

Современный подводный вулканизм

Г. П. Авдейко



Геннадий Порфирьевич Авдейко, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией подводного вулканизма Института вулканологии ДВНЦ АН СССР. Основные научные интересы связаны с вулканизмом океанов и их обрамления.

Вулканизм — одно из наиболее грандиозных явлений природы, определяющих облик нашей планеты. В результате вулканических извержений за несколько дней и даже часов вырастают новые вулканы, появляются вулканические острова, изливаются в виде лавовых потоков или выбрасываются вулканическими взрывами миллионы и даже миллиарды тонн расплавленного материала. Например, только за два первых месяца деятельности Северного прорыва Большого трещинного толбачикского извержения в 1975 г. было выброшено $1,13 \text{ км}^3$ пирокластического материала (вулканических бомб, песка, пыли, шлаков и т. д.) и $0,2 \text{ км}^2$ лав¹.

Породы магматического происхождения — излившиеся лавы, пирокластические продукты извержения и застывшие на глубине магматические тела — составляют более 2/3 объема земной коры. По данным сейсмических исследований, которые за последние годы были подтверждены результатами глубоководного бурения, залегающий под осадками так называемый второй слой океанической коры почти цели-

ком сложен подводными базальтовыми лавами².

Наряду с этим вулканизм островных дуг и активных окраин континентов также вносит существенный вклад в формирование континентальной коры.

Итак, вулканы служат основными поставщиками вещества из недр Земли на ее поверхность. Но непосредственному наблюдению доступны, главным образом, наземные вулканы. Сведения же о подводном вулканизме носят, вернее, до недавнего времени носили отрывочный характер.

ТИПЫ ПОДВОДНОГО ВУЛКАНИЗМА

За последние годы геолого-геофизические работы в океанах существенно расширились, при этом усовершенствовались техника исследований. В частности, для изучения подводного вулканизма и связанных с ним геологических процессов построено специализированное научно-иссле-

¹ Чирков А. М. Толбачикское извержение, — «Природа», 1976, № 7.

² Океаническая кора состоит из трех слоев: первого — осадочного, второго — базальтового и третьего, сложенного интрузивными породами основного и ультраосновного состава.



Научно-исследовательское судно «Вулканолог» Института вулканологии ДВНЦ АН СССР, предназначенное для изучения подводных вулканов.

довательское судно «Вулканолог», принадлежащее Институту вулканологии Дальневосточного научного центра АН СССР. Это судно позволяет изучать вещественный состав подводных вулканов, их внутреннее строение, состояние активности, тепловую мощность и многие другие характеристики вплоть до количества выносимых из недр рудных компонентов. За три года, прошедших со времени спуска судна на воду, сотрудниками Института вулканологии обследованы многие активные и действовавшие относительно недавно (в чет-

вертичном периоде) подводные вулканы. Это вулканы Идзу-Бонинской и Марианской островных дуг, Филиппинского, Ново-Гвинейского и Южно-Китайского морей, а также некоторых других районов Тихого океана.

Особенно детально исследован вулкан Эсмеральда в Марианской дуге, ставший своеобразным полигоном для отработки методики поиска и изучения активных подводных вулканов. Этот вулкан обладает отчетливо выраженными вулканическим конусом и кратером. Наряду со свежими лавовыми потоками здесь обнаружены подводные выходы вулканического газа — фумаролы, действовавшие в период усиления вулканической активности. Тепловая мощность вулкана Эсмеральда

в этот период не уступала тепловой мощности наиболее активных вулканов Камчатки³.

Рейсы «Вулканолога» позволили оценить современный подводный вулканизм островных дуг и окраинных морей. Они показали, что мелководные вулканы островных дуг, так же как и наземные, относятся обычно к типу стратовулканов⁴ и сложены преимущественно андезито-базальтовыми лавами, среди которых лишь местами встречаются толеитовые базальты, близкие к океаническим. Для окраинных же морей характерны трещинные излияния очень жидких толеитовых лав.

Интересные сведения о вулканизме ложа океанов получены благодаря применению глубоководных исследовательских аппаратов⁵. Первые же погружения американского аппарата «Архимед» и французских аппаратов «Алвин» и «Циана» в 1973—1974 гг. показали, что через рифтовую долину Срединно-Атлантического хребта тянутся цепочки лавовых куполов и небольших кратеров с расходящимися от них свежими потоками лавы. Наиболее крупные из лавовых куполов представляют собой небольшие и довольно плоские вулканы. Аналогичные вулканические образования, окруженные гидротермальными источниками, обнаружены и в пределах Галапагосского рифта в Тихом океане во время погружения подводного аппарата «Алвин». Первые сведения о проявлении вулканизма в рифтовой зоне Красного моря получены с помощью подводного обитаемого аппарата «Пайсис» во время экспедиции Института океанологии АН СССР⁶.

