканолог Г. А. Макдональд приводит, например, такую легенду, существующую у полинезийцев. Молодой вождь как-то раз спускался по склону холма на своих санях с костяными полозьями. К нему подошла старая женщина и попросила сани. Вождь грубо отказал ей. Тогда рассерженная женщина (а это была богиня огня Пеле) топнула ногой о землю. Земля разверзлась, из трещины повалил дым и полетели раскаленные камни. Только тогда вождь догадался, кто перед ним, и бросился бежать. С трудом спасся он от раскаленных камней, которые бросала ему вслед богиня.

О священной горе Фудзияма мы уже упоминали. И если ученые сейчас бесстрастно классифицируют, что Фудзияма представляет собой типичный стратовулкан, состоящий из трех вулканов: Комитаки, Ко-Фудзи, Син-Фудзи, если коллекционеры собирают на его склонах обломки обсидиана, *пемзы* и вулканических бомб, то для большинства японцев вулкан был и остается символом красоты и силы, предметом поклонения. Безмятежное величие Фудзиямы с его снежной шапкой в облаках над зеленым морем растительности вызывает чувство восхищения. Ритуал поклонения этому вулкану отображен на многих старин-

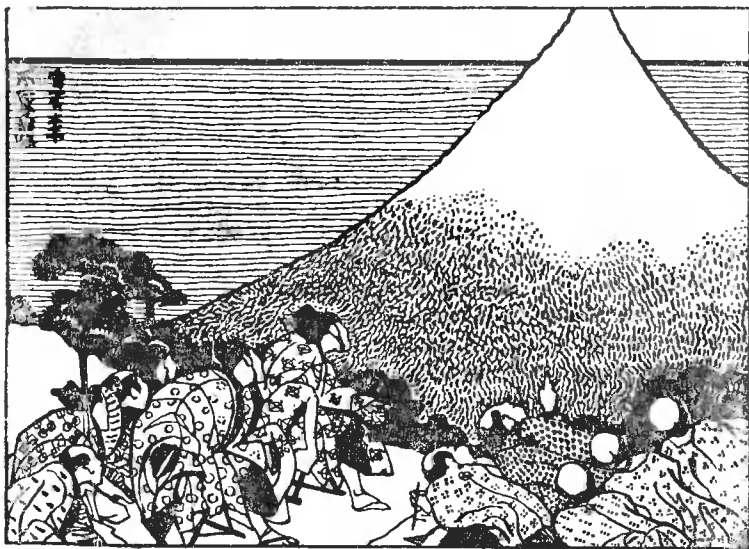


Рис. 6. Вулкан Фудзияма.

ных японских картинах, например на гравюрах Хокусая (рис. 6). И в настоящее время Фудзияма в Японии в большом почете. Однажды группу европейских туристов привезли на место, откуда хорошо виден вулкан Фудзияма, высадили из автобуса и оставили на два часа. Туристы возмущались этой задержкой, а экскурсоводы вежливо, но твердо заявили, что по программе экскурсии с девяти тридцати до одиннадцати тридцати предусмотрено любованье вулканом Фудзияма.

У народов, живущих по берегам Средиземного моря, существовало много поэтических легенд, связанных с вулканическими извержениями. Одна из этих легенд, отраженная в греческой и римской мифологии, рассказывает о борьбе богов и титанов, красочно характеризую разгул стихий. Ужасна и упорна была эта борьба. Стонала земля, грохот наполнил воздух, все кругом колебалось. Огонь охватил всю землю, моря кипели, густой дым заволоч все непроницаемой пеленой. И наконец, Юпитер (в греческой мифологии — Зевс) исторг сверкающие молнии и победил титанов в этой борьбе. Земля успокоилась, и вновь засия-

по солнцу. За поэтическими строками этой легенды можно видеть вполне реалистическое описание вулканического извержения. Древние римляне связывали также вулканические извержения с непрекращающейся работой бога огня Вулкана в своей кузнице. У одного из древнеримских поэтов можно прочесть такие строки: «Там... находится жилище бога, через край этих бездонных жерл вырывается огонь Вулкана, а в этих мрачных подземельях раздается грохот, рожденный работой его кузниц»¹.

Первые попытки научного объяснения вулканической деятельности мы находим уже в трудах философов древности. Демокрит предполагал, что извержения вулканов вызываются движением воды или воздуха через каналы внутри Земли. Платон также верил в существование этих полостей и считал, что по ним перемещаются потоки изначальных субстанций вселенной — земли, воздуха, огня и воды. Очень близкие к современным взгляды о происхождении вулканов развивал римский философ Сенека: вулканы — это отверстия в земле, через которые расплавленная масса поступает из глубины. В качестве примеров он приводил вулканы Этна, Санторин, Вулкано и Стромболи.

Но в эпоху средневековья прогрессивное развитие науки, в том числе и науки о вулканах, затормозилось. Церковники не были в этом заинтересованы, и ученые схоласты тех лет занимались бесконечным толкованием трудов древних авторов, которые церковь объявила священными. Как будто бы вновь вернулись древние времена. Вулканы принимали за вход в ад или сам ад, грохот извержений — за крики кающихся грешников и т. д.

И лишь в конце XVII в. ученые пытаются объяснить вулканические извержения химическими процессами. Например, в конце XVII в. было высказано предположение, что извержение происходит в результате взрыва серы, смешанной с песком и другими материалами. В 1700 г. были проведены даже соответствующие эксперименты. Смесь серы и металлического железа, обильно смоченную водой, зарывали в землю. Эта смесь постепенно нагревалась и в конце концов самопроизвольно воспламенялась. Она взрывала перекрывающий слой и вырывалась вместе с языками пламени и дымом. Весь этот процесс напоминал

¹ Тазиев Г. Вулканы. М., 1963, с. 21.

вулканическое извержение. Большая роль серы при извержениях подчеркивалась М. В. Ломоносовым, который в своем трактате «Слово о рождении металлов от трясения Земли» писал: «Рассуждая толикое подземного огня множество, тотчас мысль обращается к познанию материи, которою он содержится: что возгорению удобнее серы, что к содержанию и питанию огня ее неодолимее... Какая горячая материя изобильнее оная из недр Земли выходит. Загоревшись, великое количество серы в земном недре и расширив тяжкой воздух в пропастях, в лежащую сверхъу землю оным упирает, поднимает и по разным сторонам разным количеством движения разными образы трясения производит, и в тех местах прежде всего прорывается, где найдет меньше сопротивления; разрушенной земной поверхности легкие части выстреливают на воздух, которые, падая, окрестные поля занимают, прочие ради великой огромности, осилив тягостию своею пламень и обрушась, гору составляют»¹.

Дальнейшее развитие науки о вулканах и причинах их извержения связано с работами ученых двух крупных направлений в геологии XVIII и XIX вв. — плутонистами и непутистами. Плутонисты (названные так по имени бога подземного мира Плутона) утверждали наличие в глубине Земли крупных расплавленных масс, которые и являются источником, питающим вулканы. Непутисты (получили свое название по имени морского бога Нептуна) считали, что все породы на Земле появились при выпадении осадков из воды. Даже столбчатую *отдельность* в базальтах они объясняли, считая приазмы базальтов крупными кристаллами, образовавшимися в воде. Причиной возникновения вулканической деятельности они считали горение погребенных угольных пластов.

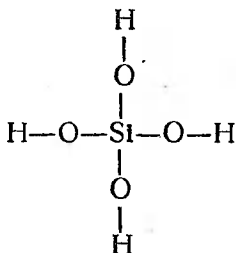
Потребовались многие годы неустанной работы нескольких поколений геологов, чтобы окончательно была доказана связь вулканизма с глубинными явлениями, протекающими в недрах Земли. Прежде чем перейти к объяснению этих явлений, необходимо, хотя бы кратко, рассмотреть химические составы природных соединений — минералов и горных пород, которые участвуют в вулканических процессах. Это тем более необходимо, что мы неоднократно будем возвращаться к этим образованиям в

¹ Ломоносов М. В. О слоях земных. М., 1949, с. 169.

нашей книге при оценке химических и физико-химических процессов, сопровождающих вулканизм.

Земная кора состоит на 47% из кислорода, 28% кремния, 9% алюминия. Таких элементов, как Fe, Ca, Na, K и Mg, содержится в земной коре 2—5%, остальных — несколько долей процента. Горные породы, входящие в состав земной коры, слагают горы, долины рек, низины, потому что песок и глина также относятся к горным породам. В природе горные породы находятся в естественных или искусственных обнажениях, их обломки можно найти на вспаханном поле. В городах выходов горных пород меньше, но из них, собственно, построен весь город. Из глины были сделаны кирпичи, из известняков и доломитов получены известь, цемент и т. д.

Все горные породы по способу образования подразделяются на изверженные (среди которых выделяются и интересующие нас вулканические породы), осадочные и метаморфические. Они состоят из минералов. К минералам принадлежат природные химические соединения, представляющие собой оксиды, галогениды, карбонаты, силикаты, сульфиды и сульфаты, соли других кислот, а также самородные металлы. Для нас наиболее интересны так называемые породообразующие минералы, т. е. минералы, которые слагают горные породы, и прежде всего вулканические горные породы. Наиболее распространены среди этих минералов алюмосиликаты — соли поликремниевых кислот, имеющие сложное строение. Простейшая из них — ортокремниевая кислота H_4SiO_4 :



Соли этой кислоты (Mg_2SiO_4 или Fe_2SiO_4) образуют минерал оливин. Это одни из самых простых химических соединений в ряду сложных алюмосиликатов. Большое разнообразие природных солей поликремниевых кислот вызвано главным образом двумя причинами: полимериза-

цией комплексов SiO_4^{4-} и замещением кремния алюминием. Для простоты будем изображать все сложные алюмосиликаты в виде их оксидов, как это принято в школьных программах по химии.

К породообразующим минералам принадлежат кварц SiO_2 , оливин $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$, или $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$, различные *пироксены* $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$, $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$, $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$, *амфиболы* $2\text{CaO} \cdot 5\text{MgO} \cdot 8\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, *слюды* $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, *полевые шпаты* $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$, $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. Именно этих главных минералов сложено примерно 90% всей земной коры, т. е. всех горных пород, распространенных в пределах *литосферы*. Они составляют также большую часть вулканических горных пород. Но для этой группы пород характерна еще одна очень важная составная часть — вулканическое стекло. По химическому составу оно соответствует всей горной породе в целом, но составляющие его химические элементы в результате быстрого застывания расплавленного стекла не успели образовать химические соединения или минералы, а представляют собой аморфную переохлажденную жидкость. Обыкновенное бутылочное стекло, например, по характеру близко к некоторым видам вулканических стекол. В основном вулканическая горная порода состоит из вулканического стекла, в котором в небольшом количестве выделяются обособления отдельных минералов или их кристаллы. По своему химическому составу вулканические породы подразделяются на несколько групп. Как правило, содержание различных компонентов в этих породах выражают в процентах, беря за основу содержание оксидов различных элементов: SiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MgO , CaO и т. д. С помощью такого деления пород на группы производится так называемая *петрохимическая классификация* вулканических пород (от греч. «петро» — *камень*, в буквальном переводе — *химическая классификация камней*). Высокое содержание оксида кремния (IV) характерно для кислых вулканических пород. К ним принадлежат *риолиты*, *липариты*, *кератофиты*. Они, как правило, состоят из вулканического стекла и минералов: кварца SiO_2 , полевых шпатов $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ и $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ и незначительного количества слюды. Содержание кремнезема SiO_2 в них составляет от 70 до 78%, а оксидов MgO , FeO , CaO — самое низкое среди всех вулканических пород, оно не превышает 1—2%. Для них характерно довольно

высокое содержание основных оксидов K_2O и Na_2O , которое в сумме достигает 6—9%. Но есть вулканические породы, еще более богатые основными оксидами — до 15—20%. Это так называемые щелочные породы, к которым принадлежат *фонолиты*, *трахиты* и другие более редкие вулканические породы. Они имеют своеобразный минеральный состав. Из перечисленных выше минералов в них присутствует лишь полевой шпат $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$; содержание оксида кремния (IV) SiO_2 (около 55—60%) в породах не дает возможности выделиться свободному кремнезему в виде минерала кварца. Этого оксида не хватает даже для образования натриевого полевого шпата альбита $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ и вместо него выделяется другой алюмосиликат — нефелин $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$. Отсюда легко понять, почему в этой породе отсутствует кварц SiO_2 :

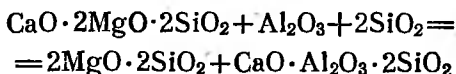


Следовательно, вместо нефелина получается альбит.

Для современных вулканов более характерны вулканические породы, которые выделяют в группы средних и основных пород. К первым принадлежат *андезиты*, ко вторым — базальты. Они широко распространены в областях современного вулканизма на Камчатке, Курильских островах, Гавайях и в других районах земного шара. В породах среднего состава содержание оксида кремния SiO_2 достигает 55—60%. Это вулканическое стекло, полевые шпаты $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, амфиболы, пироксены, слюды. В основных породах оксида кремния (IV) менее 55%. В базальтах минералы представлены пироксенами, полевыми шпатами, оливином ($2MgO \cdot SiO_2$) (*плагноклазами*). Широко распространено вулканическое стекло. Весьма высоко в базальтах содержание железа, магния и кальция, составляющие 10—15% (для каждого оксида этих элементов). Есть еще одна группа — ультраосновные горные породы, в которых оксида кремния (IV) менее 40%, но оксидов железа, магния, кальция около 25% (для каждого оксида). Такой химический состав пород определяет их минеральный состав. Низкое содержание оксида кремния (IV) не способствует образованию пироксенов, и их место занимает оливин, в котором оксида SiO_2 намного меньше¹.

¹ Совершенно очевидно, что в этих породах должен отсутствовать кварц SiO_2 , иначе вместо оливина должен был бы образоваться пироксен: $2MgO \cdot SiO_2 + SiO_2 = 2MgO \cdot 2SiO_2$.

Количество кремнезема и глинозема в породах так мало, что здесь почти не образуются полевые шпаты и их место занимают кальциевые пироксены. В противном случае (т. е. при высоких содержаниях SiO_2 и Al_2O_3) в этих породах образовались бы кальциевые полевые шпаты (плагноклазы):



В этой главе кратко изложено о главных разновидностях вулканических пород. В действительности их число во много раз больше. Кроме вулканических пород, которые содержат стекло, при вулканической деятельности образуются и другие горные породы. Они имеют тот же химический состав, но стекло в них полностью превращено в другие минералы, или, как говорят геологи, раскристаллизовано. Эти породы обычно образуются на большой глубине под вулканами, их застывание происходит в течение длительного времени в условиях более высоких давлений и температур. За это время расплавленная масса успевает образовать кристаллы. Эти породы называются субвулканическими, т. е. почти вулканическими.

Но есть еще одна группа магматических горных пород, которые не связаны непосредственно с вулканической деятельностью. Это так называемые интрузивные горные породы. Они образуются в результате кристаллизации магмы на большой глубине при высоком давлении. По своему химическому составу они почти полностью соответствуют охарактеризованным ранее вулканическим породам, но имеют иное кристаллическое строение. К числу интрузивных горных пород принадлежат известный всем *гранит*, *габбро*, *диорит* и многие другие.

РОЖДЕНИЕ ВУЛКАНОВ

В истории Земли имеется немного примеров, когда вулканы рождались прямо на глазах человека, и еще более редко удавалось ученым проследить все этапы возникновения и развития вулкана. Пожалуй, наиболее известным случаем появления новой огнедышащей горы является рождение вулкана Парикутин в штате Мичоакан в Мексике, которое произошло 20 февраля 1943 г.

Основным крупным населенным пунктом штата был город Сан-Хуан-Парангарикутиро с населением около 4000 человек. Как принято в Южной Мексике, имя города было составлено из двух названий: испанского (Сан-Хуан) и индейского (Парангарикутиро). В 2 км к югу от него располагалась деревня Парикутин, в которой жило около 150 семей индейцев-тарасков. Деревня Парикутин славилась фруктами, особенно грушами. Вокруг располагались плодородные поля, на склонах древних полуразрушенных вулканов росли дубовые и сосновые рощи, которые давали строительный лес и скипидар. Здесь же протекала небольшая пересыхающая летом речка Парикутин. Долина ее была окружена со всех сторон небольшими размытыми кратерами древних вулканов (рис. 7). Шла спокойная,



Рис. 7. На этом распаханном поле через некоторое время образуется вулкан Парикутин.

привычная жизнь. Крестьяне каждое утро выезжали на своих повозках, запряженных быками, на поля или в лес и к вечеру возвращались домой. 5 февраля появились первые подземные толчки, но жители этого вулканического района не обратили на них особого внимания. 20 февраля 1943 г. индеец Дионисио Пулидо приехал на свой участок с женой и сыном. День был тихий, и небо ясно. Во второй половине дня усилился слышимый до того слабо подземный гул. Внезапно послышался шум: как будто лили воду на горячие угли (по выражению очевидца). На вспаханном поле в одном месте поднялся черный дым, и образовалась трещина длиной около 50 м и шириной 5 см, а на ней — небольшое жерло диаметром около 30 см. Этот вулканчик недолго оставался таким маленьким. Жерло постоянно расширялось в результате разрушения стенок, и облако дыма и пепла все выше поднималось в небо. Когда на следующий день Пулидо выехал на свое поле, он увидел там холм высотой около 10 м, который постепенно увеличивался в размерах. Через неделю вулканический конус достиг в высоту 167 м.

Вулкан Парикутин действовал несколько лет. В первые два года извержения происходили из основного жерла, но затем рядом с ним сформировались еще два паразитических, которые также дали выбросы пепла и излияния лав. За это время потоки лав покрыли площадь 18,5 км² и уничтожили деревню Парикутин (рис. 8) и город Сан-Хуан-Парангарикутиро. После трех лет деятельности высота вулкана достигла 350 м (рис. 9). Вулкан погубил всю растительность на площади 60 км². Излияния лав происходили из вулкана в направлении на север. Они вытекали из трещин, из паразитических кратеров на склонах вулкана. Больше всего лав появилось из кратера Зопахо (в пер. на рус. язык — *мальчик*). Лава была жидкой, имела базальтовый состав и текла со скоростью 60—100 см/с.

Американские ученые изучили химический состав вулканического материала вулкана Парикутин и установили ряд очень интересных закономерностей. Исследовалось содержание оксидов различных элементов: SiO₂, Al₂O₃, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, TiO₂, P₂O₅ и MnO. Оказалось, что, хотя породы по-прежнему оставались базальтами, их химический состав заметно изменялся от извержения к извержению. На рисунке 10 показано изменение содержания некоторых оксидов в лавах вулкана Парикутин в за-



Рис. 8. Засыпанные и разрушенные при извержении вулкана Парикутин дома деревни Парикутин (октябрь 1944 г.).



Рис. 9. На месте мапсовых полей и дубовых рощ вырос конус вулкана Парикутин высотой более 350 м.

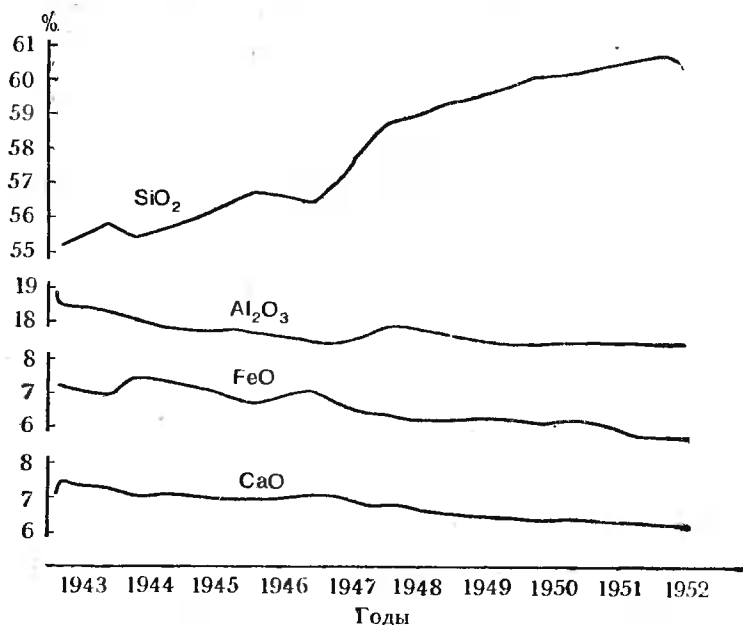


Рис. 10. Изменение химического состава лав вулкана Парикутин при извержениях 1943—1952 гг.

висимости года извержения. Как оказалось, оксида кремния (IV) в лавах в 1943 г., т. е. в период зарождения вулкана, было 55%, в 1952 г. оно уже достигло 60%, содержание оксида калия и оксида натрия увеличилось лишь немного, а оксидов алюминия, железа (II), кальция и магния существенно понизилось. Особенно быстрое увеличение массы оксида кремния (IV) произошло в 1947 г. О причинах такого значительного изменения химизма лав поговорим немного позднее, а сейчас вернемся снова к рассказу о том, как происходит рождение вулканов.

На другом берегу Тихого океана, в Японии, почти в это же время происходило образование новой вулканической горы. У южной оконечности острова Хоккайдо располагается известный вулкан Усу. В конце декабря 1943 г. здесь было отмечено большое число подземных толчков, центр которых быстро сместился к восточной подошве старого вулкана. В этом месте земная поверхность начала интенсивно подниматься, образуя как бы купол диаметром 4 км. Весь участок поднимался со скоростью примерно 30 см за день и за полгода поднялся на 50 м. И тогда произошел взрыв. Над одним из рисовых полей поднялся столб грязи, пепла и каменных глыб. Здесь появился кратер шириной 50 м, который постоянно выбрасывал каменную глыбы на большую высоту. В кратере образовалось горячее озеро, куда стекли все окрестные воды. Родники и ручьи в пределах поднимающегося купола пересохли, а в окружающих районах стали многоводными и вышли из берегов. Но все глыбы, выброшенные при взрыве, были холодными, излияний настоящей лавы не было. Ученые называют эти взрывы фреатическими. Они происходят в результате резкого вскипания воды на глубине и увеличения давления пара. Наконец, почти через год после начала подземных толчков начались собственно вулканические явления. Из крупной трещины был выдавлен большой холм густой и вязкой андезитовой лавы. Холм постепенно рос в высоту и в ширину и поднялся почти на 300 м. Температура магмы достигала 1000°C, и древние глины, которые здесь залежали, превратились в обожженные кирпичи. Так и вознесся на трехсотметровую высоту новый вулкан Сева-Синдзан в красной шапке из кирпичей. Интересно, что очень многие ценные сведения о росте вулкана были получены деревенским почтальоном, жившим неподалеку. Он наблюдал за извержениями из окна поч-

ты и не только записывал все, что видел, но и делал зарисовки контуров вулкана на бумаге, наклеенной на окне. За рождением вулкана наблюдало и много специалистов-вулканологов, вооруженных чувствительными приборами. Они установили, что в процессе образования Сева-Синдзана произошли значительные изменения магнитного поля. Сейсмическая разведка показала, что магма поднималась с больших глубин. Был установлен химический состав газов, и оказалось, что основную массу в нем составляют пары воды — 96,6%, хлороводорода — 2,1%, сероводорода — 0,7%, водорода — 0,3%.

Хотя эти два вулкана — Парикутин и Сева-Синдзан — образовались почти в одно и то же время, из описания можно видеть, как мало общего в их формировании. Если мексиканский вулкан — это выбросы и накопление лав, туфов и шлаков, то японский — своеобразное вздутие, образованное вязкой породой. Породы вулкана Сева-Синдзан — весьма вязкие андезиты с высоким содержанием в них кремнезема, в то время как при образовании Парикутина изливался очень жидкий базальт с содержанием оксида кремния (IV) от 55 до 60%. Такое отличие в химическом составе вулканических пород определило коренные различия в механизме образования вулканов. Как пишет Г. Тазиев: «...в одном случае пашни и селения были погребены под продуктами выбросов, а в другом — вся окружающая местность была поднята ввысь чуть ли не на триста метров и обращена в выжженную пустыню»¹.

Американский вулканолог Г. А. Макдональд изучал образование новых вулканических жерл на Гавайских островах. В начале 1955 г. на восточном склоне вулкана Килауэа участились землетрясения. С помощью точных приборов — сейсмографов — было установлено место зарождения толчков, которое позволило вулканологам выбрать нужный участок для наблюдения. С каждым днем число подземных толчков росло. Сначала было 6—15 толчков в день, затем 100—300 и наконец 600—700. Становилось ясно, что вот-вот должен произойти вулканический взрыв. На стоящей неподалеку ферме животные также почувствовали приближающуюся опасность. Странно вели себя собаки. Они рыли землю и возбужденно обнюхивали вскрытые норы, вероятно, чувствовали запах вулканиче-

¹ Тазиев Г. Вулканы. М., 1963.

ских газов, проникающих сквозь землю. Извержение началось утром. Поднялся склон холма, дорогу пересекли трещины, а из них забили фонтаны жидкой лавы высотой от 1 до 18 м. Газ, вырывающийся из трещин, поднимал в воздух капли жидкой лавы, которые застывали в стекло. Падая на землю, они создавали шум, похожий на звон разбивающейся посуды. Нагромождение обломков создавало вокруг трещин конусовидные холмы. По соседству открылось еще несколько вулканических жерл. На поверхности земли появились тонкие изогнутые трещины, ширина которых постепенно увеличилась до 5—7,5 см. Из трещин вырывались белые облака удушливого дыма, состоящего из газов сероводорода и оксида серы (IV) с небольшой примесью водорода, кислорода, оксида углерода (IV) и серы. Через несколько минут из трещины были выброшены раскаленные обломки лавы, а затем над ней появился и стал увеличиваться пузырь из расплавленной лавы. Он достиг в диаметре 30—45 см и расплылся. Затем в этом месте забил фонтан жидкой лавы, вокруг которого образовался холм из застывших брызг.