Много нового о вулканических процессах в пределах срединно-океанических хребтов узнали мы благодаря работам бурового судна «Гломар Челленджер» по международной программе глубоководного бурения⁷. В частности, они подтвердили представления сторонников плитовой

тектоники о том, что осевые зоны срединно-океанических хребтов на всем своем протяжении являются ареной подводной вулканической деятельности⁸.

В настоящее время принято выделять четыре основных типа современного вулканизма ложа океана и его обрамления. Это океанический рифтовый вулканизм, характерный для рифтовых зон срединно-океанических хребтов, вулканизм островных дуг и активных окраин континентов, вулканизм внутритрокеанических островов и вулканизм окраинных морей.

Географическое распределение наземных и подводных вулканов всех перечисленных типов и их положение относительно основных тектонических структур показано на одном из рисунков. Причем подводные вулканы ложа океанов и окраинных морей объединены на карте в зоны вулканической активности.

Области наземного и подводного вулканизма пространственно совпадают с сейсмоактивными районами и районами повышенного теплового потока из недр Земли. Иными словами, вулканы характерны для тектонически наиболее подвижных, механически ослабленных зон земной коры. Интересно, что широкое проявление вулканизма в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов первоначально было предсказано сторонниками гипотезы разрастания дна океана (на базе которой была разработана теория плитовой тектоники) и лишь позже подтвердилось прямыми наблюдениями.

ОКЕАНИЧЕСКИЙ РИФТОВЫЙ ВУЛКАНИЗМ

Рифтовый вулканизм океанов локализован в пределах рифтовых зон срединно-океанических хребтов, т. е. на границе между раздвигающимися плитами. Тот факт, что рифтовым зонам свойственно растяжение, был установлен сейсмологами, а затем подтвержден детальными геологическими исследованиями. Так, в рифтовых долинах Срединно-Атлантического и Галапагосского хребтов, а также Красного моря обнаружено много сбросов, грабенов и зияющих трещин.

О характере извержений в глубоководных рифтовых зонах можно судить по вулканическим продуктам, поднимаемым драгами, по подводным фотографиям, а в последнее время — по прямым наблюдениям с борта обитаемых глубоководных аппаратов.

³ Гавриленко Г. М., Горшкова А. П., Скрипко К. А. «Вулканология и сейсмология», 1980, № 2, с. 19—29.

⁴ Стратовулкан — конусовидный вулкан, тело которого сложено застывшими потоками лавы и рыхлым взрывным материалом.

⁵ Эти работы проходили в рамках франко-американского проекта изучения срединно-океанических хребтов FAMOUS.

⁶ Монин А. С., Ястребов В. С. Экспедиция в Красное море. — «Природа», 1980, № 9.

⁷ Результаты бурения по отдельным рейсам периодические публикуются в нашем журнале начиная с 1969 г.

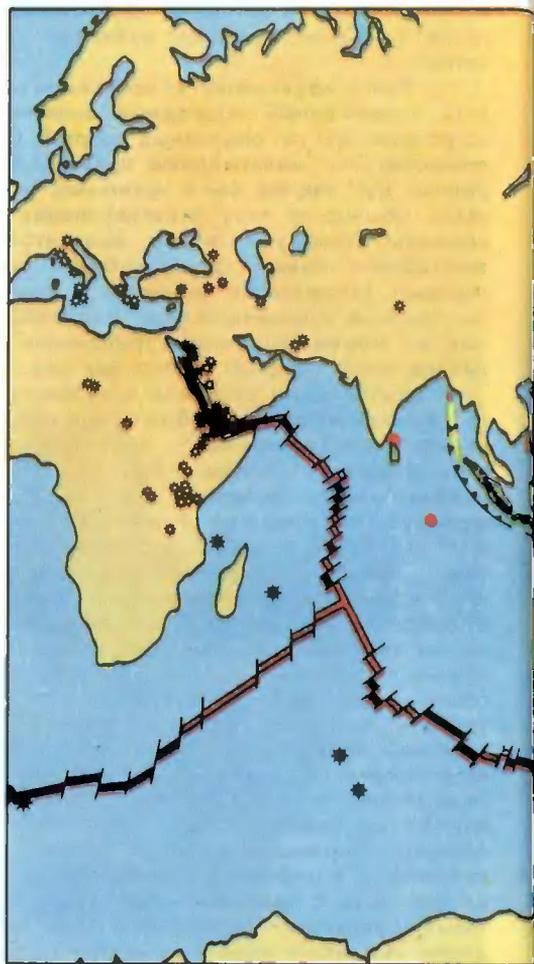
⁸ Менард Г. У. Глубоководное дно океана. — В кн.: Океан. М., 1971.