Не следует, однако, думать, что вулканы могут зародиться в любом месте. В центре европейской части нашей страны, в Сибири, на Урале вулканические бури отшумели уже давно, почти 400 млн. лет назад. Сейчас земная кора здесь совершенно успокоилась. Вулканы появляются и появлялись на свет лишь на определенных участках нашей планеты и не в одиночку, а группами, слагая крупные вулканические районы. Так, например, вулкан Парикутин, о рождении которого было рассказано, появился в пределах западной части главной вулканической дуги Мексики. Она представляет собой более чем тысячекилометровую полосу вулканов, протянувшуюся от побережья Мексиканского залива до берегов Тихого океана. В этой полосе находятся самые высокие и самые известные вулканы Мексики: Орисаба, Попокатепетль, Икстацихуатл, Невадо де Толука и другие.

Современные действующие вулканы укладываются в полосы, или зоны, которые располагаются преимущественно на окраинах материков, на берегах морей и океанов, на островах. Ранее предполагалось даже, что извержение происходит в результате проникновения морской воды в глубины Земли. На самом деле приуроченность вулканов к материковым окраинам имеет другие причины: именно

здесь находятся сейчас самые подвижные участки земной коры, области самых активных землетрясений. Что же представляют собой эти подвижные участки земной коры? Современные представления о них получены в основном в последние годы в результате детальных исследований дна океанов.

Большие глубины океана пока недоступны человеку для непосредственного изучения, но с помощью специальных устройств ученые научились отбирать образцы горных пород с океанского дна. Для этого используется драгирование дна океана: с палубы научно-исследовательского корабля на дно опускают специальное захватывающее устройство, которое собирает с грунта обломки камней. Другой способ отбора пород — глубоководное бурение. На воду спускается плавучая платформа, на которой установлено *бурильное устройство*. Буровые трубы, пройдя сквозь толщу воды, вгрызаются в дно и достают оттуда столбик горной породы — керн. Породы, добытые со дна океана, детально исследуют.

Изучение поверхности океанического дна привело к открытию подводных *срединно-океанических хребтов* — горных цепей большой протяженности и высоты среди подводных океанических равнин. В центральной части вдоль осевой линии хребта протягивается глубокий ров, который геологи называют *рифтом*. Такие хребты обнаружены в Тихом, Индийском, Атлантическом океанах. На срединно-атлантическом хребте расположены вулканические области Исландии, Азорских островов и островов Тристан-да-Кунья.

В Исландии вулканическая деятельность происходит уже на протяжении 70 млн. лет. Этот остров сложен двумя базальтовыми полями, толщина которых достигает 1 км. Между ними проходит центральная зона, с которой связаны все проявления современного вулканизма. В последние 10—15 тыс. лет в Исландии действовало не менее 200—300 вулканов. В это время сформировались крупные исландские вулканы, в их числе известная Гекла. Со времени заселения Исландии норвежскими викинг-ами в IX в. вулкан Гекла извергался 15 раз.

В последнем столетии в Исландии было отмечено примерно 20 вулканических извержений на вулканах Аскья, Ватнайокулл, Мундафел-Ламбафит, Катла, Гекла, Суртсей, Хелгафелл. Срединный хребет, на котором находят-

ся эти вулканы, протягивается по центру Атлантического океана, затем огибает Южную Африку, продолжается в Индийском океане, где разделяется на две ветви. Одна направляется на север к Красному морю, другая огибает Австралию с юга и в Тихом океане идет на север параллельно побережью Южной и Центральной Америки. Предполагается, что вдоль линии подводных хребтов происходит раздвигание дна океана в обе стороны, а снизу, из глубины, поступают все новые и новые порции расплавленной магмы. Поэтому вдоль этих зон растяжения располагается большое число подводных действующих вулканов, а также многие вулканические острова в Тихом и Индийском океанах.

Вершины и склоны срединно-океанических хребтов сложены базальтами. Геологи установили, что по направлению от осевой части хребта базальты становятся все более древними. Например, в Тихоокеанском срединно-океаническом хребте возраст базальтов в центральной части составляет 300 тыс. лет, а на некотором удалении от хребта базальты и другие вулканические породы насчитывают уже 3 млн. лет со времени своего образования. Такой возраст, например, имеют вулканические породы острова Пасхи, из которых высечены каменные статуи, упоминаемые норвежским путешественником Туром Хейердалом.

Крупные трещины в земной коре — рифты — известны и на материках Земли. Иногда они переходят из океанов на материк. Выше (с. 35) уже упоминалось об одной из ветвей срединно-океанического хребта в Индийском океане, которая через Красное море соединяется с так называемым Великим рифтом Африки и Аравии. Последний протягивается от Мертвого моря на юг до озер Виктория и Танганьика в Африке. Эта полоса также является зоной активного вулканизма. В окрестностях озер Киву, Эдуард и Альберт молодой вулканизм захватил широкие области. Самые активные вулканы районов Нирагонго и Ньямлагира характерны тем, что здесь изливается базальты с очень низким содержанием оксида кремния (IV) (всего около 40—45%) и богатым содержанием щелочных металлов, особенно калия (до 5—7%). В них содержится много бария (до 1%), стронция (0,4—1%), рубидия, циркония, лантана, иттрия, а также оксиды титана (IV) и фосфора (V).

Нирагонго — один из очень хорошо изученных в последнее время вулканов. Это объясняется тем, что после исчезновения лавового озера Халемаумау на Гавайских островах Нирагонго оказался единственным вулканом с постоянно существующим лавовым озером в кратере. Здесь изливаются лавы, содержащие магматический карбонат кальция. В них содержится меньше 20% оксида кремния (IV) и около 35% оксида кальция. Это очень редкое явление, потому что обычно все лавы являются преимущественно силикатными расплавами.

На территории Аравийского полуострова вдоль зоны рифта также отмечается вулканическая деятельность. Действующие вулканы расположены в северной половине восточного побережья Красного моря. Последнее извержение вулкана произошло здесь в 1260 г. неподалеку от мусульманской святыни — Медины.

В нашей стране такой же крупной трещиной в земной коре является известный Байкальский рифт. Он тянется на несколько тысяч километров от монгольского озера Хубсугул, через озеро Байкал и крупные горные цепи на севере Забайкалья, в тех местах, где идет сейчас строительство Байкало-Амурской магистрали. Действующих вулканов вдоль этой трещины сейчас нет, но совсем недавно (по геологическим понятиям, конечно, каких-нибудь 4—5 млн. лет назад) здесь изливались базальты, которые слагают крупные покровы и отдельные потухшие вулканы центрального типа. Остатки этих вулканов можно видеть и сейчас, стоит лишь подняться на Витимское плоскогорье или хребет Удокан.

Есть еще много других мест на Земле, где зарождаются вулканы. Больше всего их расположено на окраинах материков. Недалеко от них на дне океана протягиваются глубоководные желоба. Между этим желобом и континентом находятся многочисленные острова, образующие архипелаги в виде дугообразных цепочек. Геологи называют их *островными дугами*. Многочисленные действующие вулканы располагаются либо на островах, либо на окраине материка. Они известны на побережьях Америки и Азии. Вероятно, к этому типу относятся также вулканы бассейна Средиземного моря и Антильских островов. У нас в Советском Союзе на окраине Азиатского материка находятся действующие вулканы Курило-Камчатской островной дуги, которая тянется от острова Хок-

кайдо вдоль больших Курильских островов и Юго-Восточной Камчатки. Вблизи берегов Камчатки и Курильских островов расположены многочисленные подводные вулканы.

Если в центральных частях океана вдоль линий срединно-океанических хребтов происходит растяжение, раздвигание океанического дна с образованием зияющей расселины, то вдоль окраин материков, наоборот, происходит сжатие земной поверхности. Поэтому вдоль окраин континентов часто образуются высокие горы, как бы выдавленные сжатием. Здесь происходит очень много землетрясений, вулканических извержений. Ученые считают, что в таких местах морское дно постепенно уходит на глубину Земли, под материк, и там слагающие его горные породы переплавляются. В этих районах вулканические породы представлены преимущественно андезитами, т. е. лавами, в которых содержание оксида кремния (IV) составляет 55—62%. Установлены очень интересные закономерности изменения химического состава лав. Чем дальше от берега океана находится вулкан, тем больше в его лавах содержится оксида калия. Если в лавах вулканов, располагающихся около глубоководного желоба, этого оксида примерно 0,3—0,4%, то в лавах вулканов, наиболее удаленных от берега, — 2—3%. Оказалось также, что соответственно увеличивается глубина эпицентров землетрясений.

Ученые с помощью сложных экспериментов установили, что содержание оксида калия в лавах зависит от давления, при котором образуется магма: чем выше давление, тем больше оксида калия содержится в магме. Так был сделан вывод, что магма, из которой образуются континентальные базальты, сформирована на большей глубине и при более высоком давлении, чем магма океанических базальтов.

На земной поверхности существуют также вулканы, которые не относятся ни к одной из упомянутых зон. Они располагаются совершенно обособленно и развиваются в течение длительного времени. Это, например, гавайские вулканы в самом центре Тихого океана. Для объяснения появления вулканов в таких местах была предложена очень интересная гипотеза о существовании «горячих точек» в литосфере. Что же это такое? Из курса физики вам должно быть известно о *конвекции*. Это

явление можно наблюдать при нагревании воды на огне: горячие струи поднимаются снизу, а холодные опускаются вниз. Предполагают, что такое тепловое перемешивание происходит и в глубоких частях Земли. Из глубин Земли к ее поверхности идет поток теплоты. Этот тепловой поток невелик в спокойных областях земного шара. А в тех областях, где действуют вулканы, где происходят землетрясения, тепловой поток очень значителен. Поэтому появление «горячих точек» объясняют подъемом горячих струй из глубин, которые постепенно проплавливают твердую земную кору. В результате образуется магма, ведущая к формированию вулканов.

Таким образом, поверхностная активность всех земных вулканов объясняется процессами, происходящими в недрах Земли, и громадная разрушительная сила вулканических извержений является лишь слабым отголоском этих поистине грандиозных процессов. На какой глубине зарождаются вулканы, точнее, магма, которая при подъеме к поверхности Земли является причиной вулканических извержений?

Наши сведения о глубинах Земли основаны на данных геофизической науки, т. е. физики Земли. Максимальная глубина, достигнутая человеком, составляет всего 10 км. Именно до этой глубины была пробурена сверхглубокая скважина на Кольском полуострове. С этой глубины можно отобрать образцы горных пород, изучить их минеральный, химический состав. Большие глубины (а до центра Земли они составляют 6370 км) пока недоступны человеку для непосредственного наблюдения. Но, используя геофизические методы исследования, ученые получили некоторые данные о глубинном строении Земли, а также о глубине, на которой зарождаются вулканы. Прежде всего это было выяснено сейсмическими методами. Они основаны на том, что в веществах разного химического состава и разного физического состояния с разной скоростью распространяются упругие сейсмические волны, которые возникают при землетрясениях или специально вызываются с помощью подземных взрывов. Эти волны отражаются от различных неоднородностей, от границ раздела слоев, преломляются в них. Затем такие волны регистрируются специальной аппаратурой. Амплитуда их колебаний очень мала и измеряется микрометрами, поэтому слабый электрический сигнал с

сейсмоприемников, этих своеобразных микрофонов для Земли, нужно усилить в сотни тысяч раз. В аппаратуре используются усилительные каналы, электронные блоки синхронизации, отсчета времени, электромеханическая аппаратура записи.

Различают два типа сейсмических волн: продольные и поперечные. Скорость их распространения зависит, помимо других причин, от плотности и вязкости вещества. Регистрируя скорости этих волн и сравнивая полученные результаты с имеющимися экспериментальными и эмпирическими данными, определяют плотность и вязкость вещества, слагающего глубины земного шара. Сейсмические методы позволяют различать, в каком состоянии — жидком или твердом — находится вещество.

Возможность применения сейсмических методов для изучения областей зарождения магм под вулканами основана на том, что в жидкостях затухание сейсмических волн значительно больше, чем в твердых телах. Это было подтверждено экспериментально американскими учеными, определившими скорости прохождения волн в цилиндре льда, в котором находились карманы, наполненные рассолом хлорида натрия. Позже эти выводы были подтверждены и для расплавов базальтов. Таким способом под вулканами среди твердых горных пород были выявлены линзы веществ, которые по физическим свойствам больше приближались к жидкости. Эти линзы считаются резервуарами расплавленной магмы, или *магматическими очагами*. Размеры их могут быть значительными: диаметр до 25—35 км и объем до 10—20 тыс. км³. Впервые положение таких очагов на глубинах 50—75 км определил советский вулканолог Г. С. Горшков для Ключевского вулкана на Камчатке. Несколько таких магматических камер было установлено на Аляске на небольшой глубине. Магматические очаги связаны с поверхностью Земли каналами, по которым к действующим вулканам поднимаются расплавленные лавы и газы.

Главная зона образования магмы под вулканами, по современным данным, находится на глубинах 120—300 км. На рисунке 11 можно видеть эти зоны под Японией и Перуанско-Чилийской областью Южной Америки. Положение области выплавки магм показано штриховкой, а область эпицентров землетрясений — точками. Какой химический состав может иметь вещество на этой

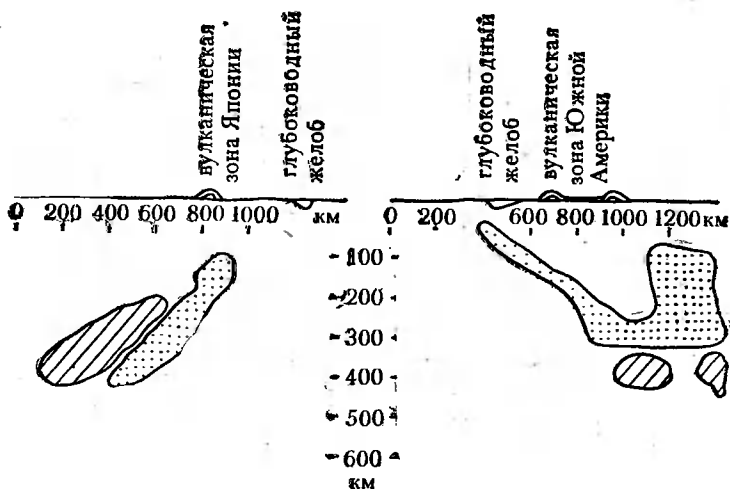


Рис. 11. Область образования магм на глубине (заштрихованные участки) и области эпицентров землетрясений (точки).

глубине и в каком состоянии оно находится? Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо кратко осветить основные представления о строении Земли. По данным сейсмологии, наша планета разделяется на три основные зоны: кору, *мантию* и ядро. Границы их определяются по скачкообразному нарастанию плотности. Земная кора распространяется на глубину в среднем от 6 до 33 км, мантия — от 33 до 2800 км, ядро — 2900—6370 км. Таким образом, вулканические очаги находятся в верхней мантии и в нижней части земной коры. Здесь выделяется слой постоянной мощности с плотностью $2,8 \cdot 10^{-3}$ — $2,9 \cdot 10^{-3}$ кг/м³, что характерно для базальтов. Поэтому этот слой называется базальтовым. Выше его на континентах располагаются менее плотные породы, плотностью $2,6 \cdot 10^{-3}$ — $2,7 \cdot 10^{-3}$ кг/м³, что соответствует по физическим свойствам смеси полевых шпатов и кварца. Это типично для гранитов, поэтому и слой называется гранитным. Граница между гранитным и базальтовым слоями носит название *поверхности Конрада*, нижняя граница базальтового слоя называется *поверхностью Мохоровичича*. Границы раздела названы по именам ученых, кото-

рые их открыли. Предполагают, что эти границы делят зоны разного химического состава.

На границе Мохоровичича, т. е. на границе между мантией и земной корой, снизу вверх резко снижается содержание магния, железа. В верхней мантии обнаруживают большое количество силикатов магния (Mg_2SiO_4 , $MgSiO_3$) и железа, а также минералов ильменита ($FeTiO_3$) и шпинели ($MgAl_2O_4$). Высокая вязкость вещества мантии показывает, что оно находится в твердом состоянии. Но на глубине примерно 350 км под океанами и 100—250 км под островными дугами находится слой пониженной вязкости, который называется волноводом или астеносферным слоем. Для него возможно частично жидкое состояние. Это зона выборочного плавления, потому что под спокойными участками земной коры она отсутствует. Химический состав вещества базальтового слоя по сравнению с веществом мантии характеризуется пониженным содержанием магния и железа, титана и хрома, но более высоким содержанием кальция, бария, появлением заметных количеств калия, натрия и алюминия. Плотность слоя соответствует плотности смеси пироксенов ($CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$ и $CaO \cdot FeO \cdot 2SiO_2$) и плагиоклазов ($CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$). И наконец, гранитный слой по химизму характеризуется высоким содержанием оксидов кремния (IV), алюминия, натрия и калия.

Помимо геофизических источников информации, являющихся косвенными, есть и прямые свидетельства химического состава вещества глубин. Это обломки, вынесенные из глубины вулканами. Эти обломки называют ксенолитами (от греч. «ксенос» — *чуждый*). Их образование не связано непосредственно с вулканической деятельностью.

Еще одним источником информации о состоянии вещества в недрах Земли являются результаты многочисленных физико-химических экспериментов. Расплавляя различные горные породы при разных температурах и давлениях, ученые изучают их свойства. Используя современные данные об условиях существования горных пород, исследователи делают вывод о том, каким должно быть вещество, находящееся на глубинах нашей планеты. Основным условием, необходимым для успешного проведения эксперимента, является то, что из вещества очень легко должна получаться базальтовая магма. Этот

вывод был сделан потому, что базальты являются наиболее характерными вулканическими породами, которые формировались на протяжении всей шестимиллиардной истории Земли. В общем, и современные и древние базальты близки друг к другу по своему химическому составу. Из базальтовой магмы при ее разделении могут быть получены все остальные вулканические породы, существующие на земной поверхности. Поэтому базальтовая магма считается исходной, или «материнской», по отношению к другим вторичным магмам.

Потенциальным источником базальтовой магмы могут быть такие горные породы, которые имеют близкий к ней химический состав и из которых базальтовая магма может быть получена при полном или частичном расплавлении. Считается, что наиболее вероятным веществом верхней мантии Земли является гранатовый перидотит. Это порода, в которой содержание оксида кремния (IV) не превышает 45—48%. Очень высоко в этой породе содержание оксидов железа (II и III). Оксид алюминия, наоборот, характеризуется низким содержанием — не более 4—5%.

Минеральный состав гранатового перидотита очень своеобразен. Многие минералы, устойчивые на земной поверхности, не могут существовать в условиях чудовищных давлений в верхней мантии, которые достигают 1000—1500 МПа. Поэтому вместо плагиоклаза $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ появляется гранат $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$, образуется магнезиально-алюминиевый минерал шпинель MgAl_2O_4 . Другие минералы, такие, как оливин $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ и $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$, пироксены $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ и $\text{FeO} \cdot 2\text{SiO}_2$, устойчивы в верхней мантии. Поэтому считается, что минеральный состав вещества верхней мантии определяется ассоциацией: оливин + пироксен + гранат + шпинель.

Экспериментальные исследования по частичному плавлению гранатового перидотита показали, что при определенных температуре и давлении из гранатового перидотита можно выплавить расплав, соответствующий по химическому составу базальтовой магме. Поэтому гранатовый перидотит считается наиболее вероятным веществом, слагающим Землю на глубинах 30—500 км. А именно с этой глубиной и связаны все основные вулканические процессы на земной поверхности,

КАК И ПОЧЕМУ ПРОИСХОДЯТ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНОВ

Одним из наиболее катастрофических явлений природы являются взрывные извержения вулканов. Этот тип получил название пелейского извержения по вулкану Мон-Пеле на острове Мартиника. Извержение этого вулкана 8 мая 1902 г. в считанные мгновения уничтожило город Сен-Пьер с его тридцатью тысячами жителей.

Поначалу как будто ничего не предвещало извержения. Но в конце 1901 г. начались подземные толчки. Время от времени вулкан выбрасывал небольшие тучи пепла. 8 мая произошел сильный, направленный вбок взрыв, который сорвал часть вулканической горы. В результате образовалась огромная черная туча, состоящая из горящих газов и раскаленных обломков. Со скоростью около 450 м/с туча понеслась вниз по склону. Испуганные жители не успели ничего предпринять, как туча докатилась до их города, расположенного в 9 км от вулкана. В последнем сообщении по телефону в соседний городок Фор-де-Франс говорилось, что на город оседает вулканическая пыль, затем послышался непонятный шум, сильный удар, и все стихло.

Раскаленная туча уничтожила город. Самые толстые деревья были вырваны с корнем или сломаны, каменные стены домов разрушены до основания. Громадная трехтонная статуя была сброшена с пьедестала и отлетела на 12 м. В гавани города в момент взрыва находилось много судов. Большинство из них было перевернуто и сожжено. В самом городе уцелел лишь один человек — заключенный, который находился в подземной темнице

с маленьким зарешеченным окном, выходявшим в сторону, противоположную вулканическому взрыву. Под действием палящей тучи, температура которой достигала $700-1000^{\circ}\text{C}$, многие районы города сгорели. Воспламенились обильные запасы ямайского рома на складах, что еще более увеличило количество пожаров.

Ученые считают, что высокая скорость палящей тучи объясняется большой мощностью начального взрыва, действием обломков, несущихся по склону вулкана, а также реактивной силой, которая возникает в результате продолжающегося выделения газов из обломков. Боковой взрыв вулкана Мон-Пеле произошел потому, что жерло вулкана было закупорено пробкой из полужатвердевшей лавы, которая под влиянием давления постепенно выдавливалась вверх. Эта лава была настолько вязкой, что не разлилась и даже не расплзлась, а образовала столб — лавовый обелиск (рис. 12). Обелиск этот достигал в 1902 г. высоты 400 м. Ночью раскаленная глыба обелиска светилась фантастическим огнем.

А вот последствия вулканического извержения совсем другого рода, отразившиеся на жизни людей за многие тысячи километров от извергающегося вулкана: в июне выпал снег, в июле и августе стояли морозы. Таким было печально знаменитое лето 1816 г. для Западной Европы, Канады, ряда штатов на северо-востоке Америки. Цепь событий началась в 1815 г., когда произошло грандиозное извержение вулкана Тамбор на острове Сумбава в Индонезии. Полтора километра вулканической горы было снесено взрывом. Высота ее понизилась с 4300 до 2821 м. Вулкан выбросил громадное количество пыли в атмосферу. Очевидцы, пережившие это извержение, рассказывали, что подземные толчки и канонада ощущались



Рис. 12. Лавовый обелиск вулкана Мон-Пеле.

на расстоянии более 400 км от вулкана. Небо в полдень было затемнено облаками пепла. Солнце окутано черной пеленой, сквозь которую не могли пробиться его лучи. Зола и пепел покрывали дома, улицы и поля слоем до 10—15 см. Среди темноты время от времени раздавались взрывы, подобные артиллерийским залпам. В течение четырех лет после описанных событий мореплаватели встречали в океане большие острова плавучей пемзы. Считается, что это самый большой выброс вулканической пыли в атмосферу с 1600 г. по наши дни. Пыль циркулировала в высоких слоях стратосферы в течение нескольких лет, отражая солнечные лучи и тем самым уменьшая количество солнечной энергии, попадающей на Землю. Эта пыль не сразу попала в высокие широты. Первые два месяца весны 1816 г. были не очень холодными. Июнь начался благоприятно, но уже 6 июня в ряде штатов на северо-востоке США выпал снег. Вторая волна холода пришла в начале июля. Лужи покрылись льдом. Повторяющиеся морозы уничтожили все посевы и нанесли неисчислимый ущерб сельскому хозяйству.

На рисунке 13 можно видеть, как далеко разносится вулканический пепел в атмосфере. После извержения исландского вулкана Гекла 29 марта 1947 г. пепел от этого взрыва уже через два дня, т. е. 31 марта, был перенесен на территорию Финляндии.

Совершенно по-иному происходило извержение вулкана Лаки в Исландии в 1783 г. В южной половине острова образовалась крупная трещина в земле, из которой полились мощные потоки жидкой лавы. Кроме того, вдоль трещины появилось несколько мелких кратеров, из которых выбрасывался пепел. Через несколько дней трещина значительно увеличилась в размерах и достигла в длину 25—30 км. Вновь произошли сильные взрывы, выбросы огромных туч черного пепла и мощные излияния жидкой лавы. Для вулкана Лаки вулканические взрывы и выбросы пепла нехарактерны. Это произошло потому, что вулканическая трещина прошла под ледником. Вода, образовавшаяся при таянии льда, проникла в трещину и, как только дошла до раскаленной магмы, мгновенно испарилась. Колоссальный взрыв пара на глубине и дал большое количество пепла. Затем из трещины началось излияние лавы. Лавовые потоки двигались в юго-западном направлении, через два дня достигли доли-

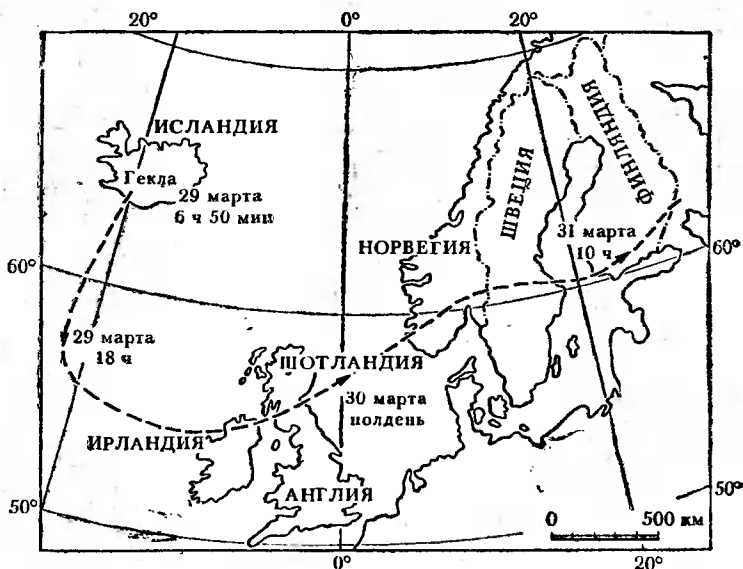


Рис. 13. Перемещение пепла в атмосфере после извержения вулкана Гекла в 1947 г.

ны р. Скафтау и стали продвигаться по ней. За один день лава продвинулась на 15 км и вскоре заполнила долину до краев, а затем перелилась за ее борта. В общей сложности из трещины вылилось 12 км³ лавы и было выброшено около 3 км³ пепла. Жидкая лава покрыла площадь около 600 км². Извержение этого вулкана также принесло большой вред населению. Почти вся Исландия была покрыта слоем пепла, трава высохла. Пало четверть миллиона голов домашнего скота, что составляло три четверти всего поголовья. Из-за плохой видимости, вызванной голубоватой дымкой сернистых газов, почти прекратилось рыболовство. В стране начался страшный голод. Из 50 тыс. человек, населявших в то время Исландию, погибло от голода и болезней более 10 тыс. человек.

На этих трех примерах показано, как мало общего имеется между извержениями, за исключением катастрофических последствий и большого вреда, нанесенного человечеству. В извержениях вулканов Мон-Пеле и Тамбор главную роль играл взрыв колоссальной силы, уни-

чтожающий горы, а для извержения вулкана Лаки характерно относительно спокойное выливание жидкой лавы из трещины. Эти примеры — лишь малая часть типов вулканических извержений, которых насчитывается более 20. Какие же причины вызывают их разнообразие? Чтобы разобраться в этом вопросе, необходимо вспомнить некоторые физические и химические законы для жидкостей и газов, которым подчиняются многие вулканические процессы.

В главе 1 уже было рассказано о разделении вулканических пород по химическому составу. Этот состав очень различен. Его находят химическим анализом уже застывших лав или отбирают пробы для анализа, непосредственно «зачерпывая» расплавленную лаву. Затем пробы горной породы с помощью реактивов переводят в раствор. Специальными методами в них определяют содержание главных породообразующих оксидов: кремнезема, глинозема, оксидов железа, магния, кальция, натрия и калия, а также воды, углекислого газа и некоторых других компонентов. В последнее время в породах все чаще исследуют состав микрокомпонентов: Pb, Zn, Cu, Cr, Ni, Co, Rb, Sr, Mo, W, Sn, Li и др. Методы, с помощью которых определяют содержание этих элементов и оксидов, весьма разнообразны, и их рассмотрение не входит в нашу задачу. Отметим лишь, что для главных породообразующих оксидов они основаны на химическом анализе, а для микрокомпонентов — на спектральном анализе.

Химический состав вулканических пород во многом определяет тип вулкана. Одной из основных причин этого является зависимость вязкости магматического расплава от его химического состава. С явлением вязкости жидкостей мы неоднократно сталкиваемся на опыте. Если вылить на какую-либо поверхность две различные жидкости, например воду и глицерин, то можно видеть, что они растекаются по-разному. Одинаковое количество воды быстро и более тонким слоем покрывает значительно большую поверхность, чем глицерин. Мы говорим в таких случаях, что вязкость глицерина выше, чем вязкость воды. Вязкость или внутреннее трение жидкости раньше измерялась в специальных единицах, которые назывались пуазами, но с введением Международной системы единиц (СИ) динамическая вязкость измеряется в пас-

калях в секунду (Па·с). Один пуаз равен 0,1 Па·с. Вязкость воды при 20°C составляет 0,001 Па·с, а вязкость глицерина при той же температуре — 1 Па·с. Разумеется, вязкость вулканических расплавов намного выше, чем у воды или даже у глицерина. Ее измеряют на специальном приборе, который называется вискозиметром. Метод определения основан на измерении сопротивления, которое расплав оказывает какому-либо телу, например шарiku определенного размера и массы. Вязкость рассчитывают по уравнению Стокса:

$$\eta = k \cdot g r^2 \cdot \frac{\rho - \rho_1}{v},$$

где g — ускорение свободного падения, r — радиус шарика, ρ — плотность шарика, ρ_1 — плотность расплава, v — скорость погружения шарика в расплаве, k — коэффициент.

Экспериментальным путем в расплавах базальтов и андезитов были установлены следующие значения вязкости: для базальтов — 90 Па·с при 1150°C и 20 Па·с при 1300°C. Для кислых пород (для расплава ортоклаза) вязкость составляет 50 млн. Па·с при 1200°C и 1 млн. Па·с при 1300°C. Из приведенных цифр можно увидеть, что вязкость кислых лав в сотни тысяч раз превышает вязкость базальтов.

При появлении высокого давления в магматическом очаге и образовании трещин жидкая базальтовая лава начинает относительно спокойно вытекать из канала ствола и, изливаясь, покрывает громадные площади. При этом происходит так называемое трещинное извержение вулкана. К этому типу принадлежит описанное выше извержение вулкана Лаки. В более вязких лавах, к которым принадлежат кислые и щелочные, застывание происходит быстрее. Застывшая вязкая лава закупоривает канал ствола, давление в магматическом очаге резко возрастает, и в конце концов происходит катастрофический взрыв. Такой процесс наблюдался при извержении вулкана Мон-Пеле. При этом начальная магма имела андезитовый состав и содержала 61,6% оксида кремния (IV). Но в результате оседания кристаллов, содержащих большое количество железа, магния, кальция, т. е. при процессе магматической дифференциации, состав остающейся лавы стал более кислым (липаритовый) с содержани-

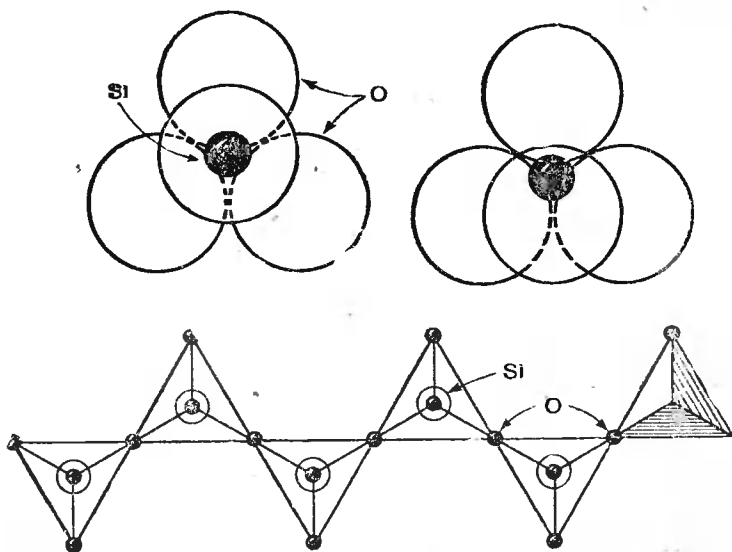


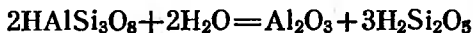
Рис. 14. Вверху — кремнекислородный тетраэдр в кислом расплаве (вид сверху и сбоку); внизу — цепочка кремнекислородных тетраэдров.

ем 72,4% оксида кремния (IV) и вязкостью в 10 млрд. большей, чем вязкость воды.

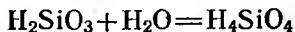
Зависимость типа вулканических извержений и вязкости лавы от ее химического состава была замечена уже давно. Эмпирически было установлено, что чем больше в магме содержится оксида кремния (IV) по сравнению с оксидами металлов (Fe, Mg, Ca и др.), тем выше ее вязкость. И только в последнее время это правило получило научное объяснение. При рентгенографическом изучении расплавов оказалось, что кремний в силикатном расплаве, так же как и в минералах, связан в кремнекислородные тетраэдры (рис. 14). Каждый тетраэдр состоит из одного атома кремния и четырех атомов кислорода. В структуре остаются свободными четыре связи. Часть из них занимает атомами металлов — калия, натрия, кальция, магния, а часть свободных связей может присоединять другие кремнекислородные тетраэдры. Чем выше в расплаве содержание ионов SiO_4^{4-} , тем больше свободных связей, тем выше возможность

присоединения других тетраэдров с образованием цепочек и каркасов. Этот процесс полимеризации приводит к ограничению способности жидкости изменять свою форму, т. е. течь, и таким образом повышает ее вязкость. Так происходит с липаритовыми лавами. В базальтовых лавах много атомов металлов — железа, магния, кальция и др., поэтому в кремнекислородных тетраэдрах почти нет свободных связей и расплав состоит из отдельных, не связанных друг с другом, тетраэдров, что определяет его пониженную вязкость.

Другой механизм изменения вязкости связан с проникновением воды в силикатные расплавы. Это приводит к существенному преобразованию химических свойств и структуры расплава. Среди кремниевых кислот наиболее сильными являются алюмокремниевые. В их ряду $\text{HAlSi}_3\text{O}_8 \rightarrow \text{HAlSi}_2\text{O}_6 \rightarrow \text{HAlSiO}_4$ происходит уменьшение силы кислот в соответствии с уменьшением соотношения кислорода к водороду. При растворении воды в растворе в изотермических условиях происходит разложение алюмокремниевых кислот:



Таким образом, с увеличением воды алюмосиликатные расплавы превращаются в силикатные. В результате понижается химическое сродство расплавов с щелочными металлами и снижается вязкость расплавов. Это происходит потому, что гидратация кремниевых кислот сопровождается их деполимеризацией. Метакремниевые кислоты (листовые, ленточные, цепочечные) превращаются в расплавах в ортокремниевую кислоту с изолированными кремнекислородными тетраэдрами:



Помимо изменения вязкости, вода нейтрализующе действует на кислый расплав. Но в целом влияние воды на кислотно-щелочные свойства расплава невелико. Более важную роль играет понижение температуры кристаллизации расплавов с повышением давления воды и ее растворением.

Однако не только химический состав расплавов и содержание воды в них определяют вязкость вулканиче-

ских лав и, соответственно, характер извержения вулкана. Количество растворенных газов в магме также имеет значение, но влияние этого фактора двойко. При очень большом количестве пузырьков газа в жидкости ее вязкость увеличивается. Это можно проследить на примере обычной мыльной пены. Пересыщенная пузырьками воздуха пена не может течь. Эту способность она приобретает, когда часть пузырьков лопаются. Примесь газа может значительно снизить вязкость лавы. При образовании газовых пузырьков даже кислая лава может течь подобно жидкости. В результате возникают так называемые *игнимбритовые* извержения. Механизм этих извержений иногда сравнивают со вскипанием молока. Кислая лава, богатая газами, как бы образует пену, эмульсию газа с небольшим количеством твердых частиц. Эта весьма подвижная масса может течь на большие расстояния и образовывать большие площади покрова малой толщины. Многие миллионы лет назад такой тип извержений был очень распространен. Древние толпы игнимбритов отмечают во многих районах земного шара. Среди современных извержений учеными было установлено лишь два, которые можно отнести к игнимбритовым. Это извержения вулканов Катмай на Аляске и Безымянный на Камчатке.

Непосредственных очевидцев извержения вулкана Катмай нет, потому что жившие поблизости заскисли, напуганные землетрясениями, предшествовавшими взрыву, покинули опасные места. Поэтому последовательность событий была восстановлена учеными позже. В 1912 г. из многочисленных жерл, расположенных в верховьях долины реки, вспенившись, показалась взвесь, состоящая из раскаленного песка и пемзы. Каждая частица в ней была окружена газом. Подобно жидкой массе эта раскаленная лава «потекла» вниз по долине, затапливая и обугливая деревья на расстоянии 23 км. Дно долины было превращено в плоскую равнину шириной около 4 км. Это место получило название Долина Десяти Тысяч Дымов из-за многочисленных фумарол, которые образовались на месте извержения вулкана. Пепел, выброшенный в воздух при извержении вулкана, уничтожил всю низкую растительность в радиусе 160 км и почти на 20% уменьшил солнечную радиацию в местах, удаленных на 3200 км. Он покрыл площадь в 260 тыс. км². На рассто-

янии 160 км толщина его слоя составила 30 см. Подсчитано, что при этом извержении в воздух выделилось 1,3 млн. т соляной кислоты HCl и 200 тыс. т плавиковой кислоты HF . Кислотные тучи, занесенные ветром далеко на юг, в Чикаго, потравили вывешенное на просушку белье.

Более детально изучено извержение вулкана Безымянный на Камчатке в 1955—1956 гг. Сейсмическая лаборатория в поселке Ключи, удаленном на 45 км к северу от вулкана, зарегистрировала первое небольшое землетрясение 29 сентября 1955 г. Вплоть до 5 октября происходило ежедневно по одному землетрясению, затем — от четырех до десяти в день. Начиная с 11 октября число землетрясений составляло уже сто — двести за одни сутки. Извержение началось ранним утром 22 октября. Сначала были видны клубы белого дыма, затем с все возрастающей интенсивностью начались выбросы темного пепла. Выделяющиеся из кратера со скоростью до 5 м/с столбы черного дыма поднялись на высоту 8 км. Пелена пепла была настолько густой, что не пропускала солнечные лучи. На расстоянии 45 км от вулкана в домах зажигали огни, машины шли с зажженными фарами. Основной взрыв произошел 30 марта 1956 г. Над Безымянным взметнулся косой огненный столб, наклоненный под углом 30° к горизонту. Над ним поднялись клубы дыма, которые спустя несколько минут скрыли все окрестные вершины гор и горизонт. Верхняя кромка тучи достигла высоты 35 км. Туча яростно клубилась и постоянно меняла свои очертания. Она была очень плотной и, по словам известного советского вулканолога Г. С. Горшкова, казалась осязаемо тяжелой. Когда туча прошла через зенит, начался пеплопад. В поселке Ключи сначала падали отдельные песчинки, но постепенно пеплопад сгустился, и наступила сплошная тьма, прорезаемая молниями. Воздух был насыщен электричеством, сами собой звонили телефоны, перегорали репродукторы радиотрансляции. Сильно пахло серой. К вечеру пеплопад уменьшился. За три с половиной часа это селение покрылось слоем пепла толщиной 2 см. А общий объем выброшенного вулканом пепла составил не менее 500 тыс. м^3 . Пепел, поднятый ветром в верхние слои атмосферы, достиг Северного полюса, а на четвертый день — Англии. Грандиозными оказались и последствия

вулканического взрыва. Вершина горы (почти 200 м) была снесена взрывом, и на ее месте образовалась глубокая кальдера. Долина реки Хапицы, истоки которой находились у подножья вулкана, оказалась на протяжении 18 км засыпанной мощным слоем пепла, вулканического песка и каменных глыб. На всем протяжении на ровной поверхности дымились тысячи фумарол. База вулканологов, расположенная в 12 км от вулкана, была буквально стерта с лица Земли. Под мощной толщей раскаленного рыхлого материала, покрывшего площадь 100 км², началось таяние снегов. Бурные потоки грязной воды несли с собой глыбы и обломки скал. В ноябре 1956 г. извержение закончилось.

В кальдере, образовавшейся при взрыве, сформировалось два лавовых купола, которые затем слились в один купол высотой 320 м.

Общая энергия, высвободившаяся при извержении вулкана Безымянный, оценивается в $3,6 \cdot 10^{18}$ Дж.

Одним из самых крупных извержений за последнее столетие является извержение вулкана Толбачик на Камчатке, происходившее в июле — сентябре 1975 г. Это один из самых активных вулканов гавайского типа на Камчатке. Его высота достигает 3085 м. На вершине вулкана располагается кальдера диаметром 3,7 км, а в ней — кратер диаметром 300 м и глубиной 150 м. В кратере периодически возникает небольшое лавовое озеро. В конце июня 1975 г. в этом районе произошли землетрясения, изучение которых позволило уверенно предсказать время и место приближающегося извержения. Оно началось 6 июля в 18 км к северу от вулкана. Здесь образовалась трещина, вытянутая на северо-запад, вдоль которой сформировались четыре вулканических жерла. В течение двух недель из них происходили выбросы огромных объемов газов, *пирокластики*, вулканических бомб. Затем потекла базальтовая лава плотностью 2 г/см³ и вязкостью $2 \cdot 10^6$ Па·с. На соседних участках также образовались трещины, и произошли новые выбросы вулканических бомб и излияния потоков лавы. 15 сентября на 72-й день извержения северный вулкан затих. Но 18 сентября после новой серии землетрясений базальтовая лава прорвалась уже в 10 км к юго-западу от центрального вулкана. В этом месте появилась тектоническая трещина длиной 600 м. По всей ее протяженности на высоту до

40 м забили лавовые фонтаны. Затем начала изливаться лава. К концу сентября извержение затихло.

Что же происходило с самим вулканом Толбачик? Он почти не функционировал. Вся колоссальная подземная энергия была направлена на два периферических извержения. На самом вулкане обрушился вершинный кратер. Возникший провал составлял в поперечнике около 1700 м и имел глубину более 400 м. Это происходило вследствие того, что большие массы вулканического вещества были выброшены при извержениях и под самим вулканом Толбачик образовалась пустота. В эту пустоту и осела вершина вулкана. Всего за время извержения Толбачика было выброшено около 2 км³ вулканических продуктов общей массой 2,6·10⁹ т. По своим масштабам это самое крупное известное извержение на Камчатке и Курилах.

Выше уже отмечалось (с. 43), что исходная магма, которая образуется в глубинах Земли, имеет преимущественно базальтовый состав, т. е. содержит значительное количество магния, железа, кальция. Возникают вопросы: каким образом формируются кислые лавы, т. е. лавы с высоким содержанием оксидов кремния (IV), алюминия, калия, натрия? Как образовалась лава вулканов Катмай и Безымянный, высокая вязкость которой вызвала столь катастрофические извержения?

Вулканологи, изучая последовательность действия вулканов, уже давно заметили, что химический состав лав может значительно меняться во времени от одного извержения к другому. Чаще всего это изменение идет от основных пород к кислым: в лавах повышается содержание кремнезема и снижается количество железа, магния, кальция. Например, вулкан Сан-Франциско в районе Йеллоустонского парка в Северной Америке насчитывает пять последовательных стадий извержения, каждая из которых характеризуется определенным химизмом лав. В ранние стадии преобладали андезиты, т. е. породы с содержанием оксида кремния (IV) 55—60%. В поздние стадии извергались более кислые породы — риолиты. Изменение химического состава лав, хотя и не столь отчетливо выраженное, отмечается для многих вулканов мира. В качестве примера можно привести упоминавшийся ранее вулкан Парикутин, в лавах которого за девять лет извержений содержание оксида кремния (IV) возросло на 9% (рис. 10). Причиной этого явля-

ются сложные физико-химические процессы в магме, которые геологи и вулканологи называют *дифференциацией* (от лат. *differentia* — *различие*). Для объяснения этого явления предложено большое число гипотез, многие из них подтверждены лабораторными экспериментами.

Дифференциация происходит следующим образом. Магматический расплав на глубине постепенно охлаждается и начинает застывать. При высоком давлении, существующем в недрах Земли, происходит кристаллизация расплава, т. е. из расплава выделяются кристаллы. Первыми по физико-химическим законам выделяются кристаллы железисто-магнезиальных минералов: пироксенов, оливина и др. Будучи тяжелее расплава, они оседают в нижней части магматической камеры, захватывая с собой железо, магний, кальций. Остающийся в верхних частях расплав обедняется этими компонентами и, соответственно, обогащается кремнеземом, калием, натрием. Так постепенно из первичной основной магмы происходит образование кислой, риолитовой магмы. Поэтому из одного и того же вулкана могут изливаться лавы как основного, так и кислого состава. Бывает так, что два близко расположенных вулкана значительно отличаются составом лав, характером своих извержений и представляют различную опасность. Например, среди итальянских вулканов Этна менее опасна по сравнению с Везувием. Хотя Этна почти все время находится в активном состоянии, ее лавы обладают меньшей вязкостью, и поэтому они стекают по склонам более спокойно. Этот сицилийский вулкан даже в кратковременные периоды между извержениями посещают туристы. А недавно, когда после извержения в сентябре 1979 г. доступ на вершину был закрыт, группа итальянских туристских проводников попыталась даже организовать в кратере Этны футбольный матч. Однако они были вынуждены отказаться от этого, так как произошли новые взрывные извержения вулкана.

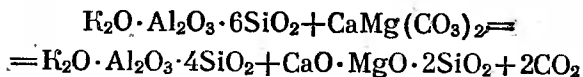
У Везувия, который сейчас находится в состоянии покоя, большая густота лав приводит к тому, что извержения вулкана происходят очень бурно. Он очень коварен. Например, в 79 г. в результате внезапного извержения под покровом пепла и лавы были погребены три древнеримских города: Помпеи, Геркуланум и Стабия,

Около 10 тыс. лет назад, когда началась жизнь Везувия, сформировались два крупных вулканических конуса: Старая и Новая Somma. Конус Новой Somмы затем был размыв и покрыт густой растительностью. В его кратере находили убежище восставшие рабы из отряда Спартака. Начало извержения Везувия в этот период относится к 63 г., когда произошло интенсивное землетрясение. Римские историки пишут, что оно началось в тот момент, когда император Нерон, считавший себя великим артистом, начал свой первый концерт в Неаполе и, несмотря на землетрясение, не прекратил свое пение. Но основные события произошли 24 августа 79 г. Со страшным грохотом разверзлась вершина Везувия. К заоблачным высям поднялся столб дыма, напоминавший по своим контурам итальянскую сосну пинию. С неба, исчерченного молниями, со страшным шумом обрушился дождь из камней и пепла. Замертво падали на землю птицы, люди разбегались во все стороны. Катастрофа застала города в ранние часы. Погибли они по-разному. Улицы и переулочки Геркуланума были затоплены лавиной грязи, образовавшейся из пепла, воды и лавы. Эта грязь, поднимаясь, заливала дома, затекала в окна и двери домов и в конце концов нацело замуровала весь город вместе с жителями, которые не успели спастись бегством. На Помпеи и Стабии сначала сыпался легкий вулканический пепел, но вскоре вулкан стал бросать на города глыбы массой до нескольких килограммов. Вместе с тучей пепла и глыб опустились пары сернистых газов. Дышать становилось все труднее. Люди укрывались в дома, но здесь на них падала кровля, обрушившаяся под тяжестью накопившегося пепла и камней. Обломки заживо погребали людей. Однако многие успели покинуть города. Гибель города Помпеи можно видеть на знаменитой картине К. Брюллова «Последний день Помпеи». 48 ч продолжалось извержение, а когда мрачные тучи рассеялись, города уже не существовало. Пепел после взрыва занесло в Сирию, Египет. При взрыве был уничтожен конус Новой Somмы, и на его месте образовалась кальдера. Спустя много веков археологи раскопали засыпанные вулканическим извержением города и обнаружили много интересных находок, показывающих жизнь древних римлян.

Вулканический пепел сохранил для потомков не толь-

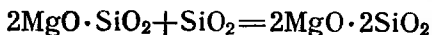
ко развалины Помпеи или Стабии. На Земле есть и много другие места, где под слоем вулканического пепла погребены остатки городов некогда цветущих цивилизаций. Совсем недавно в Танзании, в окрестностях вулкана Садиман, были найдены отпечатки ног древних предков человека — гоминидов. Пепел, выброшенный при извержении 3,7 млн. лет назад, образовал слой толщиной 15 см, на поверхности которого было найдено 39 отпечатков ног древних людей: матери, отца и ребенка. По этим следам ученые получили много интересных сведений об их жизни. А вот материал для будущих археологов. При извержении вулкана Толбачик на Камчатке в 1975 г. слой пепла засыпал лагерь вулканологов, расположенный в километре от вулкана. Людей и большинство имущества удалось эвакуировать в безопасное место, но под восьмиметровой толщей пепла остались палатки, ящики с консервами, полевая сейсмическая станция и другое экспедиционное имущество.

Но вернемся к Везувию. Тип его извержений называется плинианским, по имени двух римских философов, дяди и племянника, Плиния-старшего и Плиния-младшего. Первый погиб при знаменитом извержении Везувия в 79 г., а второй оставил очень точное описание этого извержения. Для него характерны грандиозные взрывы, сопровождающиеся выбросом крупных объемов магмы (до нескольких десятков кубических километров), что приводит к разрушению вершины горы и образованию кальдеры. Пепел и пемза выбрасываются вверх и покрывают плотным слоем землю. Изучение пород, слагающих образования разных извержений, позволило ученым детально изучить химический состав лав Везувия и сделать вывод о существенном его изменении во времени. Особенно хорошо прослеживается постепенное нарастание содержания калия. Здесь также действует механизм гравитационной дифференциации, т. е. оседания более тяжелых кристаллов. Но основное изменение химического состава происходило за счет поглощения магмой известковистых пород, или, как говорят вулканологи, в результате процесса *ассимиляции*. Основное значение при этом имела реакция:



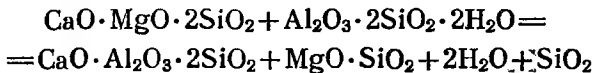
В этой реакции калиевый полевой шпат $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ превращается в лейцит $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$, а *доломит* $CaMg(CO_3)_2$ — в пироксен $CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$; выделяется большое количество оксида углерода (IV).

Примеры поглощения расплавленной магмой окружающих пород очень многочисленны, и в каждом случае это приводит к значительному изменению химического состава магмы. Процесс ассимиляции в основном химический процесс. Температура при этом почти не изменяется. Магма отдает теплоту при расплавлении пород, но одновременно происходят экзотермические реакции при выделении кристаллов. Изменения химического состава магм при ассимиляции можно показать на ряде примеров. При поглощении магмой, недосыщенной кремнеземом, различных пород происходят следующие реакции:



Реакции могут происходить в том случае, если магма, недосыщенная кремнеземом, поглощает кремнистые породы, например кварциты или кварцевые песчаники. При этом вместо оливина $2MgO \cdot SiO_2$ образуются пироксены $MgO \cdot SiO_2$, вместо нефелина $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ — альбит $Na_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$, вместо лейцита $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$ — калиевые полевые шпаты $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$. Поскольку горные породы, слагающие верхние горизонты земной коры, богаты кремнеземом, большинство магм, поднимающихся с глубины, обогащается этим продуктом в процессе ассимиляции.

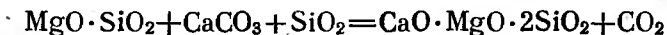
В том случае, когда магма поглощает глинистые породы, реакция ассимиляции выглядит:



В реакции участвует наиболее распространенный минерал глин — каолинит, имеющий сложный химический состав и структуру. Его упрощенная химическая формула — $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$. Ассимиляция этого минерала приводит к обогащению магмы оксидами алюминия и крем-

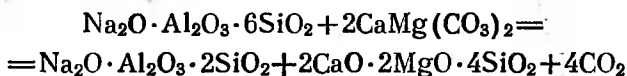
ния (IV), появлению плагиоклаза $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ и кристаллизации свободного кварца.