Распределение активных вулканов на земном шаре. Подводные вулканы выделены цветом.

-  вулканы внутриокеанических островов (тип горячих точек)
-  вулканы островных дуг
-  вулканы окраинных морей
-  предполагаемые подводные вулканы
-  вулканы внутренних частей континентов

зоны подводного вулканизма:

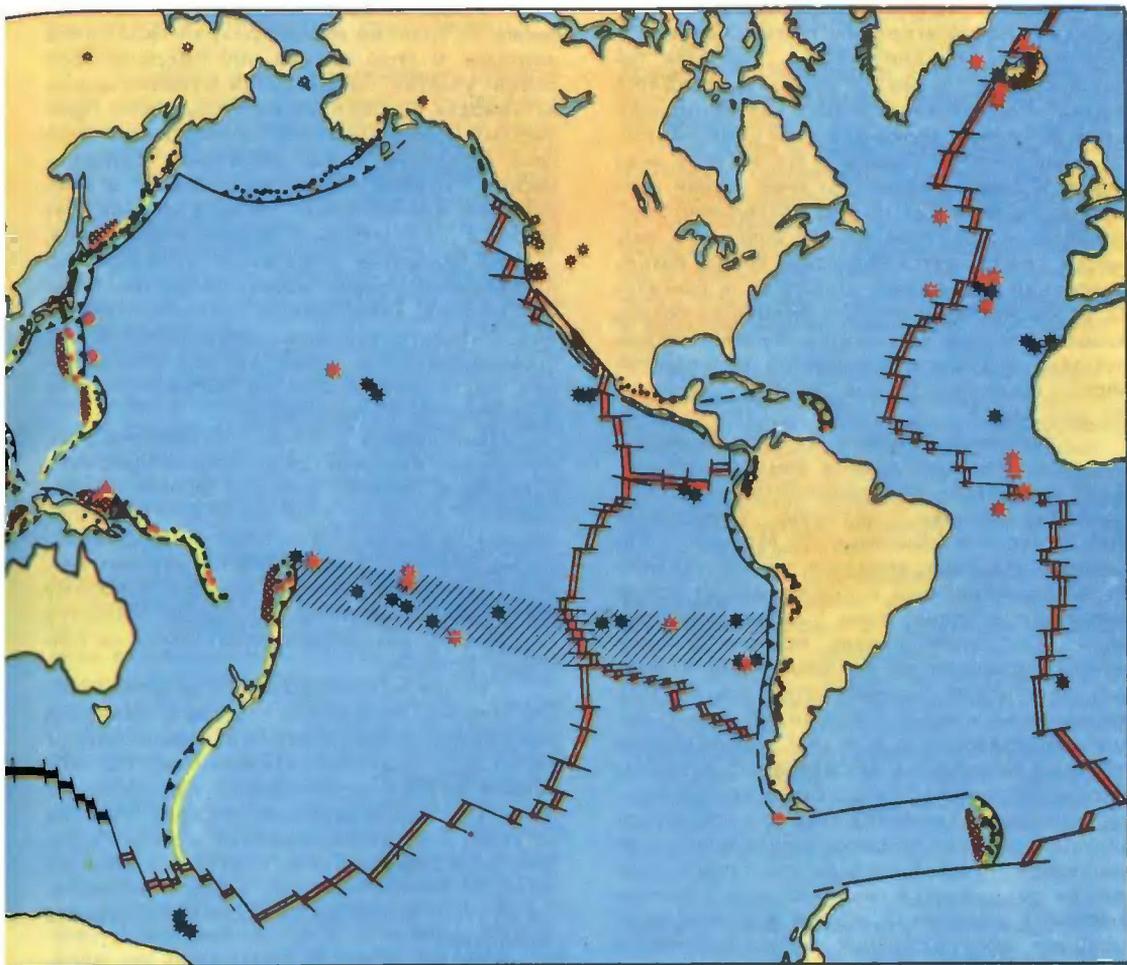
-  в рифтовых долинах срединно-океанических хребтов
-  в окраинных морях
-  Южно-Тихоокеанский пояс вулканов типа «горячих точек»
-  рифтовые зоны срединно-океанических хребтов и трансформные разломы
-  оси глубоководных желобов (зубцами показано направление наклона сейсмофокального слоя)



водных аппаратов. Судя по отсутствию пирокластических продуктов извержения, в рифтовых зонах преобладают лавовые излияния трещинного типа. Именно они формируют протяженные цепочки вулканических куполов высотой 200—300 м и длиной 2—4 км при ширине около 0,5 км. Так как для глубоководных излияний характерны потоки подушечных лав, то их фрагменты и составляют наибольшую часть свежих лав, поднимаемых при драгировании. Подушечными лавами сложены и уже упоминавшиеся вулканические образования в пределах Срединно-Атлантического, Галапагосского и Красноморского рифтов, которые были обследованы в ходе многочисленных погружений подводных обитаемых аппаратов.