Выше уже приводился пример вулкана Везувий, где в результате ассимиляции известковистых пород базальтовой магмой возникали щелочные магмы (с. 56). Возможны и другие реакции замещения при взаимодействии базальтовых магм с известняками и доломитами:



В этой реакции вместо магнезиального пироксена $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$, столь характерного для базальтовых магм, образуется диопсид $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ (кальциево-магнезиальный пироксен) и выделяется большое количество газообразного оксида углерода (IV).

При взаимодействии с известняками магм кислого состава образуются своеобразные магматические породы, недосыщенные кремниевой кислотой и богатые щелочными элементами:



В этой реакции альбит $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ — обычный минерал пород кислого состава — замещается нефелином $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ — минералом, типичным для щелочных пород. Во всех вышеприведенных реакциях происходит интенсивное выделение оксида углерода (IV).

Мы рассмотрели только два механизма изменения химического состава первичной магмы: кристаллизационную дифференциацию и ассимиляционный путь. Существование этих механизмов в природе доказано на основе изучения вулканических пород во многих районах земного шара. Однако эти два пути дифференциации не объясняют всего многообразия химического состава вулканических пород. Существует еще целый ряд более сложных механизмов образования магм разного химического состава: фракционная кристаллизация, контаминация, анатексис и т. д. Эти сложные названия обозначают не менее сложные механизмы образования горных пород. Их рассмотрение увело бы нас далеко от предмета книги. Читатели, которых интересует этот вопрос, могут обратиться к специальной литературе. Некоторые из этих книг приведены в списке в конце книги.

Таким образом происходит изменение химического

состава лав, которые извергаются на поверхность. В общем виде для этого процесса характерно постепенное увеличение в магмах содержания оксида кремния (IV), оксидов щелочных металлов натрия и калия и снижение содержания оксидов магния, железа (II и III), кальция. Эти изменения происходят и происходили на всей поверхности земного шара во все времена существования Земли.

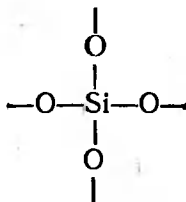
Вернемся теперь к причинам вулканических извержений. В предыдущих главах уже рассказывалось о том, на какой глубине происходит образование магматических очагов, как образуются магмы (с. 40 и 43). А что происходит затем в магматических очагах? Какие силы заставляют раскаленную магму подниматься к поверхности и вызывать грозные вулканические извержения? Таких причин ученые насчитывают очень много. Одни из них связаны с самим развитием магм, другие — с воздействием внешних сил на магму. В качестве одной из основных внутренних причин выделяют нарушение физико-химического равновесия в очагах магмы.

Известно, что любой химический или физический процесс вызван нарушением равновесия и стремится вернуть всю систему вновь в состояние равновесия. Это следствие вытекает из второго закона термодинамики и, как известно, ему подчиняются все природные процессы. И наоборот, если вся система находится в равновесии, в ней должно существовать состояние относительного покоя.

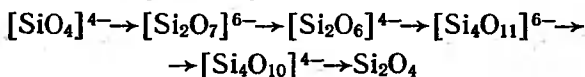
Одной из основных причин нарушения равновесия в магмах сейчас считают процесс спонтанной (взрывной) полимеризации магматического расплава, которая сопровождается бурным выделением летучих компонентов и теплоты. Магматические расплавы — это ионные силикатные и алюмосиликатные расплавы с квазикристаллическим строением и сложной сиботаксической (роевой) структурой. В структуре расплава различают ближний порядок, где упорядоченность приближается к кристаллической, и дальний порядок, где в зависимости от силы взаимодействия возникают, существуют и распадаются («роются») различные сиботаксические группировки компонентов (подобно рою пчел). Структура, форма нахождения, подвижность и кислотно-основные свойства компонентов в силикатных расплавах определяются

главным образом характером и энергией связи с кислородом. Эта связь может быть охарактеризована качественно — значением энергии связи. Кислотными свойствами в расплаве обладают элементы, имеющие большой ионный потенциал (6 и более) и высокую энергию связи с кислородом (более 250 МДж/моль на одну связь). Эти элементы, присоединяя кислород, образуют в расплаве различные комплексные анионы с существенной долей ковалентной связи и вследствие поляризации с высокой способностью к образованию полимерных анионных группировок. К таким элементам относятся кремний, фосфор, бор, цирконий и др. Основными свойствами в расплаве обладают элементы, имеющие малый ионный потенциал (меньше 3) и невысокие энергии связи с кислородом (20—125 МДж/моль). Они образуют в расплаве свободные или комплексные катионы. К ним относятся калий, натрий, кальций, магний и др. Амфотерные свойства имеют элементы, имеющие промежуточные значения ионных потенциалов и энергии связи с кислородом. Они проявляют себя как кислотные или основные компоненты, в зависимости от общей кислотности расплава. Это алюминий, железо (III), хром и др. Еще одна группа компонентов расплава (O^{2-} , S^{2-} , Cl^- , F^- , OH^-), характеризующаяся высокой поляризуемостью, возрастающей с увеличением радиуса и заряда иона, — простые или сложные комплексные анионы.

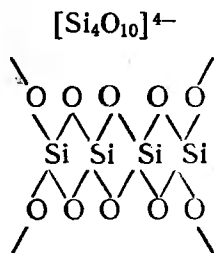
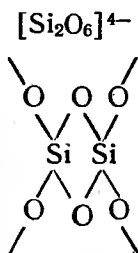
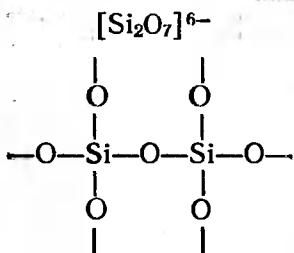
Такая энергетическая неравнозначность связей различных катионов с кислородом приводит к тому, что квазикристаллическая основа структуры расплава представляет собой более прочные упорядоченные кремнекислородные группировки, поляризованные в зависимости от кислотности расплава («ближняя структура»). В «дальней структуре» содержатся элементы с основными свойствами. Причем можно предполагать, что степень упорядоченности в этой структуре возрастает с увеличением энергии связи катионов с кислородом. Наиболее кислые расплавы (например, расплав оксида кремния SiO_2) будут характеризоваться наивысшей полимеризацией с тенденцией образования трехмерного кремнекислородного каркаса. На рисунке 14 (с. 50) показан такой тетраэдр, состоящий из одного атома кремния и четырех атомов кислорода. Этот тетраэдр обладает четырьмя отрицательными связями:



В определенных условиях в результате реакции полимеризации образуются более крупные молекулы. Кремнекислородный тетраэдр $[\text{SiO}_4]^{4-}$ замещается более сложной гаммой цепочечных, ленточных, листовых и каркасных макромолекул:



Структурные формулы этих макромолекул выглядят так:



Полимеризация магматического расплава происходит по радикально-ионному механизму. Образование свободных радикалов может происходить как путем присоединения неактивного мономера, так и при объединении двух сложных активных радикалов промежуточного типа, т. е. ступенчато. Роль инициаторов процесса играют катионы, активность которых максимальна в данный момент. Скорость полимеризации зависит от преобладания того или иного механизма присоединения. В общем виде скорость полимеризации определяется активностью мономеров или радикалов промежуточного типа и инициатора, а также соотношением температур среды и расплава.

Сейчас многие ученые считают, что спонтанная полимеризация является важнейшей причиной активности

вулканического процесса и одной из его движущих сил. Причиной этого является выделение большого количества энергии и отделение газов (летучих компонентов) от расплава.

В неполимеризованных расплавах летучие компоненты находятся в мономерных формах. Вода диссоциирована, гидроксил OH^- связан в мономерах, а водород, фтор и хлор пребывают в свободном состоянии и выделяются первыми при вулканических извержениях.

При термической цепной реакции полимеризации большое значение имеет разность температур магмы и окружающих ее пород. На глубине критическая температура магмы примерно равна температуре этих пород. В этих условиях полимеризация протекает очень медленно. Ближе к поверхности температура магмы уже значительно превышает температуру среды. В этих условиях полимеризация может происходить по взрывному типу, сопровождаясь бурным отделением летучих компонентов и выделением большого количества теплоты.

Другой причиной отделения летучих компонентов от расплава, вызывающей вулканические взрывы, считается резкое изменение давления, возникающее при подтяжки магмы к поверхности. Чтобы лучше понять этот процесс, напомним простой физический пример, наглядно демонстрирующий закон Генри. В цилиндрическом стеклянном сосуде, закрытом подвижным поршнем, находится жидкость, например вода, и над ней небольшое количество газа, например оксида углерода (IV). Обе фазы находятся в равновесии, если давление растворенного в жидкости газа равно давлению свободного газа, т. е. если за одно и то же время в жидкость поступает столько молекул газа, сколько выделяется из жидкости. Если с помощью поршня увеличить давление, то в воде растворится большее количество оксида углерода (IV). Если затем уменьшить давление, то оксид углерода (IV) будет выделяться из воды в виде пузырьков, которые поднимаются вверх и образуют газовую фазу. И так до наступления нового равновесия.

Предполагают, что аналогичный физический процесс происходит и при вулканическом извержении. На глубине магма, содержащая большое количество летучих компонентов, находится в условиях высоких давлений, и в этом случае газовая фаза находится в равновесии

с расплавом. Но поскольку окружающие ее породы холоднее, чем магма, последняя начинает охлаждаться с краев. Возникают конвекционные течения, и магма поднимается вверх, в область пониженных давлений. Начинается резкое отделение газов. Этот процесс дегазации является причиной вулканической деятельности на земной поверхности.

Количество газа, которое первично содержится в магме на глубине, пока неизвестно. Имеется уже много определений газа в свежих вулканических породах, но эти данные, конечно же, намного ниже первичных, потому что магма по пути к поверхности интенсивно дегазируется. Очень трудно подсчитать количество газа, которое выделяется при вулканическом извержении. Эти газы обычно образуют огромное облако, но необходимо иметь в виду, что вулканические газы, выделившись в атмосферу, сильно расширяются и смешиваются с воздухом. Поэтому по размеру облака нельзя определить количество газа. Есть еще один путь для выяснения количества газа в магме. Это путь эксперимента, подобного тому опыту, которым мы иллюстрировали закон Генри. Для этого нужно заменить воду расплавленной породой, а оксид углерода (IV) — другими газами (водяным паром, фтором, хлором и т. д.). Растворимость газов в расплаве увеличивается с увеличением давления и уменьшается с увеличением температуры. Так было установлено, например, что в магме с содержанием оксида кремния (IV) около 68% при температуре 900°C на глубине 0,2 км может содержаться 0,6% воды, т. е. в 1 м³ магмы может содержаться около 14 л воды.

Для некоторых вулканов имеются приблизительные расчеты количества воды и газа, выделившихся при извержениях. Например, при извержении вулкана Парикутин в Мексике в 1945 г., о котором уже несколько раз упоминалось, в виде пара выделялось ежедневно 15 тыс. т воды. Для некоторых вулканов определено количество выделившихся газов по отношению к массе магмы: Безымянный (1961 г.) — 3,8%, Ключевская Сопка (1961 г.) — 2,3%, Асама (1783 г.) — 3,99%.

Совершенно очевидно, что не весь газ и не вся вода поступают из глубины при вулканических извержениях. Ведь под вулканами содержатся подземные грунтовые воды. При соприкосновении с расплавленной магмой они

мгновенно превращаются в пар. Источником оксида углерода (IV) могут быть известковые осадочные породы, которые разлагаются при нагревании расплавленной магмой:



Например, при катастрофическом извержении вулкана Везувий в 1966 г. масса газа, вырывавшегося из кратера с большой силой в течение многих часов, намного превысила массу излившейся лавы. Ученые считают, что источником воды и оксида углерода (IV) для этого извержения послужили подземные воды и подстилающие вулкан известняки. Задолго до основного извержения уже с 27 мая 1905 г. начались взрывы и выбросы шлаков. В начале апреля 1906 г. на склоне вулкана на высоте 1200 м образовалась крупная трещина, из которой вытекала лава. Затем такая же трещина сформировалась на высоте 600 м на склоне Везувия, и из нее также полилась лава. Между тем главное жерло вулкана извергало черный пепел и шлаки. Эти шлаки причинили большой ущерб городам Оттаино и Сан-Джузеппе. Под тяжестью накопившегося рыхлого материала провалилась крыша церкви города Сан-Джузеппе и под развалинами погибло 150 человек. Затем излияние лавы закончилось, но вулкан не успокоился. Наступил кульминационный момент извержения. Гора сотрясалась от сильных подземных взрывов, паузы между взрывами газов становились все меньше и меньше, и наконец из жерла с невероятной силой пошел непрерывный поток газа. Ширина его достигала 500 м, а высота 13 км. Весь материал, который мешал газу выделяться, был выброшен из жерла. И так со скоростью 500 м/с газ вырывался в течение 18 ч. Затем произошли еще небольшие выбросы пепла, и лишь к 22 апреля 1906 г. извержение прекратилось. Высота горы понизилась на 107 м. На острой до извержения вершине образовался кратер глубиной 700 м и шириной 600 м. Он возник в результате газового потока.

Наш рассказ все время ведется об извержениях вулканов, расположенных на суше: на материке или на островах. Но ведь большая поверхность Земли покрыта океанами и морями. В предыдущей главе уже говорилось о том, что на дне океанов действует множество вулканов

в разных областях земного шара (с. 38). Но данные о том, как происходят подводные извержения, каковы там химические и физические процессы, пока очень незначительны. Совершенно ясно, что под влиянием давления громадной толщи воды извержение вулканов должно иметь иной характер. Но очевидцев таких извержений нет. Можно охарактеризовать лишь подводные извержения вулканов, происходящие на небольшой глубине, на мелководье. Такие извержения ученые неоднократно наблюдали на Азорских островах, в Исландии, на Филиппинах. Лучшее всего изучено подводное извержение, начавшееся 14 ноября 1963 г. в Атлантическом океане недалеко от Исландии. Возникший в результате извержения небольшой островок был назван Суртсэем, по имени Сурта — подземного великана, героя древнеисландских саг. 14 ноября в 6 ч утра в 10 км к югу от архипелага Вестманнаэйяр из воды начались выбросы черного пепла. Не было грохота, характерного для наземных извержений, все происходило в странной тишине. Были слышны лишь приглушенные подземные взрывы. Выбросы пепла происходили в трех местах на расстоянии 400 м друг от друга и достигали высоты 60 м. Соприкосновение поднимающейся магмы с морской водой приводило к бурному образованию пара. Смесь пара с пеплом взлетала вверх на высоту 120—150 м своеобразными столбами в форме кипариса или островерхой ели. Эти выбросы ученые так и называют кипарисовидными струями. Если взрыв зарождался близко от поверхности, то струи опускались в виде плавно изогнутых перьев петушиного хвоста. Тучи пара и дыма поднялись над водой на высоту до 3 км. Но постепенно накапливалось количество выброшенного материала из жерл, и над поверхностью моря появился гребень из пепла и вулканических бомб высотой 60 м и длиной 600 м. К началу апреля 1974 г. на месте извержения уже вырос конус вулкана и характер вулканической деятельности изменился. Из кратера вылились потоки базальтовой лавы. Они забронировали поверхность рыхлого пеплового материала и предохранили остров от размыва морскими волнами. Извержение вулкана далее продолжалось по наземному типу и вскоре прекратилось.

Первые упоминания о подводных извержениях в районе Исландии относятся к XII в. Это вообще самые

дровние исторические сведения о подводных извержениях. В книге «*Liber migasolunt*», опубликованной в 1178—1180 гг., отмечается, что на острове Исландия «вечный огонь» пылает не только на вершинах гор, но и на дне океана. Огонь вырывается со страшной силой над морскими волнами, сжигая рыбу и все живое.

Отметим еще одно мелководное извержение. В конце сентября 1957 г. подводный вулкан Фаял на Азорских островах, расположенный на дне моря, на глубине 70 м, выбрасывал фонтан песка, воды и вулканического пепла, который достигал высоты 300 м. Извержение сопровождалось сильным движением воды.

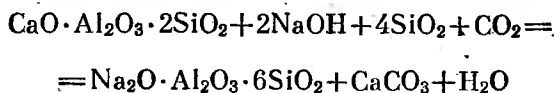
Глубоководные вулканические извержения недоступны для наблюдения, особенно при излиянии лавы. Но даже и тогда, когда извержение имеет взрывной характер, мы не можем его зафиксировать. Причиной этого является высокое давление столба воды на глубине. Например, химические составы глубоководных базальтов повсюду характеризуются значительным преобладанием оксида железа (III) над оксидом железа (II), что может свидетельствовать о высоких *парциальных давлениях* кислорода в поднимающемся магматическом расплаве. Кроме того, из магмы отделяется большое количество других газовых компонентов. Но вулканический взрыв, несмотря на высокую газонасыщенность, не происходит, начиная с определенной глубины. Эта глубина зависит от энергии вулканического взрыва. В условиях высоких давлений образовавшиеся газы не разбрасываются, а адиабатически расширяются. Обычно считается, что уже на глубинах 2—3 км взрывных вулканических извержений не происходит, а они имеют характер спокойных излияний лавы. На поверхности моря никаких следов действия вулкана заметить нельзя, так как вулканические газы, поднимающиеся из морских глубин, на таком долгом пути успевают раствориться в воде. Лишь иногда с помощью эхолота с кораблей удается зафиксировать облако воды с повышенной плотностью, да пробы придонной воды указывают на резкое изменение ее химического состава.

В 1966 г. было описано извержение подводного вулкана Михаила Ломоносова в северной части Атлантического океана. У вершины вулкана был зафиксирован выход плотной воды, создавший своеобразное линзовид-

ное облако. Оно два с лишним года удерживалось на одном уровне. Вода в пределах облака содержала большие концентрации растворенного кремнезема. Даже в поверхностном слое воды содержание оксида кремния (IV) во время извержения увеличилось до 1 г/м³, а на глубине оно было еще больше. Высокие концентрации были прослежены на расстояние 200 км, куда эта вода относилась придонными течениями.

В четвертом рейсе научно-исследовательского судна «Вулканолог» над подводным вулканом Эсмеральда были обнаружены газовые струи и восходящие потоки нагретой воды, которые были зафиксированы с помощью эхолотов. На поверхности океана наблюдался шлейф зеленовато-белесой известковой воды, который заметно выделялся на фоне обычной морской. В воде было отмечено пониженное содержание хлора. Это явилось доказательством того, что вулканические эманации содержат меньше хлора, чем морская вода.

О химических процессах, происходящих при глубоководных извержениях, мы узнаем, изучая древние ископаемые вулканы с возрастом 100, 300, 500 и более миллионов лет. (Подробнее о строении таких вулканов будет рассказано в следующей главе 4.) Ископаемые вулканы некогда извергались на дне морей и океанов, в глубоководных желобах. Характер их можно реконструировать по тем вулканическим породам, которые образовались при извержениях. Обычно это породы базальтового состава, но минералов, характерных для базальтов, в них сохранилось мало. В результате химических реакций пироксен базальтов превращается в *хлорит*, при этом находящийся в нем кальций в виде гидрокарбоната переходит в морскую воду. То же самое происходит и с кальцием плагиоклазов, которые таким образом становятся более натриевыми, альбитовыми. Вулканические газы, растворенные в морской воде при высоких давлениях, содержат много оксида углерода (IV), который, соединяясь с ионами Ca²⁺, дает кальцит. Схематически эту реакцию можно представить в следующем виде:



Таким образом формируется другая порода — *спилит*. Она обычно имеет зеленый цвет и потому называется зеленокаменной. В отличие от обычных базальтов спилиты содержат большое количество натрия (до 5—6% Na_2O). Характерна форма лав. Застывая, они образуют обособленные глыбы, имеющие овальные формы (в виде подушки). В русской терминологии их так и называют — *подушечные лавы*.

Обычно предполагается, что глубоководные вулканы представляют собой аппараты центрального типа. В результате значительных давлений воды на вулканические жерла происходили взрывные струйные извержения огромной мощности. Извергающаяся лава, по-видимому, была очень жидкая, насыщенная водой и газами. Такое состояние лавы вызывало сильное ее разбрызгивание. Отдельные капли в воде моментально застывали, давая шарики вулканического стекла. В этих условиях происходило также образование шаров и подушек лавы.

Существует другая гипотеза происхождения спилитов. Постоянное присутствие вместе со спилитами пород кислого состава, так называемых *кератофиров* (которые также содержат значительные количества Na_2O), привело ученых к мысли о существовании первичной спилитовой магмы. Тогда кератофилы могли образоваться в результате дифференциации спилитовой магмы. Но более вероятной является гипотеза о происхождении спилитов по механизму, охарактеризованному несколько выше.

Спилиты обычно сопровождаются осадочными горными породами — яшмами, содержащими большое количество оксида кремния (IV). Наличие их вместе с вулканическими породами объясняется тем, что при температурах, близких к критической температуре воды, и давлениях 30—40 МПа резко возрастает растворимость оксида кремния (IV) в морской воде. При небольшом снижении температуры и давления происходит выпадение кремнезема в осадок с образованием яшм. В вулканическом процессе происходит также вынос оксида железа (II) в виде гелеобразных растворов. В морской воде щелочность повышена, поэтому эти растворы мгновенно образуют хлопьевидный осадок, который окрашивает яшму в красный цвет.

Глубоководные вулканические извержения, как правило, не приносят людям вреда. Но с более мелководными

ми взрывами и провалами морского дна связано образование крупных волн на поверхности океана — *цунами*. При извержении вулкана Кракатау от такой волны погибло около 35 тыс. человек — большая часть населения Зондских островов, окружающих вулкан.

В настоящее время на территории океанических бассейнов выявлены не все подводные вулканы. Они составляют лишь 17% всех действующих на Земле вулканов. Несомненно, что их намного больше. Океанический вулканизм по масштабам намного превосходит континентальный. Например, лишь в бассейне Тихого океана известно около тысячи островов. Большая часть их сложена вулканическими породами. Даже на атоллах, коралловых островах установлено, что *рифовый известняк* представляет собой как бы нащелпку на вулканическом фундаменте. Но, очевидно, лишь небольшая часть вулканических гор имеет достаточную высоту, чтобы подниматься над поверхностью океана. На дне Тихого океана установлено более 100 тыс. вулканических гор и холмов высотой до 1 км. По форме они вполне соответствуют щитовым вулканам, и в центре гор, как правило, находятся кратеры. Кроме того, известно большое число своеобразных подводных возвышенностей — *гайотов*, часть из которых также имеет вулканическое происхождение. Все это молодые образования; их возраст не превышает нескольких десятков миллионов лет.

Мы рассмотрели некоторые виды извержений и причины, их вызывающие. Следует рассказать еще об одном очень сходном с обычными вулканами явлении — действии *грязевых вулканов*. Как показывает само название, продуктом извержения здесь является не расплавленная жидкая лава, а густая подвижная грязь, но формы вулканических извержений во многом сходны. Грязевой вулкан по внешнему виду напоминает обычные вулканы (рис. 15). Это усеченный конус с кратером на вершине, из которого происходит извержение грязи, воды и газов. Размеры конусов грязевых вулканов относительно невелики: максимально до 300 м высоты и 1 км в диаметре. Есть вулканчики диаметром лишь несколько десятков сантиметров. Конуса вулканов возникают там, где из глубин Земли на поверхность по трещинам поднимаются газы, приносящие с собой воду. Они находятся в областях развития потухших вулканов (подлинных, а не



Рис. 15. Конус и кратер грязевого вулкана. Видны потоки грязи, стекающие по его склонам.

грязевых), где послевулканическая деятельность проявляется в интенсивном выделении на поверхность оксида углерода (IV). Типичным местом грязевых вулканов этого типа является Йеллоустонский национальный парк в США. Но главные области развития грязевых вулканов располагаются в окрестностях нефтяных месторождений. В нашей стране они встречаются в юго-восточной окрестности Большого Кавказа, в Керченско-Таманской области, в Западной Туркмении и на Сахалине. За рубежом такие вулканы также известны, например в Румынии. На территории, прилегающей к Каспийскому морю, насчитывается около 220 грязевых вулканов. По характеру извержения они отличаются друг от друга. Иногда в кратерах постоянно булькает жидкая грязь (рис. 16); в других в результате взрывов происходит выброс грязи, грязь растекается потоком по склонам конуса и все затихает. Наиболее крупное извержение за последние годы происходило на грязевом вулкане Локбатан. В 1977 г. после семилетнего периода покоя над вулканом поднялся столб горячего газа высотой до 1 км. Затем произошло несколько подземных взрывов, которые

выбросили грязь на расстояние до 50 м. Всего за время извержения было выброшено около 200 тыс. м³ грязи. По московскому телевидению как-то показывали фильм «Иду на вулкан». В этом фильме были прекрасные кадры об извержении грязевого вулкана.

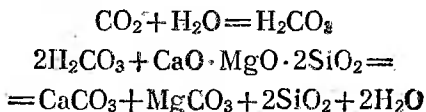
Химические процессы, происходящие в грязевых вулканах, значительно отличаются от подлинных вулканических процессов. Основной движущей силой грязевого вулканизма являются взрывы газов. Кроме грязи, эти вулканы выделяют подземные воды с высоким содержанием брома, бора и сода. Изучение химического состава газов грязевых вулканов показало, что, в отличие от газов нефтяных месторождений, они характеризуются очень незначительной примесью тяжёлых углеводородов. Основным компонентом всех изученных газов является метан CH_4 . Его содержание колеблется от 77 до 98%. Но вот в газах грязевых вулканов Керченско-Таманской области и Сахалина содержится 21—84% метана. Вместо этого в газах значительно возрастает количество оксида углерода (IV) — до 11—90%. Для метановых грязевых вулканов содержание оксида углерода (IV) в газах не превышает 6—10%. Из других газов, выделяющихся при извержениях грязевых вулканов, распространены азот — 1—2%, гелий — 0,001—0,01%, аргон — 0,05—0,025%, водород — до 0,015%.

Установлено, что состав газов грязевых вулканов зависит от того, с каких глубин поднимается газ и через какие осадочные породы он проходит. Чем быстрее газы достигнут земной поверхности, тем выше оказывается в них содержание оксида углерода (IV). Объясняется это тем, что оксид углерода (IV) характеризуется крайней агрессивностью по отношению к окружающим горным породам, поэтому он недолговечен в газовых выделениях.



Рис. 16. Пузыри жидкой грязи в кратере грязевого вулкана.

Он растворяется в воде и в виде угольной кислоты взаимодействует с горными породами, образуя различные карбонаты:



Чем слабее деятельность отдельно взятого грязевого вулкана, чем дольше соприкасается газ, поднимающийся к поверхности, с водами и горными породами, тем ниже в нем концентрация оксида углерода (IV) и выше содержание азота и аргона.

Но вернемся к вулканам, деятельность которых является предметом нашей книги. Из описания любого вулканического извержения становится ясным, что это явление связано с выделением большого количества энергии. Действительно, чтобы расплавить магму, поднять ее из глубины на поверхность Земли, а затем извергнуть из кратера вулкана в виде бомб, пепла или потоков лавы, требуется колоссальная энергия. Современные оценки масштаба генерации энергии во внутренних частях Земли показывают, что эти значения намного выше, чем потеря теплоты Землей за счет теплопроводности. Эту разницу частично восполняют энергетические потери при вулканических извержениях.

К настоящему времени уже накоплено много данных о количественном энергетическом эффекте вулканизма, но в большинстве случаев оценивается лишь энергия вулканического взрыва. Несмотря на колоссальную мощность этого явления, оно далеко не отражает всей потери энергии при деятельности вулканов.

Расход внутренней энергии Земли в процессе вулканизма складывается в основном из механической работы перемещения магмы из глубины Земли к поверхности, теплоты, выделяемой из лавы при застывании магмы и ее кристаллизации, энергии, расходуемой при извержении, энергии, которая терется в периоды между извержениями (вынос теплоты парогазовыми струями, потеря ее с поверхности вулканов и т. д.). Как ни велики, казалось бы, затраты энергии при вулканических взрывах, потери ее в период между вулканическими *пароксизмами* вполне им соответствуют. Для Мутновского вулкана на юго-востоке Камчатки потеря энергии в пе-

перыве между извержениями оценивается в $5 \cdot 10^9$ Дж, а суммарное значение теплоты, выделяемой вулканом Цирагонго в августе 1959 г. (теплота, которая уносится с газами и рассеивается в окружающих породах) составляет примерно $9,6 \cdot 10^{18}$ Дж. Для извержений гавайских лавовых вулканов энергия теплоты составляет преобладающую часть энергопотери. Вулканические взрывы также требуют громадного расхода энергии. Например, тепловая мощность только одного взрыва вулкана Безымянный (о котором уже рассказывалось), по оценке специалистов, составляет $3,6 \cdot 10^{18}$ Дж. Надо ли удивляться, что общие потери энергии при извержении даже одного вулкана очень велики и сопоставимы с годовым потреблением энергии в ряде стран.

Приведем для примера значения энергии, выделяемой крупными вулканическими извержениями, о которых мы упоминали раньше: Тамбора — $8,4 \cdot 10^{19}$ Дж, Безымянный — $3,6 \cdot 10^{18}$ Дж, Кракатау — 10^{18} Дж, Фудзияма (1707 г.) — $7,1 \cdot 10^{17}$ Дж, Сева-Синдзан (1944 г.) — $1,4 \cdot 10^{13}$ Дж. Общая тепловая энергия, выделявшаяся во время извержения вулкана Килауэа в 1952 г., равна приблизительно $1,8 \cdot 10^{17}$ Дж, что составляет примерно пятнадцатую часть всей энергии, которую выработали в США в 1960 г.

В 1979 г. в СССР было выработано 1239 млрд. кВт·ч электроэнергии, что составляет $4,5 \cdot 10^{18}$ Дж. Мощность Нурекской ГЭС с пуском достигнет 11 млрд. кВт·ч в год, что составит примерно $4 \cdot 10^{16}$ Дж. Как мы видим, выделившаяся энергия при катастрофических вулканических взрывах наиболее крупных вулканов вполне сопоставима или даже превышает по значению годовое количество электроэнергии, выработанной в нашей стране, а мощность более «мелких» вулканических взрывов сопоставима с годовой производительностью крупных электростанций.

Такое фантастическое количество энергии, выделяющееся при вулканических извержениях, конечно, нельзя использовать полностью. Нельзя и, видимо, никогда не будет возможно захватить энергию вулканического взрыва, так как этот взрыв уничтожил бы любое техническое сооружение. Но часть вулканической энергии уже используется, и она будет увеличиваться с каждым годом. Как это реализуется, мы расскажем в главе 5.

Глава 4.

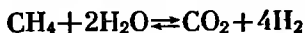
ПОСЛЕВУЛКАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПОТУХШИЕ И ИСКОПАЕМЫЕ ВУЛКАНЫ

Уменьшился грохот подземных взрывов, шум извержений, и вулкан прекратил свою активную деятельность. На поверхности Земли остались хаотическое нагромождение камней, потоки застывшей лавы, мощные пласты пепла. Вулкан потух. Понятие «потухший вулкан» применяется для гор вулканического происхождения, если у людей не сохранилось сведений об их активной деятельности. Это понятие довольно относительно. Очень часто вулканы, которые считались потухшими, начинают извергаться вновь. Даже перерывы в 500—1000 лет не могут считаться доказательством окончательного завершения вулканической деятельности. В истории вулканов известны случаи, когда вулкан возрождался через 2000 лет, что установлено, например, для вулканического района Таупо в Новой Зеландии с помощью *радиоуглеродного метода*. При этом исследовались растительные остатки, погребенные при извержениях.

Но деятельность вулкана не заканчивается и после окончательного прекращения выделения на поверхность расплавленного материала. Еще многие тысячелетия, до тех пор, пока окончательно не застынет магматический очаг на глубине, на поверхность будут выходить вулканические газы. Кроме того, остывающий вулкан будет служить причиной образования горячих и сильно минерализованных вод, которые выделяются на поверхность в виде гейзеров, термальных и минеральных источников. Все эти явления обычно объединяют под общим термином «*послевулканические процессы*», хотя часть из них

например выделение горячих газов, обычна и для вулканических извержений.

Отверстия, из которых на поверхность выходят вулканические газы, называются фумаролами. Обычно эти поствулканические структуры подразделяются по составу газов и по температуре на собственно фумаролы, сольфатары и *мофеты*, но в последние годы в связи со значительной неопределенностью этих понятий от них часто отказываются. Собственно фумаролами часто называют почти безводные газы с очень высокой температурой (650—1000°C). Но, по последним данным, водяные пары почти всегда составляют значительную часть фумарольных газов. Высокотемпературные фумаролы содержат много хлороводорода, фтороводорода, оксида углерода (IV) и свободного водорода, незначительное количество метана и гелия. Равновесное отношение CO_2/CH_4 составляет 100:1:

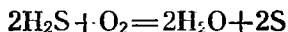


При высоких температурах равновесие реакции смещается в сторону метана, а при более низких образуется преимущественно оксид углерода (IV). На основе газового состава фумарола можно предсказать извержения. Установлено, что содержание гелия и оксида углерода (IV) закономерно уменьшается перед извержениями и также возрастает после извержения вулкана. В соответствии с приведенной выше реакцией в высокотемпературных фумарольных газах наличие свободного водорода достигает иногда 10%, хотя обычно он содержится в долях процента. В газах фумарол на Камчатке иногда наблюдаются высокие концентрации радона.

Более низкотемпературные фумаролы (менее 650°C) называют сольфатарами. Большую часть их газового объема составляют перегретые пары воды, но в них содержится также большое количество газов (H_2S , SO_2 и др.). Наиболее известны сольфатары района Флегрейских полей в Италии, западнее Неаполя. Здесь располагается 27 потухших вулканов, среди которых наиболее известен кратер Сольфатара, давший название всей этой группе фумарол. В древности кратер назывался Форум-Вулкани. В его юго-восточной части из небольшого холма высотой не более 1 м с большой силой вырывается струя пара. Эта самая крупная фумарола известна под названием Бокка-делла-Сольфатара. Масса воды, выде-

ляющаяся из нее за сутки, составляет 18—20 тыс. ж. Интересно отметить, что эта сольфатара почти не изменила свой характер со времен древнего Рима. Своеобразный газовый состав имеют другие сольфатары в Италии: так называемые суффioni в окрестностях города Вольтерра в Тоскане. Их выделения состоят из водяного пара, борной кислоты, серы и гипса.

Сольфатары широко распространены в вулканических областях. Они известны в Исландии, на Яве, в Мексике, Калифорнии, Неваде. Самый интересный район массового развития сольфатар находится на Аляске. Это знаменитая Долина Десяти Тысяч Дымов в окрестностях Катмайского вулкана. На площади 130 км² во многих местах с большой силой вырываются горячие водяные пары и газы, в основном сероводород H₂S, имеющий неприятный запах тухлых яиц. Реагируя с кислородом воздуха, сероводород образует около сольфатар желтые корки чистой серы:



Хотя в Долине Десяти Тысяч Дымов большинство сольфатар уже прекратили свое существование, оставшееся их число еще значительно.

Очень интересное явление было установлено впервые на Флегрейских полях, а позже отмечено на многих других участках. Если зажечь спичку и поднести ее к выходу струи пара, то его количество резко увеличивается. Вначале этот эффект объясняли взрывом сероводорода, но сейчас в основу этого явления кладут конденсацию невидимого пара вокруг невидимых частиц дыма.

Фумаролы с более низкими температурами (ниже 100°C), иногда отличающимися от температуры окружающего воздуха, обычно называют мофетами. Мофеты содержат большое количество оксида углерода (IV). Этот газ, будучи тяжелее воздуха, накапливается во впадинах рельефа, котловинах, пещерах и часто служит причиной отравления различных мелких животных. Хорошо известен Собачий грот (Grotto del cane) в окрестностях Неаполя. Это пещера, вырытая древними римлянами. Свое название она получила от того, что собака в гроте задыхается от углекислого газа, стелющегося по земле, тогда как человек, голова которого находится выше этого слоя, остается жив и невредим. Аналогичный случай описан для Исландии. В 1947—1948 гг. при извержении вулкана Гек-

ла оксид углерода (IV) накопился во впадине у подножия вулкана. Пасшихся там овцы погибли, а пастухи даже ничего не почувствовали.

Газы фумарол могут поступать из двух источников. Первый, более глубинный, представляет собой застывающую на глубине магму, которая выделяет значительное количество газов. Об этом явлении уже рассказывалось при объяснении причин вулканических извержений. Такие фумаролы обычно действуют очень долго, в течение тысячелетий (как, например, упомянутая выше Боккаделла-Сольфатара). Другие фумаролы не имеют связи с глубинными источниками и возникают из грунтовых вод при их взаимодействии с раскаленными лавами, изливающимися на поверхность. Такие фумаролы действуют короткое время — несколько часов или дней, иногда несколько лет, но не более. К ним принадлежит большая часть фумарол Долины Десяти Тысяч Дымов.

Еще одно проявление послевулканической деятельности — горячие минеральные источники. Они широко распространены во всех вулканических областях и даже в районах давно угасшей вулканической деятельности. Температура воды в этих источниках различна и колеблется от 70 до 100°C. Температура горячих источников обусловлена теми же причинами, что и высокая температура фумарол. Оба эти явления тесно связаны между собой. Большая часть воды горячих источников представляет грунтовые воды, просочившиеся на глубину и нагретые раскаленной магмой. Состав вод вулканических горячих источников различен. Он зависит от состава и количества вулканических газов, растворенных в воде, а также от горных пород, сквозь которые просачивались воды. Как правило, наиболее горячие источники — кислые, воды их имеют $\text{pH} < 4$. В них растворено и диссоциировано большое количество следующих газов: CO_2 , SO_2 , H_2S , HF , HCl и др. Эти воды весьма агрессивны. Они выносят из горных пород алюминий, железо, кальций, марганец и др. Наиболее характерными являются фумарольные воды с высоким содержанием анионов Cl^- и SO_4^{2-} и сольфатарные, содержащие анионы SO_4^{2-} . Фумарольные воды развиваются на наиболее активных вулканах, часто образуя кратерное озеро. Воды имеют высокую минерализацию: в 1 л воды может содержаться до нескольких десятков граммов растворенных элементов, в том

числе и рудных. Сольфатарные воды менее минерализованы, менее кислые (до нейтральных), среди катионов преобладают ионы NH_4^+ . После прекращения сольфатарной деятельности в составе вод исчезают газы, придающие кислотный характер (за исключением CO_2); воды приобретают $\text{pH} > 5$. Основная масса щелочных горячих источников на Камчатке принадлежит к азотно-углекисло-хлоридным. В Йеллоустонском национальном парке в США это преимущественно натриево-хлоридные воды.

Углекислые горячие источники содержат меньшее количество растворенных в воде элементов. Их минерализация колеблется от 0,4 до 8 г/л. Главными катионами в этой воде являются ионы Na^+ и Ca^{2+} . Меньше всего минерализованы нехлоридные щелочные воды. Количество растворенных в них компонентов целиком определяется процессами выщелачивания горных пород. При этом ионы SO_4^{2-} образуются за счет выщелачивания сульфидов, а ионы HCO_3^- — в результате взаимодействия оксида углерода (IV) и воды с карбонатами и силикатами.

Горные породы вокруг горячих источников под действием вод обычно превращаются в глины. В них присутствуют оксиды и сульфиды железа, придающие глине различную окраску: коричневую, красную, зеленую и т. д. Эта цветная масса постоянно пузырится от выделяющегося газа. Такие кипящие грязевые котлы можно видеть в Долине Гейзеров на Камчатке, в Йеллоустонском национальном парке и др. В Новой Зеландии, в районе Роторуа, известен Лягушачий пруд, названный так за то, что всплески грязи на его поверхности напоминают скачущих лягушек.

Горячие источники выносят на поверхность большое количество растворенного оксида кремния (IV), который отлагается вокруг источника в виде кремнистого туфа и иногда образует купол высотой до 1 м. Источники, содержащие растворенный карбонат кальция, также отлагают его в виде известкового туфа, или травертина. Воды, переливающиеся через край источника, образуют спиральные или уступчатые террасы, сложенные травертином. Очень красивые террасы можно видеть на горячих источниках в Йеллоустонском парке (рис. 17). Источники создают по склону холма ряд ступенчатых травертиновых террас, на которых располагаются небольшие бассейны кристально чистой зеленоватой воды. Температура воды в

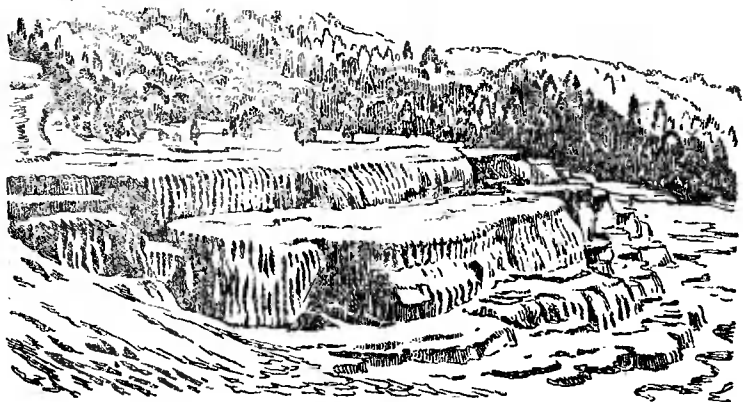


Рис. 17. Травертиновые террасы Мамонтового горячего источника в Йеллоустонском парке США.

этих бассейнах понижается сверху вниз. Горячая вода, переливаясь через края террас, образует красивые сталактиты или ребристые поверхности. Картина таких террас в рамке из зелени деревьев весьма впечатляюща. В нашей стране травертиновые террасы известны на Юго-Западном Памире. Террасы здесь сложены из белого травертина с вертикальной ребристой поверхностью. Травертин отложен из вод с температурой $47-63^{\circ}\text{C}$, выделяющихся из источников и грифонов. В некоторых местах (Центральная Франция, Карлови-Вари) существует обычай опускать в горячую воду источника медалионы, крестики, цветы и другие предметы. В воде они обрастают карбонатом кальция и служат ценными сувенирами.

Некоторые горячие источники содержат радиоактивные вещества, например радон. Такие источники известны как весьма популярные курорты. Но лечебными свойствами обладают не только радиоактивные воды. *Бальнеология* уже давно использует различные горячие источники. Возле них построены многочисленные водолечебницы и санатории. Например, известный европейский курорт Карлови-Вари имеет теплые минеральные источники, которые согреваются подземной теплотой потухшего вулкана Дуновских гор. Река, протекающая по территории курорта, так и называется Тепла из-за многочисленных выходов горячих вод по ее берегам. Воды минеральных ис-

точников по своему химическому составу относятся к типу термальных гидрокарбонатно-сульфатно-натриевых. Температура источников 42—72°C, а содержание оксида углерода (IV) 0,87—0,75 г/л. За сутки изливается около 3 млн. л воды. Она используется для лечения различных кишечно-желудочных заболеваний.

В нашей стране многочисленные санатории располагаются в областях потухших вулканов, где широко распространены горячие и холодные минеральные источники. По химическому составу растворенных солей и газов среди них различают источники углекислые, щелочные, соленные, железистые, серные, горько-соленные, сульфатные и т. д. Для областей с последними отголосками недавней вулканической деятельности особенно характерны холодные и теплые углекислые воды (нарзан, боржоми и т. д.).

Славится богатыми минеральными источниками Камчатка. Здесь их насчитывается около 200. 120 из них являются термальными. И все они обладают высокими целебными свойствами. Вблизи города Петропавловска-Камчатского расположены минеральные воды и лечебные грязи. Здесь располагаются санаторий, базы отдыха, профилактории. В 100 км от областного центра находятся еще два богатых месторождения минеральной воды, где построен санаторий «Начики».

Своеобразную форму горячих источников представляют собой гейзеры (по исланд. «гейзер» — *грозный*). Они периодически вскипают на глубине и выбрасывают высоко струю горячей воды и пара. Гейзеры тесно связаны с вулканами или молодыми вулканическими горными породами. Главные районы распространения этих явлений на земном шаре — Центральная Исландия (30 гейзеров), остров Северный в Новой Зеландии (22), Йеллоустонский национальный парк в США (200), Камчатка (25). Кроме того, гейзеры известны в Японии, Индонезии, на Алеутских островах. Часто отмечают также искусственные гейзеры в буровых скважинах, пройденных для получения природного пара.

В Исландии наибольшей известностью пользовался Большой гейзер, расположенный к западу от Рейкьявика. Первые сведения о нем относятся к 1647 г. Именно он впервые получил название Гейзер, которое затем распространилось по всему земному шару. В 1772 г. он выбрасывал струю горячей воды и пара каждые полчаса на вы-

соту 30—70 м. В 1883 г. интервалы между выбросами составляли уже 20 дней.

Наибольшее разнообразие гейзеров и других послевулканических явлений известно в Йеллоустонском национальном парке в США, в штате Вайоминг. Здесь на площади 8990 км² известно более 3500 термальных источников, многие из которых действуют по принципу гейзера. Известны здесь и фумаролы, сольфатары, мофеты, грязевые вулканы и т. д. Гейзеры Йеллоустонского национального парка по режиму очень разнообразны. Они сосредоточены в нескольких местах, которые называются бассейнами. К наиболее известным принадлежит верхний бассейн (70 гейзеров), включая знаменитый гейзер Старый Служака (Old Faithful). В нижнем бассейне — 40 гейзеров, в бассейне Норрис — более 30. Уже в окрестностях бассейнов можно почувствовать характерный запах, поскольку воды гейзеров содержат, кроме оксида углерода (IV), также и сероводород. Гейзер Старый Служака является примером регулярных извержений. В течение многих лет интервалы между выбросами составляют 60—65 мин. Вода в гейзере в начале извержения имеет температуру 112°C, а затем в конце — 93°C. Гейзер за один раз выбрасывает 45—55 тыс. л воды на высоту 50 м. Возле этого гейзера построен отель с тем же именем, снимок этого гейзера появляется на открытках, почтовых марках и разных сувенирах. Среди других гейзеров Йеллоустонского национального парка были известны уже не извергающиеся сейчас Эксельзиор и Гигант, которые поднимали струи воды на высоту 80—90 м.

Интересна история открытия района Йеллоустонского национального парка. В 1807 г. на территорию его пришел первый белый — охотник по имени Колтер. Он рассказывал по возвращении такие невероятные истории, что никто не хотел ему верить. Место это прозвали «Ад Колтера». Только почти через 70 лет, в 1870 г., для изучения этих удивительных явлений была послана экспедиция под руководством генерала Вашингтона. Через год конгресс США направил туда экспедицию географа А. Хейдена, которая составила карту этого района. 1 марта 1872 г. область была объявлена охранной зоной, и здесь был организован национальный парк.

В Новой Зеландии действовал самый крупный гейзер Ваймангу (Крылатая вода). В течение своей короткой

жизни с 1899 по 1904 г. он периодически выбрасывал около 800 000 л воды на высоту 450 м. Извержения прекратились, когда понизился уровень соседнего озера Таравера.

У нас в стране гейзеры имеются лишь на Камчатке в районе реки Паужетки и в долине реки Гейзерной, где они наблюдаются на протяжении 2,5 км. Камчатские гейзеры открыла географ Т. И. Устинова в 1941 г. Здесь, в долине реки, в ее нижнем течении, на левом берегу, располагается 25 гейзеров. В долине обилие пара, взлетают брызги, слышатся шипение и всплески. По склонам стекают горячие ручьи, то исчезающие, то вновь появляющиеся среди натеков кремнистых отложений и ярких полос термальных водорослей желтого, оранжевого, зеленого или бархатно-черного цвета. Через определенные промежутки взлетают столбы кипятка и пара. Самым крупным гейзером является Великан. Температура в нем достигает 96—99°C. Вода при взрыве поднимается на высоту нескольких десятков метров, а столб пара — до 300 м.

Гейзеры недолговечны. Многие из них действовали в течение нескольких лет, а затем прекращали свое существование.

Для объяснения гейзерных явлений было предложено много гипотез. Согласно одной из них, взрывные выбросы воды из гейзеров происходят в результате осуществления физических процессов. Трубообразная трещина заполняется водой почти до уровня земной поверхности. Снизу этот столб воды подогревается вулканическими газами или горячими породами. Температура воды в нижней части столба поднимается выше точки кипения, но, поскольку давление столба воды велико, кипения не происходит. Такое перегретое состояние воды очень неустойчиво. Образование нескольких газовых пузырей приводит к расширению столба воды, и вода переливается через край гейзера. Это приводит к снижению общего давления столба воды. Перегретая вода при понизившемся давлении в форме цепной реакции быстро превращается в пар. Смесь пара и горячей воды извергается мощной струей. Затем опустошенное отверстие гейзера вновь постепенно заполняется водой, и цикл повторяется. Извержение гейзера может быть ускорено добавкой мыла в устье жерла, что вызывает вспенивание и уменьшение поверхностного натяжения воды. Но сейчас использовать этот способ запре-

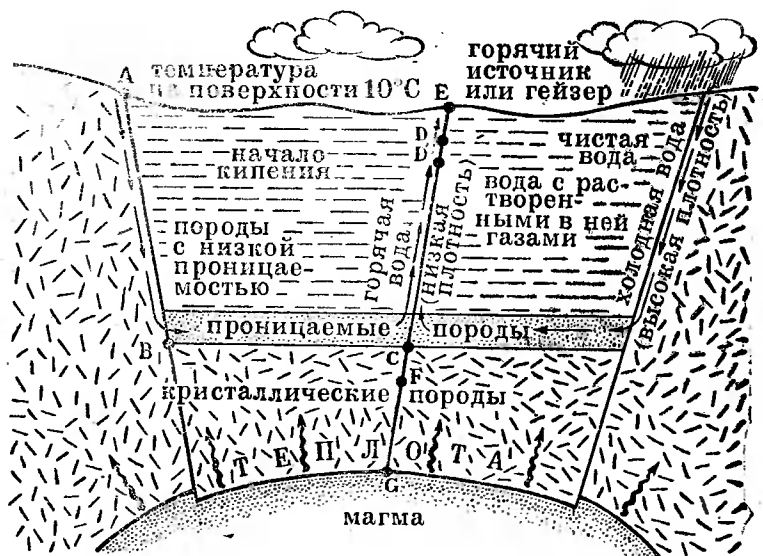


Рис. 18. Схема действия гейзера с указанием циркуляции горячей и холодной вод.

щено. На рисунке 18 изображена схема поступления грунтовой воды на глубину и затем подъема ее после подогрева.

Воды некоторых гейзеров содержат растворенные вулканические газы, но их никогда не бывает более 5%. Гейзеры выносят на поверхность большое количество растворенного оксида кремния (IV). В результате около устья формируются широкие отложения или крутые возвышения самых различных форм. Часто гейзеры называют, исходя из их причудливых форм: Замок, Бутылка, Улсй и т. д. Образующую породу называют *кремневым туфом* или *гейзеритом*. Гейзерит слагает конус высотой до 3 м или отложение террасы.

Время активной жизни вулкана обычно составляет несколько десятков тысячелетий (от 20—60 тыс. до 100 тыс. лет). Послевулканическая деятельность продолжается гораздо дольше, иногда несколько миллионов лет. Но, как только вулкан перестал поставлять материал на поверхность, сразу же начинаются процессы разрушения вулкана.

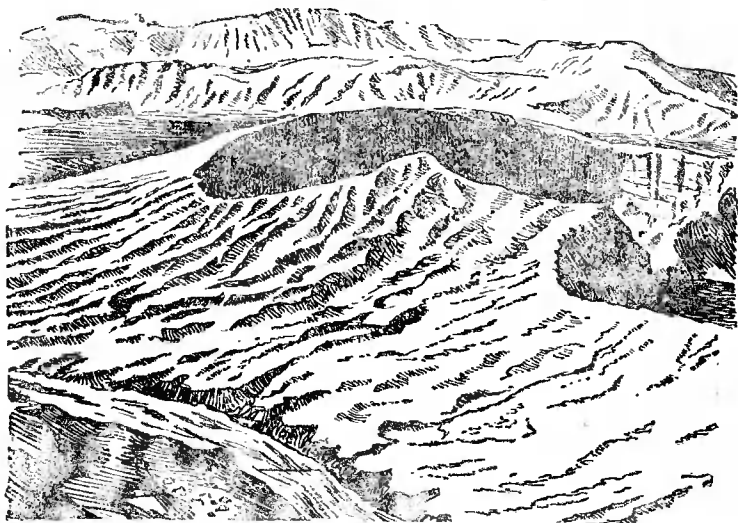
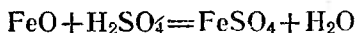
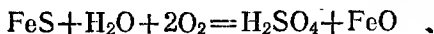


Рис. 19. Полуразрушенные кратеры потухшего вулкана.

нической горы (рис. 19). Этот вулкан, сохранивший свою форму, но не проявляющий никаких признаков активности в продолжение исторического периода, считается потухшим. Для него характерен размыв кратера, глубокие промоины на склонах вулканической горы. Их иногда называют *барранкосы* (по исп. *barraпсо* — *ущелье, глубокий овраг*). Разрушение вулкана происходит под действием механического выветривания: сползания обломочного материала по склонам вулкана, сноса его временными ручьями, возникающими при таянии снега, льда или во время дождей. Такие вулканы, считающиеся потухшими, иногда снова начинают извергаться. Так случилось, например с вулканом Безымянный на Камчатке в 1955 г. Поэтому потухшие вулканы, расположенные в районе действующих вулканов, предлагают называть уснувшими.

Процесс выветривания не связан с деятельностью вулканов. Это обычный природный процесс разрушения, происходящий под воздействием температуры, воды, оксида углерода (IV), органического вещества и т. д. Но по сравнению с обычным химическим выветриванием процесс в вулканических районах происходит гораздо интенсивнее.

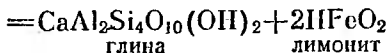
Причиной того являются весьма агрессивные воды, стекающие по склонам вулкана, образующиеся под воздействием фумарол, термальных источников, гейзеров. Оксид углерода (IV) повышает химическую активность вод, увеличивая концентрацию водородных ионов. В результате окисления сульфидов образуются сульфатные растворы:



Под влиянием этих растворов происходит почти полное перерождение вулканических пород: они превращаются в глины. Вода действует путем непосредственного растворения, гидратации (вытеснения ионом H^+ металлов из минеральных химических соединений) и гидролиза (приводящего к полному распаду минералов). Кислород воздуха при этом выступает в качестве энергичного окислителя. Значительная часть веществ горных пород переходит в раствор (коллоидный и ионный) и начинает мигрировать с водой. Происходят реакции глинизации пород:



пироксен плагиоклаз вода

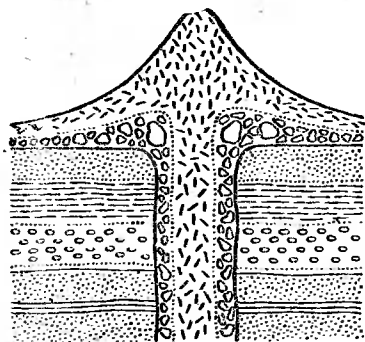


глина

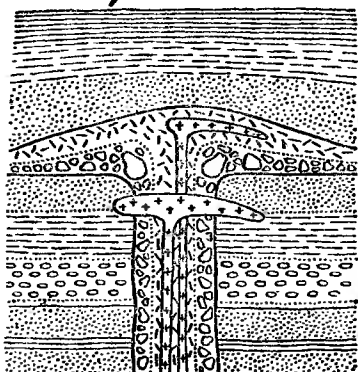
лимонит

Глины — наиболее обычные образования химического выветривания в вулканических районах. В зависимости от химического состава первичных пород глины бывают железистыми, магниевыми, кальциевыми и т. д., а также могут сопровождаться другими новообразованными минералами: опалом (SiO_2), лимонитом (HFeO_2) и др.

Превращение твердых горных пород в рыхлые глинистые образования во многом способствует размыву и интенсивному разрушению потухших вулканических гор. В результате этих процессов за многие тысячелетия они будут полностью размыты, или, как говорят геологи, эродированы. Их остатки скроются под более молодыми наслоениями. На земной поверхности не останется никаких следов от бывших здесь некогда грандиозных вулка-



1



2

Рис. 20. Стадии разрушения вулканической горы (1) и захоронения ее остатков под более молодыми наслоениями (2).

нических сооружений, и ничто не будет свидетельствовать о бушевавших огненных бурях. На рисунке 20 (1 и 2) можно видеть две стадии последовательного разрушения и захоронения вулканической горы. Иногда более молодые наслоения бывают размыты, и перед взором исследователя появляются руины древних вулканов. В других случаях геологи вскрывают остатки древних вулканов с помощью глубоких шахт и буровых скважин. Существует целый ряд методов, как по остаткам вулкана восстановить его первичную форму. Они основаны на знании внутренних закономерностей строения вулканических сооружений. Многие вулканические породы (лавы, туфы и др.) занимают вполне определенное положение, которое зависит от характера некогда происходившего извержения. Таким образом устанавливаются места существования бывших кратеров, конусов, экструзивных куполов и многих других форм вулкана. К числу факторов, которые используются при восстановлении характера ископаемых вулканов, принадлежат многие детали строения, вещественного состава и химизма лав и туфов.

При застывании расплавленных лав образуются весьма оригинальные формы, которые часто являются геологическими достопримечательностями. На Гавайях и в

некоторых других местах очень широко распространены так называемые *канатные* или *кишечные лавы* (рис. 21). Поверхность лавового потока здесь сморщена, скручена и изогнута так, что напоминает падающую складками тяжелую одежду или сложенный капат. Такие формы возникают в результате волочения и скручивания тонкой, пластичной корки лавового потока. В узком потоке лавы середина движется с большой скоростью, чем края, и поэтому волны изгибаются и так застывают. Направление изогнутости волн используют для определения направления движения потока.



Рис. 21. Канатная лава (Гавайские острова).

Очень интересными образованиями в застывшей лаве являются поры, различные пустоты и отдушины. Пористые лавы образуются при выделении газа из магмы при уменьшении давления. Газ начинает образовывать пузырьки, которых по мере снижения давления становится все больше и больше. При быстром остывании газовые пузырьки сохраняются в лаве, образуя пустоты или поры. Формы и их размеры бывают самыми различными. Иногда встречаются трубчатые пустоты — вертикальные, почти прямолинейные, длиной до 1,5 м. Их появление связывают с прорывом лавы струями пара, образовавшегося за счет воздействия раскаленных лавовых масс на водные потоки или ледники.

В лавовых потоках таким же способом возникают и более крупные отдушины длиной до 10 м и диаметром до 1 м.

А вот образование лавовых пещер происходит другим способом. Обычно верхняя часть лавового потока уже застыла, а на глубине лава продолжает оставаться расплавленной и течет. Вытекая из-под лавовой корки, она оставляет за собой крупные пустоты типа тоннелей или пещер. Некоторые из них прослеживаются на расстоянии более

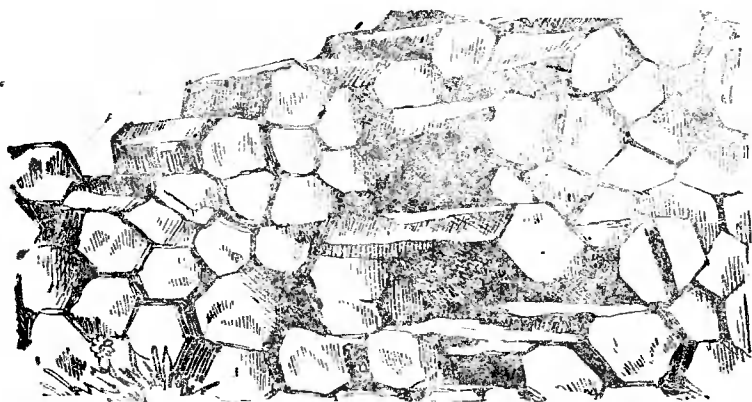


Рис. 22. Каменная «поленница», образовавшаяся при застывании лавового потока.

1 км и достигают в диаметре 15 м. Такие лавовые пещеры на северо-востоке Калифорнии служили укрытием для индейских воинов во время их войны с белыми завоевателями.

И еще об одной форме застывших лав следует рассказать. Взгляните на рисунок 22, изображающий небольшой поток лавы. Не правда ли, она немного напоминает поленницу дров? Эти почти правильные шестигранные призмы или столбы образовались при застывании лавы. Многие из вас, наверное, видели засохшую корку грязи, которая разбита неправильными многоугольниками. Примерно такой же механизм характерен для образования призм в лаве. Когда лава остывает, она сжимается, дает трещины. Эти трещины разбивают лавовый поток на столбы или колонны. В сечении столбы имеют, как правило, шестигульник, но встречаются четырех-, пяти- и восьмигранные столбы. Такие образования широко развиты во многих вулканических районах, особенно для лав базальтового состава. Иногда поля этих лав образуют подобие торцевой мостовой, где сечения столбов напоминают отдельные шашки. Наиболее известна Мостовая гигантов, или Дорога гигантов, в графстве Антрим на севере Ирландии. Она поражала своей красотой еще древних кельтов, о ней складывались легенды и сказа-

ния. Согласно одной легенде, эту дорогу построил через море к берегам Шотландии великан Фин Мак Коул, чтобы встретиться со своим врагом — шотландским великаном.

В нашей стране такие столбы в лавовых потоках известны во многих местах: в Закавказье (Баш-Гарни), на Камчатке и т. д. Иногда столбы располагаются горизонтально. Это характерно для тех случаев, когда лава застывает в трещинах в земной коре. Обычно столбы располагаются перпендикулярно поверхности охлаждения потока. Но иногда столбы лавы образуют подобие цветка, разрастаясь во все стороны от определенного центра. Центром обычно является ствол дерева, захваченного потоком лавы. Такие лавовые «розы» встречаются редко; они известны, например, в ГДР.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ВУЛКАНОВ

Мы рассмотрели процесс развития вулканов: от их зарождения до прекращения активной деятельности, затухания и размыва вулкана. Какое же практическое значение имеют вулканы?

В предыдущих главах неоднократно упоминались грандиозные катастрофы, связанные с вулканическими извержениями, и тот вред, который они причинили людям. И самой первой и, пожалуй, одной из главных задач современной науки о вулканах является прогноз вулканических извержений. Если мы научимся, предсказывать извержения вулканов, то сумеем значительно уменьшить тот урон, какой они приносят живым существам и материальным ценностям. Люди будут эвакуированы с площадей, подвергающихся опасности, могут быть вывезены материальные ценности и домашние животные.

Но уже достаточно сказано о разрушительном действии вулканов. Ведь вулканы приносят человечеству также и добро. Прежде всего они «создают» новые земли. К примеру, все тихоокеанские острова имеют вулканическое происхождение. Вулканические почвы чрезвычайно плодородны, потому что в больших количествах содержат фосфор и калий. Из вулканических пород и фумарол люди издавна добывали серу и бор. С вулканической деятельностью связано образование месторождений многих полезных ископаемых, таких, как ртуть, серебро, золото, уран, свинец, железо, никель, медь, марганец и т. д. Поля горных пород, измененных поствулканическими процессами, дают месторождения каолина, минеральных красок, глин, а сами вулканические породы часто представ-

ляют собой ценные строительные материалы: перлиты, пемзы, шлаки, туфы и т. д.

Энергетический кризис заставляет человечество искать новые источники энергии. Обычно надежду возлагают на ядерные электростанции, но запасы ядерного горючего также не бесконечны. Единственным практически вечным генератором энергии может служить вулканическая деятельность.

В главе 4 уже отмечалось, какая колоссальная энергия выделяется в результате вулканической деятельности. Люди пока научились использовать лишь энергию горячих вод, связанных с вулканами, так называемую *геотермальную энергию*. Первая удачная попытка ее использования была проведена в 1904 г. в Лардерелло в Тоскане (Италия). Здесь на площади 200 км² из многочисленных источников выделяются перегретая вода и пар следующего состава: H₂O — 95,55%, CO₂ — 4,26%, H₂S — 0,09%, H₃BO₃ — 0,03%, NH₃ — 0,03%, CH₄ — 0,015%, H₂ — 0,004%. С давних пор из паров добывали борную кислоту, аммиак. Интересно отметить, что именно в Лардерелло в 1895 г. в газах был открыт гелий, вскоре после того, как он был установлен на Солнце. В 1904 г. Дживори Конти предпринял первую попытку использовать энергию парового источника. С самого начала появились большие трудности, которые были связаны с разрушающим действием природной кислоты на металлические части паровых машин. Однако эти трудности были преодолены, и в настоящее время генераторы в Лардерелло дают 3 млрд. кВт·ч в год или $1,1 \cdot 10^{16}$ Дж.

Явление в Лардерелло связано с исключительно благоприятной геологической обстановкой. В верхних частях земной коры здесь располагаются слои глины, непроницаемые для пара и воды. Пары и газы, поднимающиеся по трещинам с глубины, под непроницаемой крышкой находятся под давлением до $25 \cdot 10^5$ Па и при температуре до 230°C. Остается пробурить эту непроницаемую крышку и направить пар по трубам в паровую машину. В других частях Земли обстановка для эксплуатации геотермальной энергии не так благоприятна: у поверхности там залегают пористые породы. Тем не менее использование вулканической энергии постоянно расширяется. Электростанция в Лардерелло была единственной до 1959 г., когда в Новой Зеландии в районе Вайракей

была построена другая, мощностью 200 МВт. Воды Вайракей нейтральные, они содержат хлориды натрия и калия. Производство электрической энергии на базе подземного пара удовлетворяет около четверти энергетических потребностей острова Северного в Новой Зеландии. Почти одновременно были введены в строй еще три геотермальные электростанции — в Тоскане (Италия), Мексике и Калифорнии. В настоящее время существует уже более шестнадцати геотермических электростанций и строится двенадцать. К середине 70-х годов этого века общая мощность таких электростанций в США составила 500 МВт.

Геотермальную энергию можно использовать иначе. Столица Исландии Рейкьявик уже сто лет отапливается горячей водой из гейзеров без промежуточного производства электрической энергии. Горячие воды, которые выделяются из гейзеров и специальных буровых скважин с температурой 130°C , используются для отопления жилищ, теплиц, плавательных бассейнов и других сооружений. Скважины имеют глубину 800—1500 м.

Многие области на Земле лежат на «горячей подушке», где температура на глубине 2—8 км достигает 350°C . По подсчетам ученых, путем охлаждения 1 м^3 горной породы с 350 до 177°C можно получить такое же количество теплоты, которая вырабатывается из 9 млн. т. нефти.

Совсем недавно югославские геологи установили, что известный курортный город Загреб располагается над подземным озером с горячей водой. На глубине 700 м были открыты большие запасы горячих вод с температурой 60°C и давлением $8 \cdot 10^5$ Па. Уже подготовлены проекты отапливания этой водой городских больниц, школ, жилых домов.

В нашей стране геотермальная энергия интенсивно используется на Камчатке. Все, кому довелось побывать в Паратунке, Малках или Долине Гейзеров, восторгаются природными богатствами Камчатки, особенно целебными источниками, гигантскими подземными бассейнами, где вода находится в состоянии перегретого пара. Со временем здесь будут созданы курорты и санатории. Но самое главное — эти воды представляют собой неиссякаемый источник энергии. На ноябрьском (1979 г.) Пленуме ЦК КПСС отмечалось, что при рассмотрении комплекса энер-

гетических проблем надо предусмотреть и использование геотермальных ресурсов. На Камчатке уже накоплен значительный опыт хозяйственного использования термальных источников. Более десяти лет выращивает овощи на подземной теплоте совхоз «Термальный» в Паратунке. 6 га его теплиц отапливаются горячей водой, поступающей из буровых скважин. За это время население Камчатской области получило около 100 тыс. т огурцов, помидоров, зеленого лука и других овощей. На полуострове Камчатка действует первая в нашей стране Паужетская геотермальная электростанция мощностью 5 тыс. кВт. С момента пуска она уже выработала 164 млн. кВт·ч электроэнергии. На выработку этого количества электроэнергии потребовалось бы сжечь 65 тыс. т угля или мазута. В 1980 г. мощность электростанции удвоилась, а запасы горячей воды позволяют довести ее мощность до 17 тыс. кВт. Но район Паужетки не единственный на Камчатке. Проектируется строительство новой геотермальной электростанции на базе Мутновского месторождения, где буровые скважины вскрыли перегретый пар с температурой 225°C. Выявлено новое Кошелевское месторождение горячей воды. Недалеко от Петропавловска-Камчатского работает экспериментальная электростанция на фреоне. Это органическое вещество имеет температуру кипения всего 60°C. Под воздействием горячей воды фреон легко превращается в пар и вращает турбогенератор. Такой способ выработки электроэнергии очень экономный. Это первая электростанция подобного типа в мире. (Вторая такая электростанция строится в США в городе Солтон-Си.) Из других районов можно отметить Кавказ, где термальные электростанции имеются в Махачкале.

Несмотря на широкое развитие вулканических областей на Земле, запасы геотермальной энергии намного меньше, чем можно было предполагать. Это обстоятельство связано с тем, что геологические условия редко благоприятны для создания перегретого пара, как мы наблюдаем, например, в Лардерелло (Италия). Пар под землей должен находиться под большим давлением или иметь высокую температуру. Приток воды не должен быть очень большим, потому что в противном случае вода нагреется мало. Горные породы должны быть проницаемыми для горячих вод. Обычно рассчитывается, что геотермальные

поля будут давать энергию в течение столетий. Но через каждые 15—20 лет приходится бурить новые скважины, поскольку старые за это время зарастают отложениями оксида кремния SiO_2 и карбоната кальция CaCO_3 , которые выносятся горячей водой.

Большую пользу приносят человечеству вулканы как источники образования различных месторождений полезных ископаемых — скоплений минеральных веществ, которые по количеству и качеству пригодны для разработки и промышленного использования. Месторождения служат источником всех металлов, агрохимического сырья и других веществ, используемых в народном хозяйстве. С каждым годом увеличивается потребление полезных ископаемых, растет необходимость дальнейшего расширения минерально-сырьевой базы. В любой горной породе: граните, базальте и т. д. находятся практически все элементы периодической системы Д. И. Менделеева. Но содержание их очень низко и для многих металлов, например, не превышает нескольких граммов или даже миллиграммов в тонне породы. Понятно, что такая горная порода не может быть месторождением, потому что добывать такие малые количества металла просто не имеет смысла, так как это экономически невыгодно. Поэтому ищут месторождения, т. е. те участки горных пород, где произошла значительная концентрация данных металлов и их содержание увеличилось в сотни и тысячи раз. К подобному накоплению веществ приводят различные геологические процессы, и среди них важное значение принадлежит вулканизму. С деятельностью современных и древних вулканов связывается образование месторождений железных руд, марганца, бокситов, фосфоритов, бора, серы, меди, цинка, свинца, барита и гипса, олова, ртути, золота, серебра и сурьмы.

С вулканическими процессами тесно связаны процессы гидротермальные, названные так потому, что главное участие в них принимает горячая вода (с греч. «гидро» — вода, «термо» — теплота). Эти процессы очень важны для образования минералов и руд. Как уже отмечалось в предыдущей главе, в начальные стадии активности вулканов происходит извержение магм. В этот момент основная часть летучих соединений металлов рассеивается в окружающей среде. Но вот излияния лав и выбросы туфов заканчиваются, хотя поступление теплоты из недр Земли еще продолжается. Возникают кратерные озера и источ-

ники с горячими водами. Горячая вода образуется за счет конденсации пара, выделившегося из глубины, а также за счет атмосферных вод (дождевых, снеговых), проникших по трещинам на большую глубину и нагретых до температур 100—200°C. Гидротермальные явления еще долго продолжаются после того, как основной вулканический процесс уже прекратился. Подтверждением служит тот факт, что термальные источники гораздо шире распространены на поверхности Земли, чем активно действующие вулканы. Примером может служить полуостров Камчатка, где в современную эпоху действует не более тридцати вулканов, а число групп термальных источников превышает сотню. Эти участки представляют собой аномалии теплового поля, т. е. такие места, где *тепловой поток*, поднимающийся из глубин Земли, значительно увеличивается за счет горячих расплавленных масс на глубине.

Горячие воды, выделяющиеся при вулканической и послевулканической деятельности, содержат большое количество растворенных металлов. Например, только с одного вулкана Эбеко на острове Парамушир воды ежегодно выносят в океан около 700 т вещества, в том числе 30 т алюминия, 16 т железа, 12 т натрия, 6 т калия, 23 т кальция, 10 т магния, 17 т оксида кремния (IV), 148 т хлора, 416 т серной кислоты. Кроме них, в океан выносятся большое количество рудных элементов.

В областях активного вулканизма умеренных широт хорошо различаются кислые хлоридно-сульфатные воды глубинного формирования, имеющие низкий pH (около 1) и высокое количество растворенных компонентов, и сульфатные воды с pH 2—3 и небольшим количеством растворенных компонентов (прежде всего алюминия).

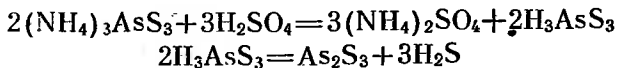
В кратерных озерах также формируются воды с высоким содержанием различных солей. Например, на острове Ява в кратере вулкана Кава-Иджен вулканические газы растворяются в воде озера, образуя смесь серной и соляной кислот. В результате формируются ультракислые сульфатно-хлоридные воды с pH 0,02, содержащие в 1 л более 5 г алюминия, до 2 г железа, 25 мг титана. Содержание кальция, магния, натрия и калия примерно одинаково — около 1 г/л. В целом озеро Кава-Иджен содержит почти 500 тыс. т растворенных металлов, в том числе около 200 тыс. т алюминия.

Какие процессы поставляют рудное вещество в место-

рождения, связанные с вулканизмом? Это прежде всего вынос металлов газовыми и жидкими компонентами при фумарольной деятельности. В этих компонентах содержатся обычно высокие концентрации меди, свинца, цинка, алюминия, железа, марганца и других элементов. Например, в возгонах Долины Десяти Тысяч Дымов на Аляске содержание меди составляет 0,23%, в возгонах японских вулканов — 0,01%. Базальтовые лавы более насыщены газами, а их выделение происходит быстрее, чем из андезитовых лав. Конденсаты высокотемпературной стадии обогащены кислыми газами (HF , HCl , SO_2 , SO_3) и имеют кислую реакцию ($\text{pH} < 1$). В этих условиях в них растворяются даже такие труднолетучие элементы, как железо, алюминий, медь, свинец и т. д. Но уже при $\text{pH} > 4$ железо и алюминий в составах конденсатов не устанавливаются. Большая роль в выносе рудного вещества и его отложении принадлежит горячим водам. Иногда в них отмечаются очень высокие концентрации различных элементов. Так, в Южной Калифорнии в буровой скважине на глубине 5232 м были вскрыты высокоминерализованные воды. На поверхности в них моментально образовался осадок, который содержал Cu 20%, Ag — 2%, Pb — 0,02%, Sb — 0,3%, S — 8%. Часто эти воды имеют поверхностное происхождение. Просачиваясь после дождя в глубь Земли, в результате растворения газов они приобретают характер концентрированных кислот и начинают растворять вулканические породы. При этом они обогащаются рудными элементами, а затем выходят на поверхность в виде термальных источников, ручьев, горных потоков. В литре такой воды содержатся десятки и даже целые граммы растворенных металлов, а pH их от 1 до 3. При резком изменении физико-химических условий, например, в тех местах, где глубинные воды смешиваются с поверхностными, происходит выпадение этих металлов в осадок.

В областях активного вулканизма и связанной с ним гидротермальной деятельности предоставляется редкая возможность исследовать современные процессы, которые приводят к образованию рудных месторождений. Вулканологами было установлено, что, например, в кальдере вулкана Узон на Камчатке происходит образование руд и нефти, которое связано с глубинными перегретыми хлоридно-натриевыми растворами. Специальными приборами произведена регистрация физико-химических условий ру-

дообразования. Кальдера Узон — огромная чашеподобная впадина диаметром около 12 км, покрытая озерами, грязевыми котлами, небольшими вулканами и пересеченная многочисленными ручьями с горячей водой. В одном месте на территории кальдеры на краю ям с кипящей водой были найдены оранжевые каемки мышьяковистых соединений и сульфидов. Когда этот участок раскопали, на площадке был вскрыт желто-оранжевый слой, сложенный из сульфидов мышьяка и сурьмы: реальгаром AsS_3 , аурипигментом As_2S_3 , антимонитом Sb_2S_3 и самородной ртутью. На выходах рудоносных руд обнаружены пузырьки нефти. Так был выявлен процесс современного образования рудных минералов. После того как вулканологи провели здесь дополнительные работы, было установлено, что рудные минералы осаждаются из глубинных перегретых хлоридно-натриевых вод. В литре такой воды содержится 1,5—4,5 г растворенных веществ, из них на долю хлора приходится 0,5—2,5 г, натрия — 0,5—1,5 г. Отмечается также высокое содержание кремниевой кислоты, соединений бора и металлов: As — 30 мг/л, Sb — 0,7 мг/л, Hg — 0,01 мг/л, Pb — до 1 мг/л, Zn — до 0,1 мг/л, Cu — 0,1 мг/л. В меньших количествах в хлоридно-натриевых растворах содержится молибдена, бария, стронция, золота. Предполагается, что мышьяк в растворах переносится в виде легкорастворимых солей тиомышьяковистой (H_3AsS_3) и тиомышьяковой ($\text{H}_3\text{As}_3\text{S}_4$) кислот, которые на поверхности разлагаются:



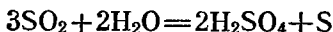
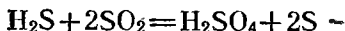
Так примерно происходит образование сульфида мышьяка — аурипигмента — на поверхности. Аналогичные реакции характерны и при выпадении в осадок других сульфидов, для образования которых важное значение имеет реакция с сероводородом. Обычно предполагают, что большую роль при выпадении металлов в осадок играет резкое снижение давления.

Еще более широко распространены месторождения серы, непосредственно связанные с вулканизмом. Этот элемент VI группы периодической таблицы Д. И. Менделеева вам хорошо знаком. В чистом виде сера представляет собой твердое кристаллическое вещество лимонно-желтого или медово-желтого цвета. В природе она встречается в самородном виде или в форме соединений: сульфидов, по-

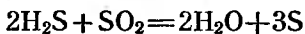
лисульфидов, сульфатов, распространенных либо в твердом состоянии, либо растворенными в водах морей и океанов. Сера широко применяется в народном хозяйстве для получения серной кислоты, в бумажной промышленности, в сельском хозяйстве (для борьбы с вредителями растений), в резиновой промышленности, для изготовления пороха и спичек, в медицине. Образование промышленных количеств серы очень часто связано с вулканическими процессами. Из глубин земных недр при охлаждении выделяется много летучих соединений различных металлов с серой. Об этом мы можем судить не только по запаху, характерному вулканическим извержениям или удушливым газам сольфатар; сера выносится также с растворами, образуя рудные жилы.

Одно из первых месторождений серы стали разрабатывать испанские конкистадоры на вулкане Попокатепетль в Мексике в период колонизации. По приказу Фернандо Кортеса в 1519 г. была послана экспедиция на вершину вулкана (5452 м), которая должна была выяснить причину дыма, поднимающегося над горой. До вершины экспедиция не дошла, потому что дорогу ей преградил глубокий снег, ветер нес тучи непла и дыма. Но испанцы увидели, как дым с большой силой и шипением вырывается из трещин. Командовал экспедицией Диего де Ордаз. Этот «вулканолог» с разрешения короля Карла V получил право посить в своем дворянском гербе изображение дымящегося вулкана. За «научной» экспедицией через два года последовала экспедиция поисковая: испанцы искали залежи серы, необходимые для изготовления пороха. На вершину с четырьмя проводниками поднялся Франсиско Монтана. Его спустили в корзине на дно кратера на глубину 120 м. Здесь он и обнаружил богатые залежи серы. Почти сразу же испанцы организовали ее добычу. Предполагается, что за все время было добыто около 1 млн. т серы. Серу обрабатывали в деревне Тламасаз — в самом высоком поселении на склоне горы, расположенном на высоте 3882 м.

В районах действия современных вулканов можно непосредственно видеть, как отлагается самородная сера. Этот процесс происходит в результате неполного окисления сероводорода, взаимодействия сероводорода с оксидом серы (IV), а также оксида серы (IV) с водой:



Эти образования на поверхности обычно наблюдаются около выходов фумарольных газов, в которых содержание сероводорода и оксида серы (IV) иногда достигает почти 100%. Отложение самородной серы происходит также на дне кратерных озер. Фумаролы поставляют из глубины содержащие серу газы, и под водой, в условиях их неполного окисления, отлагается сера:



Сера может изливаться в расплавленном виде при извержениях вулканов. Такое явление часто наблюдается на японском вулкане Сиретоко-Йосан на острове Хоккайдо. Сера изливалась здесь вместе с горячей водой и паром из кратера диаметром около 30 м. В результате этого процесса вокруг вулкана накопилось около 20 тыс. т чистой серы, а окрестности были покрыты как снегом порошком распыленной серы. Почти все запасы серы на Земле связаны с вулканическими месторождениями. А запасы эти велики. В Чили, например, они оцениваются в 100 млн. т, на Алеутских островах — в 200 млн. т и т. д. Представьте, как было бы замечательно, если бы вулканы извергали и чистые металлы: железо, алюминий, золото! Но по ряду физико-химических причин на Земле этого не происходит. А вот изливание рудных сульфидных лав было отмечено на вулкане Килауэа на Гавайских островах. При понижении температуры базальтовой лавы с 1140 до 1060°C в затвердевшую лавовую корку внедрился расплав, состоящий из сульфидов железа, меди, никеля: Fe — 59%, Cu — 5%, Ni — 1%, S — 32% и O₂ — 3%.

Буквально на наших глазах происходит образование железных руд около действующих вулканов. Например, в кальдерных озерах и устьях рек, в которые впадают термальные источники, откладывается большое количество лимонита $\text{HFeO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Например, река Юрьева, впадающая в Охотское море, ежедневно выносит 35 т железа. Мощные залежи бурого железняка откладываются в кратерах и на склонах вулканов (рис. 23). В кальдере вулкана Санторин (в Эгейском море), которая имеет пло-

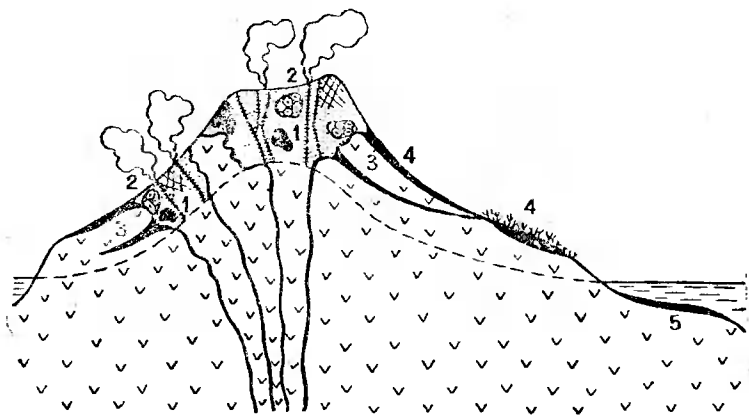


Рис. 23. Отложение соединений железа в различных частях вулкана (обозначены цифрами).

щадь 83 км², ежедневно отлагается 500—600 т гидроксидов железа.

Некоторые месторождения образуются при подводном вулканизме. При подводных извержениях или извержениях на вулканических островах пепел и обломки лавы падают в воду, где переносятся и сортируются подводными течениями. Вулканические газы и пары воды, несущие с собой многие металлы, смешиваются с морской водой и в результате изменения химической среды выпадают в осадок, образуя рудные скопления. Оксид углерода (IV), выделяющийся в морскую воду, понижает щелочность, значение pH воды. При выделении большого количества сероводорода H_2S из воды непосредственно осаждаются сульфиды железа, свинца и цинка.

Наиболее интересный объект, где наблюдается современное образование руд, связанных с вулканизмом, находится в Красном море. Здесь обнаружены две впадины — Дискавери и Атлантис-II, на дне которых выходят горячие источники с температурой около 50°C. Эти воды несут с собой большое количество рудных элементов. Последние отлагаются на дне, образуя современные месторождения. В морской воде над термальными источниками Красного моря на глубинах 2000—2100 м установлено содержание оксида кремния (IV) выше 600 мг/л. Концент-

рация марганца в природных водах составляет 82 мг/л, что более чем в 25 000 раз превышает концентрацию этого элемента в морской воде нормальной солености. Эта концентрация заметно возрастает по мере приближения к горячим источникам. Придонные воды на участках просачивания глубинных вод содержат в 27 000 раз больше свинца, чем морские воды в обычных условиях, в 1400 раз больше цинка и в 61 раз больше меди. Эти металлы осаждаются вместе с илами. Подсчитано, что за время просачивания горячих вод на дне впадин Дискавери и Атлантис-II накопилось 1 млн. т меди, 3 млн. т цинка, 80 тыс. т свинца, причем в придонных илах содержание этих веществ очень высоко: Cu — 0,5—4,6%, ZnO — 1—11%, Pb — 0,1—0,2%. А это уже крупное промышленное месторождение.

Проводя исследования океанического дна с помощью траления, отбора донных проб, фотографирования с палуб научно-исследовательских кораблей, ученые установили, что во многих местах дно Тихого и Атлантического океанов буквально усеяно мелкими неправильными шариками, лепешками, желваками размером 3—7 см, которые иногда достигают в диаметре 1,5—2 м. В некоторых местах площадь на дне океана на 20—50 и даже на 90% покрыта такими стяжениями, которые геологи называют конкрециями. В центре их обычно располагаются мелкие обломки вулканических пород, но иногда встречаются зубы акул, раковины и другие органические остатки. Оболочка имеет слоистое строение, в результате чередования прослоек оксидов железа и марганца. Химический состав конкреций следующий: Mn — 24%, Fe — 14%, SiO_2 — 10%. Кроме того, здесь присутствуют такие рудные элементы: Ni — 0,99%, Cu — 0,53%, Co — 0,35%, Pb — 0,1%. Установлены самородные (т. е. чистые) выделения металлов — алюминия, железа, меди, олова.

Образование железо-марганцевых конкреций на дне океана связано с местным повышением содержания железа и марганца в морской воде под воздействием вулканической деятельности. Их образование начинается с выпадения геля гидроксида железа (III). Это вещество оказывает каталитическое воздействие, под влиянием которого происходит осаждение оксида марганца. Как гидроксиды железа, так и гидроксиды марганца характеризуются высокой адсорбционной способностью по отношению к ря-

ду элементов. Поэтому в конкрециях происходит накопление многих металлов.

Площади распространения наиболее ценных железомарганцевых конкреций на дне океанов совпадают с областями развития вулканических островов и подводных вулканов. Если учесть, что в Тихом океане, например, действует не менее ста подводных вулканов, то за миллион лет эти вулканы вынесли в воды океана достаточное количество железа и марганца для образования всех конкреций.

Формы и размеры конкреций, различны в разных частях океанического дна. Ближе к материкам, островам и в экваториальной зоне обычно встречаются мелкие конкреции лепешковидной и неправильной гроздевидной или почковидной формы. Они более мягкие, с шероховатой поверхностью землистого цвета, легко ломаются руками. В тропических районах конкреции более крупные, по форме овальные, желвакообразные, шаровидные. В этих районах они более плотные, с трудом разбиваются геологическим молотком, обычно имеют черную глянцевую поверхность и раковистый излом.

Запасы железомарганцевых конкреций очень велики. Только на дне Тихого океана их масса оценивается совершенно фантастической цифрой — 1 660 000 000 000 т — триллион шестьсот шестьдесят миллиардов тонн. Это, по видимому, основные источники железа и марганца в ближайшем будущем.

Мы ведем свой рассказ о современном вулканизме и современном образовании рудных месторождений. Но аналогичные месторождения формировались и в древности. Многие ученые связывают с вулканизмом крупнейшие месторождения железистых кварцитов Кривого Рога и Курской магнитной аномалии. Это продукты самых древних на Земле вулканов, которые действовали около полутора миллиардов лет назад. Позже вулканические породы и месторождения были погружены на большую глубину и там интенсивно преобразованы. Другой тип древних железорудных месторождений — тип Ланн-Дилль, получивший свое название по железорудному месторождению Ланн-Дилль (ФРГ), имеет возраст несколько сотен миллионов лет. Он, несомненно, связан с подводным вулканизмом. В этих месторождениях линзообразные залежи железных руд — красных железняков — залегают среди вулканиче-

ских лав и туфов основного состава. Такие месторождения широко распространены на Земле и встречаются в Тюрингии (ГДР), Англии, Португалии, Югославии и у нас в СССР на Алтае, в Азербайджане, в Грузии. Образование их, очевидно, происходило за счет поставления железа подводными фумаролами в виде хлорида железа (III), а также при выщелачивании железа, алюминия и марганца из вулканических пород. Глубинные воды, несущие железо, имеют кислый состав (рН 1). При смешении их с морской водой повышается щелочность и рН увеличивается. Оксиды разных металлов выпадают в осадок при разных значениях рН. К примеру, оксид титана (IV) выпадает в осадок при рН 1; оксид железа (II) — при рН 2—3; оксид алюминия — при рН 4,4—6,5; оксид железа (III) — при рН 5,5; оксид марганца (II) — при рН 8,5—8,8 (рис. 24).

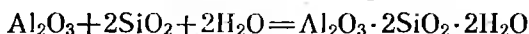
Кроме месторождений, сложенных оксидами железа, встречаются также месторождения, в которых рудные минералы среди древних вулканических пород представлены сульфидами железа и меди — колчеданами. Источником серы при образовании этих минералов являются вулканы. Чаще всего в таких месторождениях распространен железный колчедан — пирит FeS_2 . Залежи пирита с примесью халькопирита достигают в длину 3 км при толщине до 250 м. Такие месторождения известны в Испании, в Японии, на Кипре, в Калифорнии и у нас в СССР на Северном Кавказе, Урале и др.

Для многих месторождений бокситов (источника алюминия) предполагается их происхождение за счет преобразования вулканического пепла. Бокситы состоят в основном из гидратов алюминия: диаспора HAlO_2 , бемита AlOOH , гиббсита $\text{Al}(\text{OH})_3$ — с примесью гидроксидов и оксидов железа. Обычный механизм рудоотложения из морской воды, характерный для месторождений железа, для бокситов не пригоден. Хотя вулканические воды выносят в океан большое количество растворенного алюминия (например, река Юрьева на Камчатке выносит ежедневно 65 т Al), но, в отличие от железа, алюминий уносится водами на более далекие расстояния и выпадает в виде геля лишь при рН 4,1—5,5. Кроме того, эти же вулканические воды содержат большое количество оксида кремния (IV). В процессе отложения и преобразования

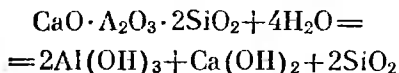


Рис. 24. Химические условия в морской воде в районе подводного гидротермического

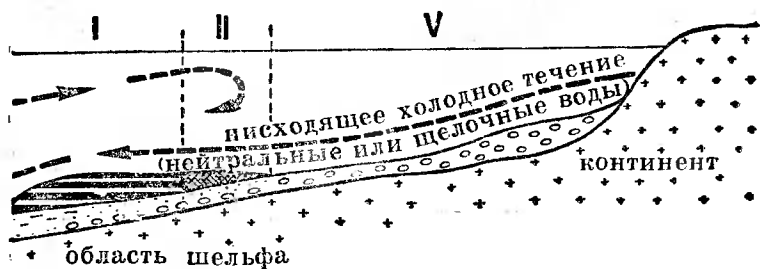
осадка на дне океана оксид алюминия и оксид кремния (IV) взаимодействуют друг с другом:



Так образуются всем хорошо известные глины — сложные алюмосиликаты. Вместо бокситов в этих условиях образуются такие минералы, как каолинит, гидрослюда, монтмориллонит. Поэтому для месторождений бокситов обычно предполагают, что они формируются в результате разложения вулканического пепла в условиях тропического климата. При вулканических извержениях пепел выбрасывается в воздух, в большом количестве откладывается на поверхности островов, затем разлагается с образованием бокситов:



Эта реакция разложения почти обратна той, которая приведена несколькими строчками выше. Такие месторождения бокситов образуются в настоящее время. Например, этот процесс происходит на Гавайских островах на их северных и восточных склонах, где осадков выпадает 760 мм в год. Пористые пещлы и туфы, имеющие возраст около 10 тыс. лет, на наших глазах превращаются в глины и



вулкана и состав соединений железа, выпадающих в различной среде.

бокситы. Более древние месторождения данного типа известны на Урале, в Армении, на Гаити, на Ямайке и во многих других местах.

С вулканическими процессами связано также образование месторождений марганца. Выше уже рассказывалось об образовании железо-марганцевых конкреций на дне океана (с. 103), которые в недалеком будущем, несомненно, станут источниками железа, марганца и некоторых других металлов. Эти образования тесно связаны с вулканическими породами. Но и древние ископаемые месторождения марганца, такие, как Чиатурское в Закавказье, месторождения вдоль восточного склона Урала, месторождения Западной Африки, Японии, Калифорнии, Новой Зеландии, располагаются среди древних вулканических толщ базальтового или андезитового состава. Содержание оксида марганца (II) в этих породах велико. Подсчитано, что из 1 км³ базальтов можно получить 400 000 т оксида марганца (II), даже если будет выделена сотая часть всего марганца, содержащегося в породе. Активный вынос марганца современными вулканическими водами установлен многими исследователями. Например, в японских горячих источниках, имеющих сульфатно-хлоридный состав, содержание марганца достигает 60 мг в литре раствора. Ранее уже говорилось о том,

какие высокие концентрации марганца характеризуют придонные воды Красного моря (с. 103).

Отложение марганца идет в виде силикатов и карбонатов: родонита $MnSiO_3$, родохрозита $MnCO_3$, манганокальцита и других минералов. Под воздействием кислорода воздуха эти минералы окисляются, образуются соединения марганца: псиломелан $K_2Mn_8O_{16}$, манганит $MnOOH$, которые слагают наиболее богатые участки руд с наиболее высоким содержанием марганца.

С вулканическими процессами также связано образование месторождений фосфоритов, являющихся важным агрохимическим сырьем, и бора, применение которого все более расширяется в современной технике. Современное образование фосфоритов было установлено во время рейса научно-исследовательского судна «Витязь» весной 1968 г. В Тихом океане, к западу от Гавайских островов, с морского дна были подняты образцы фосфатизированных базальтов, кремнисто-фосфатных пород и железомарганцевых конкреций. Содержание оксида фосфора (V) в этих образцах достигало 25—30%. Во время извержения подводных вулканов во многих местах земного шара установлено значительное парастание содержания фосфора в морской воде — от 0,5 до 2,12 мг/л. Фосфор, который поступает во время фумарольной деятельности, легко сорбируется на поверхности пепловых частиц — до 0,18%. Древние месторождения фосфоритов почти все размещаются среди вулканических пород. Таковы, к примеру, месторождения Монголии (Хубсугульский бассейн), Калифорнии, Горного Алтая в СССР и т. д.

Крупнейшие месторождения бора образовались за счет выноса этого элемента сольфатарами, фумаролами с последующим его отложением на дне кратерных озер. Такие месторождения известны в США (Крамер, Калико, Дагг), в Турции (Султан-Чаир), в Чили. Главными минералами бора в них являются Colemanит, иньбит, пидермит, бура, кернит. Это все группа боратов. Есть месторождения бора, которые формируются сейчас. Так, в США, в графстве Лейк, есть озеро, где бура $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ отлагается на отмели вместе с содой Na_2CO_3 . Бор и другие компоненты переносятся в озеро термальными источниками из глубины. Минералы образуют толстую корку. После удаления ее за три года нарастает новый слой буры и соды. Еще об одном современном месторождении бора

уже упоминалось раньше (с. 93). Это известные итальянские термы Лардерелло в Тоскане, которые содержат в 1 л пара и воды 0,3—0,5 г борной кислоты и различных ее аммонийных солей и уже многие десятилетия служат источником борной кислоты (до 4,5 тыс. т ежегодно). Здесь практически разрабатываются сами рудоносные растворы.

Все перечисленные месторождения носят общее название — вулканогенно-осадочные. В названии подчеркнут вулканогенный источник рудного вещества и механизм его осаждения в водных бассейнах (океанических, морских, озерных). Месторождения этой группы являются крупным источником железа, серы, бора, меди и др. и имеют важное промышленное значение.

Но рудообразующая роль вулканизма не ограничивается появлением вулканогенно-осадочных месторождений. Существует еще одна очень важная группа промышленных месторождений, связанных с вулканизмом. Это так называемые гидротермальные месторождения. Источником рудного вещества в них являются те же самые газово-водные растворы, связанные с последними стадиями вулканической деятельности. Но по ряду причин эти растворы не достигают поверхности Земли и откладывают свой полезный груз на глубине, там, где физико-химические условия благоприятствуют этому. Обычно отложение руд происходит по трещинам в горной породе, поэтому образуются рудные жилы и прожилки. Месторождения такого типа являются ценными источниками мышьяка, молибдена, урана, золота, меди, серы, ртути, флюорита CaF_2 и т. д. Условия выпадения металла в осадок, так же как и на поверхности, зависят от многих причин: температуры, давления, pH среды, наличия катализаторов и т. д. Образование минералов на глубине происходит по таким же химическим реакциям, которые мы проводили для поверхностных процессов. В связи с неодинаковыми химическими свойствами элементы откладываются в трещинах на разной глубине. Наиболее близко к земной поверхности образуются месторождения ртути, мышьяка, серы, бора. Для этих элементов характерны высокая летучесть и низкие температуры выпадения в осадок. Более глубоко формируются месторождения олова, меди, золота, серебра и др. Такие месторождения известны в Перу, Боливии, Мексике, Калифорнии, на Балканах и у нас в СССР в Приморье и на Кавказе.

Даже сами вулканические горные породы имеют большое практическое значение. Они являются превосходным строительным материалом. Особенно велика их роль в качестве сырья для получения жароупорного теплоизоляционного бетона. Важное значение в строительстве имеют вулканические стекла, преимущественно кислого состава: *перлиты*, *обсидианы*, *пехштейны* с содержанием оксида кремния (IV) от 68 до 74%. Ценность этих вулканических продуктов заключается в том, что они содержат в больших количествах (до 7%) воду. При нагревании породы вода начинает выделяться, порода вспучивается, становится пористой. В таком виде вспученный перлит обладает высокими теплоизоляционными свойствами и используется для изготовления фильтров в нефтяной, химической, пищевой промышленности, а в сельском хозяйстве — для улучшения структуры почв. Широко применяются в строительстве различные вулканические туфы из-за легкости их обработки и прекрасных декоративных свойств. Наиболее известен у нас в СССР розовый туф из Армении. Для строительства дорог во многих местах используется высокопрочный щебень, полученный из лавовых потоков.

Даже месторождения алмазов своим происхождением связаны с процессами вулканического характера. Образование этих минералов происходит в результате взрыва на большой глубине. Возникшее при этом чудовищное давление приводит к переходу обычного углерода в другую структурную модификацию — прозрачный алмаз. При взрыве образуются *диатремы*, или *трубки взрыва*, уходящие от поверхности Земли на большую глубину. Диаметры таких трубок изменяются от нескольких метров до 1,5 км. С поверхности они обычно округлые, но с глубиной приобретают форму все более удлиненного эллипса. Максимальная глубина, которую имеют трубки взрыва, установлена на руднике Кимберли в Южной Африке, она превышает 1000 м. Предполагается, что сильно насыщенная газом магма при попадании в трещину, где резко падало давление, вскипала со взрывом. Взрыв приводил к выбрасыванию газа и обломков по трещине вверх. Обломки истирали стены трещины и расширяли ее, создавая трубку.

Наблюдения за деятельностью современных вулканов позволили сделать интересные выводы об условиях образования месторождений. Сравнивая остатки древних вул-

канов, с которыми связаны месторождения, и современные вулканы, геологи и палеовулканологи реконструируют по ископаемым остаткам форму и строение древних вулканов, восстанавливают основные закономерности их образования, устанавливают наличие связи рудных месторождений с ними. Эта работа имеет очень большое значение, потому что знание таких закономерностей приводит к открытию новых месторождений полезных ископаемых.

Приведенные факты отчетливо свидетельствуют о важной роли вулканов в образовании различных месторождений полезных ископаемых. Но польза вулканов заключается не только в этом. Большое значение для человечества имеет исключительное плодородие вулканических почв. Наиболее существенное влияние на образование почв оказывает прямое воздействие вулканов, которое выражается в виде периодического поступления пепла, лавы и других продуктов извержения на земную поверхность. В результате древние почвы вблизи от вулкана погребаются под вулканическими наносами, происходит омоложение почвы. Частые и обильные пеплопады уничтожают растительность на больших площадях. Наиболее активные вулканы обычно окружены безжизненным пространством, покрытым мощным слоем вулканических пеплов и шлаков. Вокруг этих пустынь на многие километры тянутся угнетенные леса с жалкой разреженной травянистой растительностью, часто лишенные кустарникового подлеска. Нередко встречаются мертвые леса, погибшие в результате химического, механического и теплового воздействия выпавшего пепла. Наиболее сильно сказывается химическое воздействие сильных кислот, щелочей и других веществ, выделяемых вулканами и растворимых в воде. Однако вдали от вулканов, там, где пепла выпадает немного, он не только не оказывает на растительность угнетающего действия, но, наоборот, способствует ее бурному развитию, являясь источником многих микрокомпонентов, необходимых для жизни растений. Растительность становится очень пышной. Влияние пепловых извержений очень велико в субтропических и тропических районах, где из почвы быстро выщелачиваются питательные вещества. Новые извержения восстанавливают плодородие этих почв.

Вулканические почвы широко распространены на земном шаре и встречаются в самых различных климатиче-

ских условиях. Эти почвы отличаются высокой сорбционной способностью, высоким содержанием органического вещества и рыхлым сложением. По сравнению с другими почвами они характеризуются более кислой реакцией, повышенным содержанием гумуса и аморфных гидроксидов алюминия и железа, что определяет способность в большом количестве сорбировать фосфаты. Обилие в этих почвах легко выветривающихся минералов в сочетании с интенсивным действием водой приводит к значительному выносу из почв кремния, кальция, магния, натрия. В вулканических почвах отмечаются большие количества углерода и азота. В составе гумуса преобладают низкополимеризованные кислоты. Специфичны также физические свойства вулканических почв. Для них свойственны низкая плотность, высокая пористость, хорошая фильтрационная способность и высокая гидрофильность. Большое содержание аморфных органических и минеральных веществ обуславливает также хорошую структуру и микроструктуру вулканических почв.

Плодородие почв определяется физическими и химическими свойствами. Одним из главных факторов является высокое содержание в них гумуса, или перегноя, образовавшегося в результате биохимического превращения погребенных растительных остатков. В гумусе содержатся основные элементы питания растений, которые под воздействием микроорганизмов становятся доступными для растений. Главной составной частью гумуса являются *гуминовые кислоты* — сложные органические вещества, строение которых еще окончательно не установлено. В состав их молекул входят карбоксильные и карбонильные группы ($-\text{C} \leq \overset{\text{O}}{\text{OH}}$ и $>\text{C}=\text{O}$), фрагменты спиртов, фенолов и других соединений, содержащих в молекуле гидроксильную группу OH , связанную с углеводородным радикалом (например, $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$). Иногда в гуминовых кислотах встречаются метаксильные группы ($\text{CH}_3-\text{O}-$). Гуминовые кислоты способны к реакциям ионного обмена с образованием солей — гуматов. В связи с этим они способствуют интенсивному разложению горных пород и минералов, концентрации, рассеянию и переотложению различных элементов на земной поверхности.

Вулканические извержения приводят к резким изменениям урожайности как естественной, так и культурной

растительности. Изучение вновь выпавших вулканических пеплов показало, что на их поверхности сорбируется большое количество подвижных фосфатов и калия, которые вызывают вспышку урожайности. Многолетние высокие урожаи объясняются образованием почвы на вулканическом пепле. Интересный случай приводит в своей книге известный американский вулканолог Г. Макдональд. Как-то во время одного извержения вулкана Килауза (Гавайские острова) он заметил вблизи главного жерла участок, засаженный бананами. В течение нескольких недель пепел и шлак падали на растения. Листья их пожелтели и обвисли; казалось, что бананы скоро погибнут. Каково же было его удивление, когда, вернувшись через месяц, он увидел, что бананы не только не погибли, но разрослись еще пышнее. Владелец участка заверил вулканолога, что не вносил никаких удобрений. Эти удобрения были получены растениями из вулканического пепла.

Человек активно использует плодородные вулканические земли. Например, в Индонезии установлена тесная связь между плотностью населения и типом почв: наибольшая плотность сельского населения отмечена там, где недавно произошли вулканические выбросы пепла.

Созидательная роль вулканов не ограничивается образованием месторождений полезных ископаемых или плодородных почв. Сейчас уже можно считать доказанным, что вся вода на поверхности Земли и земная атмосфера образовались в результате вулканической деятельности, поставившей в течение сотен миллионов лет пар и газы из глубин остывающей Земли. Подсчитано, что масса летучих компонентов (главным образом глубинной воды), которая высвобождается при вулканических взрывах, составляет 70 млн. т в год. А за всю геологическую историю Земли количество воды, вынесенной вулканами в гидросферу Земли, составляет колоссальную цифру — тридцать квинтиллионов тонн ($3 \cdot 10^{17}$ т). Это составляет примерно треть всей свободной воды в гидросфере, равная ста сорока квинтиллионам тонн ($14 \cdot 10^{17}$ т).

Поэтому не будет большой ошибкой утверждать, что жизнь на Земле зависит от вулканической деятельности, потому что необходимым условием жизни организмов являются вода и воздух. Более того, процессы, аналогичные вулканическим, явились причиной возникновения жизни

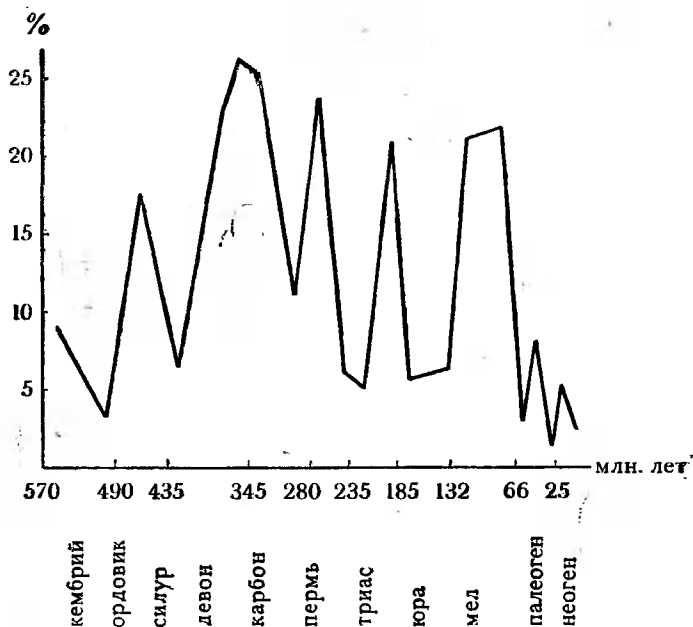


Рис. 25. График, показывающий постепенное снижение вулканической деятельности на Земле (по массе изверженных продуктов в 10^{15} т).

на Земле. Эта гипотеза возникновения жизни из неорганической, т. е. неживой материи, разработана академиком А. И. Опариным. В ранние этапы развития Земли вулканические процессы формировали первичную атмосферу, которая была по составу близка вулканическим газам и содержала водяной пар (H_2O), оксид углерода (IV) (CO_2), аммиак (NH_3), метан (CH_4) и другие газы. Свободного кислорода в выделениях вулканов нет. Он образовался в атмосфере планеты под воздействием фотосинтеза. Когда температура на поверхности планеты снизилась ниже $273^{\circ}C$, появилась вода и началось образование гидросферы. В чудовищной атмосфере с проливными ливнями сверкали молнии, возникали электрические разряды. В первобытном океане под воздействием разрядов происходили химические реакции, в результате которых могли образоваться простые органические соединения. Даль-

нейшее развитие органических соединений до образования коацерватов и простейших живых клеток представляет уже биологическую историю.

Не только возникновение жизни, но и ее существование на Земле зависит от вулканической деятельности. Советский ученый А. Б. Ронов разработал теорию, согласно которой оценивается количество углерода, поскольку жизнь на нашей планете целиком основана на углеродистых соединениях. Суммарное количество углерода в атмосфере, гидросфере, живых и отмерших организмах биосферы составляет 43 трлн. т. Этот углерод постоянно находится в круговороте. В известняках и других карбонатных горных породах Земли содержится восемьдесят квинтиллионов тонн углерода, т. е. количество углерода в связанном состоянии в виде CaCO_3 , MgCO_3 , FeCO_3 и др. почти в 2000 раз больше, чем количество свободного углерода. Эти данные привели ученого к выводу, что на протяжении всей истории Земли действовал механизм удаления углерода из круговорота. Потеря углерода должна была восполняться и в действительности восполнялась за счет вулканической деятельности. Было установлено, что чем больше оксида углерода (IV) выделялось вулканами на протяжении геологической истории Земли, тем больше углерода связывалось в виде карбонатных осадков, каменного угля и др. Но вулканическая деятельность на нашей планете постепенно затухает. На рисунке 25 показано постепенное снижение количества вещества, выброшенного вулканами на протяжении последних 550 млн. лет истории Земли. На основе этих данных был сформулирован геохимический принцип сохранения жизни: «Жизнь на Земле и других планетах возможна лишь до тех пор, пока эти планеты активны и происходит обмен энергией и веществом между недрами планет и их поверхностью. С энергетической смертью планет неизбежно прекращается и жизнь на их поверхности»¹.

Как видите, само существование человечества и органического мира вообще связывается с вулканической деятельностью на планете.

¹ Ронов А. Б. Принципы сохранения жизни в ходе геологической эволюции Земли. — Природа, 1978, № 4, с. 30—41.

КАК ИЗУЧАЮТ ВУЛКАНЫ

Теперь, когда вы узнали о том, какую важную роль играют вулканы в жизни человека, вы, конечно, преисполнились к ним почтением и, может быть, захотите посвятить свою жизнь изучению вулканов. Поэтому в заключительной части книги будет рассказано, как работают вулканологи, геологи и представители других профессий, связанных с жизнью вулканов.

Действующие вулканы изучают вулканологи. Предметом науки вулканологии является исследование вулканов, их формы, характера и частоты извержений, происхождения, размещения на земной поверхности, т. е. всех тех факторов, о которых упомянуто в книге. Практическая задача таких исследований заключается в изыскании способов предсказания вулканических извержений, методов использования вулканической теплоты и продуктов вулканической деятельности. Вулканологи анализируют общую картину процесса извержения, исследуют движение газов и возникновение взрыва, а также другие физические и химические явления, определяют количество, химический состав твердых, жидких и газообразных продуктов извержений. На основе этих данных ученые стараются выявить причину и механизм извержения, объяснить происхождение различных вулканических пород и изменение их химизма во времени.

Большое внимание уделяется установлению признаков, указывающих примерный срок начала вулканического извержения. Существует очень много различных методов предсказания вулканических извержений, которые основаны на многолетнем изучении действующих

вулканов. Установлено, например, что температура фумарол, горячих источников и кратерных озер повышается перед извержением. В июне 1965 г. температура кратерного озера вулкана Тааль на Филиппинах начала заметно увеличиваться. В конце июня это повышение достигло 11°C . 28 сентября, вскоре после двух часов ночи, произошло катастрофическое извержение. На вулкане Асо в Японии температура воды перед извержением повысилась настолько, что кратерное озеро почти высохло. Температура фумарол повышается на десятки градусов, однако это увеличение может происходить в течение нескольких дней или месяцев перед извержением. Повышается не только температура воды, нагревается почва в окрестностях вулкана. Это устанавливается по таянию снега и ледников на его склонах, пересыханию ручьев, рек и колодцев. На этом основано применение нового метода предсказания — периодической фотосъемки вулканов с самолетов или спутников на специальную цветную пленку, чувствительную к инфракрасной части спектра. Сравнение снимков, полученных в разное время, и изучение градаций красных и розовых тонов на снимках определяет степень вероятности того или иного предполагаемого извержения. Метод был проверен научными сотрудниками университета Гонолулу вначале на Гавайских островах, а затем в Гватемале. Например, в 1974 г. аэрофотосъемки показали, что в западной части Гватемалы вскоре должны пробудиться сразу три вулкана. Мало кто поверил прогнозам ученых, но вулканические извержения начались в предсказанное время.

В некоторых случаях перед извержением значительно меняется состав фумарольных газов, что выражается в увеличении содержания хлороводорода и оксида серы (IV) в воде. Такие явления наблюдались на вулканах Асама и Михара в Японии.

Целый ряд признаков, указывающих на близящееся пробуждение вулкана, устанавливается геофизическими методами. Под влиянием магматической теплоты происходит изменение в значении или ориентировке магнитного поля. Изменение интенсивности магнитного поля наблюдалось на расстоянии 24 км за 12 ч перед извержением из кратера Пийпа на Камчатке в 1966 г.

В Японии для вулкана Михара за несколько месяцев перед извержением отмечалось изменение ориентировки

магнитных аномалий в западном направлении. Присутствие тел горячей расплавленной магмы на глубине приводит к изменению электрического поля пород. Быстрые изменения такого типа отмечались за несколько часов перед извержением на ряде вулканов, но этот метод еще не разработан.

К числу признаков, показывающих приближение извержения, относится увеличение частоты небольших землетрясений в окрестностях вулкана. Об этом уже упоминалось в предыдущих главах. На некоторых вулканах перед извержением увеличивается количество дыма, выделяющегося из кратера, слышится грохот. Для вулкана Асама в Японии выведена даже специальная математическая формула, которая устанавливает связь между вероятностью извержения z , месячным числом землетрясений x и количеством дыма y , выделившегося из вулкана в данном месяце:

$$z = -0,028 + 0,0013 x + 0,0031 y$$

Очень часто вулканическая гора перед извержением приподнимается. Наиболее ярким примером этого явления служит уже упоминавшийся вулкан Усу в Японии, который в течение пяти месяцев перед извержением поднялся на 50 м. Для других вулканов эта цифра значительно меньше.

На вулкане Килауэа накопление магмы в очаге на глубине 3—5 км привело в 1912—1921 гг. к поднятию поверхности всего на 0,9 м. После извержения поверхность опустилась на 1,1 м.

Ученые установили связь вулканических извержений с одиннадцатилетним циклом солнечной активности. Оказалось, что в период повышенной активности Солнца частота извержений нарастает.

За простым перечислением результатов исследований стоят многие годы и десятилетия напряженной и систематической работы вулканологов. По этим результатам уже можно представить, какие разнообразные исследования проводятся на вулканах. Изучение действующих вулканов связано с большим риском. Ведь работать приходится в окружении раскаленной лавы, удушливых газов и горячей пыли, ежесекундно подвергаясь опасности вулканического взрыва. Чтобы частично уменьшить опасность, вулканологи пользуются специальным защитным снаряжением.

В условиях высоких температур необходимо применение теплоизолирующей одежды и обуви, которую покрывают слоем алюминия или другого металла, отражающим теплоту. На голову надевают специальные защитные каски. Для защиты от газов используются противогазы и газовые маски. Вулканический жар обжигает руки, кислота из вулканических паров разъедает одежду.

Какие методы используют вулканологи, изучая вулканы? Эти методы весьма многочисленны, и можно лишь кратко рассказать о некоторых из них.

Для измерения температуры лавы на вулканах используют один или два типа приборов. Одним из них является оптический пироскоп. Он состоит из окуляра, в котором укреплена проволочка из тугоплавкого металла. Чтобы измерить температуру лавового потока, на него наводят окуляр и начинают пропускать через проволочку ток, раскаляя ее до тех пор, пока цвет проволочки не сравняется с цветом лавового потока. Определяют силу тока, проходящего через проволочку, и путем несложных вычислений находят температуру лав. Этот метод удобен тем, что позволяет измерять температуру лав на достаточном удалении от раскаленного потока. Но он очень неточен.

Во-первых, таким способом можно измерить лишь температуру поверхности лавового потока. На глубине эта температура значительно больше. Во-вторых, этот способ требует значительной чистоты и прозрачности воздуха, что очень редко случается во время вулканических извержений.

Поэтому чаще исследователи стараются прибегать к непосредственному измерению температуры лавы с помощью термопары или других термоизмерительных приборов. Термопара состоит из двух разнородных металлических проводников, спаянных вместе. При нагревании места спая возникает слабый электрический ток, который регистрируется чувствительными приборами. При измерении термопару погружают в лаву на разную глубину. Здесь и заключаются основные трудности для исследователя: ведь температура раскаленной лавы может превышать 1000°C .

На Гавайских островах в кратере вулкана Килауэа в 1917 г. измерения температур лавы производил известный американский вулканолог Т. А. Джаггар. Он использовал копические пирамидки из огнеупорной глины, поме-

щепные в стальные трубы. Эти трубы размещались на разных уровнях лавового потока. Каждая пирамидка имела известную температуру плавления. Температура лавы определялась по тому, когда расплавится пирамидка. Условия эксперимента были очень тяжелыми. Чтобы воткнуть, а затем вытянуть из раскаленной лавы стальную трубку диаметром 2,5 см, требовались большие усилия. Раскаленная лава была покрыта застывшей коркой толщиной 8—15 см. При погружении стальной трубки лава часто налипала на нее и застывала. Поэтому трубку иногда было невозможно вытащить.

Жар, поднимающийся от поверхности, был так велик, что его можно было выдержать лишь в течение нескольких минут.

Почти во всех книгах по вулканологии описывается знаменитый «дрейф» двух советских вулканологов, В. Ф. Попкова и И. З. Иванова, в 1938 г. на лавовом потоке, вытекавшем из вулкана Ключевская Сопка. Эти ученые проплыли на лавовой корке более двух километров, передвигаясь вместе с потоком лавы, постоянно делая замеры температуры и отбор проб газа. Первоначально они хотели пройти вдоль «берега» лавового потока, погружая термометр на разных интервалах. Но рельеф окружающей местности не позволял этого. Поэтому они отважились на рискованный эксперимент. Исследователи перескочили через раскаленную кайму на темную корку, покрывавшую центральную часть потока. «Мы не могли устоять на горячей движущейся корке, ведь температура у поверхности достигала 270—300°C, лава была накалена докрасна, поэтому нам не однократно приходилось взбираться на угловатые выступы, чтобы ветер остудил наши асбестовые башмаки. Во время работы мы подстилали под ноги листовую асбест, и все-таки нам приходилось часто стоять подобно аистам на одной ноге» — так пишет в своем отчете В. Ф. Попков, один из участников этого опасного эксперимента¹.

В последние годы было сделано несколько попыток определения вязкости расплавленной лавы непосредственно на вулкане. Об этом физическом свойстве магматического расплава уже рассказывалось раньше (с. 48). Для измере-

¹ Попков В. Ф. — Бюлл. вулканолог. станции на Камчатке, 1941, № 11, с. 36.

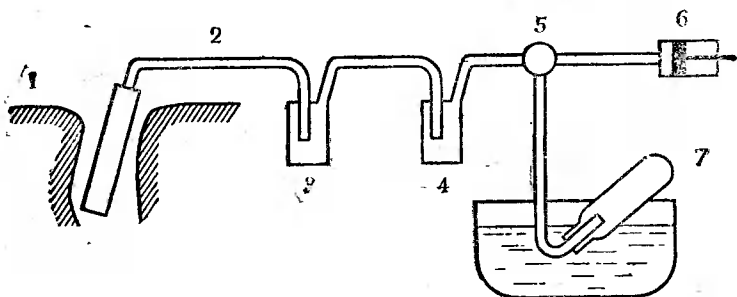


Рис. 26. Схема устройства для отбора проб вулканических газов: 1 — кварцевая трубка; 2 — фторопластовый шланг; 3 — барбатер, в котором конденсируется водяной пар и поглощаются водород и хлороводород; 4 — барбатер с раствором ацетата кадмия для поглощения активной части газов; 5 — трехходовый кран; 6 — шприц; 7 — газоотборник с насыщенным раствором для поглощения нейтральной части газа.

ния этой величины определяли силу, с которой заостренный стержень входил в расплавленную лаву. Недавно для этой же цели применили вращающийся вискозиметр (измеритель вязкости). В жидкой лаве проворачивали лопасть прибора и отмечали число оборотов в единицу времени в зависимости от приложенных усилий. Затем путем несложных расчетов находили искомые значения вязкости.

Не менее сложную задачу представляет собой отбор проб вулканических газов для установления их количества и химического состава. Пробу газа нужно взять именно в том месте, где газ выходит из трещины. В противном случае газ смешается с воздухом и значительно изменит свой химический состав. Это значит, что для отбора пробы необходимо спуститься в вулканический кратер, где господствует высокая температура и мрак удушливого дыма. Даже измерительная аппаратура в таких условиях часто выходит из строя. Самый старый способ отбора проб — это нагнетание газа из изливающейся лавы в определенный газоотборник и перенос его в лабораторию для анализа. Принципиальная схема такой установки газоотборной системы показана на рисунке 26. Отбор газа в этой установке проводится с помощью кварцевой трубки. Конденсация магматической воды происходит в совмещенных с трубкой барбатерах.

В последние годы применяются хроматографические методы анализа газов, а также калориметрические и другие. При этом содержание микрокомпонентов в газе определяют методом нейтронно-активационного анализа с применением экстракционных и хроматографических методов.

Одним из методов определения составов газов является спектрографический. Недалеко от вулкана устанавливают спектрограф, с помощью которого изучают языки пламени, вырывающиеся из вулкана.

Из курса физики вам хорошо известно, что каждый элемент при высоких температурах испускает световые волны определенной длины, которые фиксируются на светочувствительных пластинках. Анализ таких *спектрограмм* позволяет определить состав газов, сгорающих в пламени вулкана.

Помимо проб газов, на действующих вулканах отбирают образцы расплавленной лавы, чтобы позже, в лаборатории, провести ее химический анализ.

Большое место в исследованиях вулканологов занимают геофизические измерения. Для регистрации землетрясений, сопровождающих извержения вулканов, вокруг вулканических гор устанавливают приемники сейсмических волн. О том, как они работают, было рассказано в главе 2. Для измерения разных видов изменений поверхности Земли используются наклонометры. Они обычно представляют собой сообщающиеся сосуды, заполненные какой-либо жидкостью. Изменение уровней в этих сосудах фиксируется с помощью микрометров. Несколько таких приборов, размещенных под прямым углом друг к другу, позволяет правильно определить характер и изменение наклона поверхности вулкана, а также поднимается или опускается этот участок.

Сейчас для более точных измерений перемещений поверхности применяют лазерные установки. Такие приборы используются для изучения камчатских вулканов. Производятся также измерения силы тяжести (так называемые гравиметрические исследования), земного магнетизма и многие другие виды работ.

Совершенно очевидно, что все эти исследования должны быть систематическими. Ведь только наблюдая за вулканом в течение длительного времени, можно получить определенные представления о закономерностях его

развития. Поэтому на склонах вулканов организуют постоянно действующие вулканологические станции, сотрудники которых проводят непрерывные наблюдения за вулканом, подобно врачам, дежурящим у постели тяжелобольного. Первые такие станции были основаны на склонах европейских вулканов Этна и Везувий. На склонах Этны в настоящее время с большим успехом работают сотрудники Международного вулканологического общества. Такие наблюдательные станции созданы на Гавайях, в Японии, в Новой Зеландии, Австралии, США.

В нашей стране осуществляется очень активная программа по изучению вулканов Камчатки и Курильских островов. Создано несколько вулканологических и сейсмических станций вблизи действующих вулканов, в городе Петропавловске-Камчатском существует специальный научно-исследовательский институт вулканологии. С 1980 г. выпускается специальный научный ежемесячный журнал «Вулканология и сейсмология», в котором советские ученые публикуют результаты своих исследований.

Для расшифровки результатов сейсмических наблюдений применяются многие новые методы, в том числе метод получения объемных изображений — голография. Принцип голографии лежит в основе устройств, преобразующих сейсмограммы в графические изображения разрезов земной коры. Сейсмические сигналы, пройдя сквозь толщу горных пород, возвращаются из глубины и поступают на голографический комплекс, а затем появляются на экране цветного телевизора. Так получают цветное изображение строения земных глубин.

Флот научно-исследовательских кораблей пополнился специальным судном «Вулканолог», предназначенным для изучения минеральных ресурсов дна океана, его геологического строения, для изучения подводного вулканизма.

Изображение этого судна можно видеть на почтовой марке, выпущенной в его честь в 1974 г. (рис. 27).



Рис. 27. Научно-исследовательский корабль «Вулканолог» (почтовая марка, выпущенная в 1974 г.).

Внешне корабль выглядит довольно необычно: закрытый бак, удлинённая надстройка, значительный развал корпуса в носовой части с наклонённым вперед форштевнем, борта, скошенные к килю. Такие особенности корабля продиктованы его назначением. Водоизмещение судна — 1120 т, экипаж — 40 человек. На его борту оборудованы геологическая, гидроакустическая, газогидрохимическая, геофизическая и шумопеленгаторная лаборатории, вычислительный центр, шлифовальная мастерская.

Вулканы часто исследуются с борта самолета. Интересные результаты были получены с помощью специальных лабораторий, установленных на самолете ИЛ-14. Во время извержения вулкана Толбачик в 1975 г. таким способом изучали состав атмосферы над вулканом. До высоты 4—6 км над вулканом в атмосфере был обнаружен шлейф оксида серы (IV) шириной 20—30 км. Наибольшие концентрации этого газа были установлены на высоте 4 км. При изучении беспокойного итальянского вулкана Этна для отбора проб газов использовались беспилотные мишисамолеты типа САМ («воздушные моторизованные зонды»), которые по форме весьма напоминают знаменитые «летающие тарелки».

Что привлекает людей к необычной профессии вулканолога? В прежние времена вулканологами обычно становились натуралисты, очарованные грандиозными видами бурных вулканических извержений. Но времена описательной вулканологии давно прошли. Современная наука все более вооружается мерой и числом, получает информацию из множества источников, от людей самых различных профессий: физиков, химиков, математиков, геологов и других. Именно эта многогранность, свойственная вулканологии как естественной науке, побуждает многих ученых посвятить свою деятельность изучению вулканов, выбрать эту профессию.

Бурное развитие получает в настоящее время наука об ископаемых вулканах — палеовулканология. С помощью буровых скважин и шахт геологи открывают продукты древних извержений, отдаленных от нашего времени десятками и сотнями миллионов лет. Изучая ископаемые лавы, туфы, палеовулканологи могут установить, где находилось древнее жерло, кратер и другие элементы вулкана. При этом специалисты используют знания о законо-

мерностях строения современных вулканов. По аналогии с ними они производят реконструкцию древних ископаемых вулканов. Основной целью этих реконструкций является выяснение закономерностей размещения многих месторождений полезных ископаемых, связанных с вулканическими и вулканогенно-осадочными процессами. Об этих месторождениях было рассказано в главе 5, где также было показано их пространственное положение по отношению к различным элементам строения вулканов. Используя эти закономерности, геологи и палеовулканологи открывают все новые и новые месторождения свинца, меди, золота, бокситов и многих других металлических и неметаллических полезных ископаемых, которые имеют огромное значение для человечества.

НЕСКОЛЬКО СЛОВ В ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совершенно очевидно, что в небольшой книге нельзя достаточно полно рассказать о всех этапах зарождения и развития вулканов, до конца раскрыть физико-химические законы, которые ими управляют. Все эти процессы являются весьма сложными и во многих случаях еще не познанными. В этой книге несколько упрощенно охарактеризованы различные стороны вулканической деятельности, чтобы они, с одной стороны, стали понятными читателю с объемом знаний по физике и химии на основе курса средней школы, а с другой, не потеряли свой геологический смысл. Насколько удачной оказалась эта попытка, должен судить читатель.

Интерес к вулканологии велик, поэтому в нашей стране и за рубежом ежегодно выпускается большое количество научных и популярных книг, посвященных этой проблеме. Заинтересованный читатель может без особого труда найти литературу, в которой более подробно раскрыты вулканические процессы. В ряде книг можно найти дополнительные сведения о химизме этих процессов. Вот лишь некоторые из них:

Риттман А. Вулканы и их деятельность. М., 1964.

Влодавец В. И. Вулканы Земли. М., 1973.

Макдональд Г. Вулканы. М., 1975.

Малеев Е. Ф. Вулканы. М., 1980.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

3

Глава 1.

ЧТО ТАКОЕ ВУЛКАНЫ

9

Глава 2.

РОЖДЕНИЕ ВУЛКАНОВ

29

Глава 3.

КАК И ПОЧЕМУ ПРОИСХОДЯТ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНОВ

44

Глава 4.

ПОСЛЕВУЛКАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПОТУХШИЕ И ИСКОПАЕМЫЕ ВУЛКАНЫ

76

Глава 5.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ВУЛКАНОВ

92

Глава 6.

КАК ИЗУЧАЮТ ВУЛКАНЫ

116

НЕСКОЛЬКО СЛОВ В ЗАКЛЮЧЕНИЕ

126

КИМ ГРИГОРЬЕВИЧ СТАФЕЕВ

ЖИЗНЬ ВУЛКАНА

Редактор *Л. И. Соколова*

Обложка художника *А. Л. Кашекова*

Художественный редактор *Л. Г. Бакушева*

Технические редакторы *Т. В. Самсонова,*
В. Ф. Коскина

Корректоры *Л. П. Михеева, Г. М. Махова*

ИБ № 5982

Сдано в набор 29.10.81. Подписано к печати 24.02.82. Формат 84×108¹/₃₂. Бум. типограф. № 2. Гарнитура «Обыкн. новая». Печать высокая. Усл. печ. л. 6,72. Усл. кр. отт. 7,03. Уч.-изд. л. 6,58. Тираж 150 000 экз. Заказ 2454. Цена 20 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени
издательство «Просвещение» Государственного
комитета РСФСР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли.
Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.
Типография № 2 Ростлавполиграфпрома,
г. Рыбинск, ул. Чкалова, 8.