Продукты современной подводной вулканической деятельности в рифтовых

зонах представлены, главным образом, однородными по химическому составу толеитовыми базальтами. Особенно четкая однородность состава проявляется в свежих базальтах с незначительным числом крупных кристаллов. Тем не менее, среди лав рифтовых зон встречаются минералогические разновидности, появление которых вызвано кристаллизационной дифференциацией магмы в близкой к поверхности магматической камере. По степени раскристаллизации вещества и соотношению количества крупных кристаллов здесь выделяют порфировые (оливиновые, плагиоклазовые, плагиоклаз-оливин-пироксеновые) и афировые базальты. Крайними продуктами кристаллизационно-гравитационной дифференциации являются пикрит-базальты, содержащие больше кристаллов пироксена и особенно оливина.



В результате океанического рифтового вулканизма формируется второй слой океанической коры средней мощностью около $1,5 \text{ км}^2$. Если считать, что скорость спрединга, т. е. раздвижения океанической коры в обе стороны от рифтовой зоны, составляет в среднем 3 см в год, а второй слой океанической коры лишь на $2/3$ своего объема сложен вулканическими породами, то при протяженности срединно-океанических хребтов 65 тыс. км общая «производительность» всех вулканов рифтовых зон составит $4 \text{ км}^3/\text{г}$. Это, по-видимому, минимальная оценка, так как второй слой океанической коры почти целиком сложен вулканическими породами, да и скорости раздвижения обычно выше. Так,

для Тихоокеанской плиты средняя скорость раздвижения за 70 млн лет , по данным бурения в 55-м рейсе судна «Гломар Челленджер», составляет 8 см/г . По-видимому, вулканы рифтовых зон океанов поставляют на поверхность Земли, вернее на дно океанов, не менее 10 млрд т вулканического материала в год.

ВУЛКАНИЗМ ВНУТРИОКЕАНИЧЕСКИХ ОСТРОВОВ

Практически все острова и подводные горы внутренних частей океанов либо являются активными вулканами, либо были ими в прошлом. Обычно они образуют линейные цепи островов и подводных гор, причем активный вулканизм проявляется на одном конце такой цепи, а с удалением от активного центра возраст вулканов уве-

⁹Ботт М. Внутреннее строение Земли, М., 1974.

личивается. Например, Гавайские о-ва вместе с Императорским подводным хребтом образуют единую цепь, которая тянется от о-ва Гавайи до зоны, где сходятся Курило-Камчатская и Алеутская островные дуги. Активные вулканы в этой цепи имеют лишь на о-ве Гавайи и на востоке о-ва Мауи. К северо-западу от о-ва Гавайи возраст вулканических пород постепенно увеличивается, достигая 40—43 млн лет в том месте, где сходятся Гавайские о-ва и Императорский подводный хребет. Если двигаться вдоль Императорского хребта на север, возраст их еще увеличится. Вулканические породы, вскрытые скважиной в северной части Императорского хребта, древнее 72 млн лет¹⁰.

Увеличение возраста вулканических пород Гавайского хребта явилось отправным моментом для разработки гипотезы «горячих точек», которую предложил Дж. Вильсон и обосновал В. Морган¹¹. По мнению Моргана, «горячие точки» являются фиксированными и представляют собой округлые в плане зоны, где так называемые мантийные струи, поднимающиеся непосредственно от границы ядра и мантии, достигают поверхности Земли. Над такими мантийными струями возникают активные подводные вулканы, наращивание которых приводит к образованию вулканических островов. Эти острова, как на ленте конвейера, движутся вместе с литосферной плитой, перемещаясь в направлении от рифтовой зоны. В результате такого движения прерывается связь острова с фиксированной мантийной струей и вулкан прекращает свое активное существование, а над мантийной струей вырастает новый вулкан. Таким образом, мантийная струя как бы прожигает движущуюся литосферную плиту, оставляя на ней шов в виде вулканического хребта, вернее цепи вулканов. При этом создается эффект миграции вулканизма в направлении, противоположном движению плиты. Изгибы цепей вулканов возникли в результате изменения направления, в котором движется плита. По такому принципу развивается вулканизм «горячих точек», расположенных внутри литосферных плит.

«Горячие точки» могут располагаться также на границе между раздвигающимися плитами. В этом случае они представляют собой участки повышенной вулканической активности в пределах рифтовых зон. Примерами таких «горячих точек» могут служить Исландия и Азорские о-ва. Вулканические хребты, образовавшиеся в результате деятельности таких вулканов, отходят в обе стороны от рифтовой зоны.

В развитии отдельных вулканов типа «горячих точек» можно выделить главные периоды, включающий стадии образования щитового вулкана, кальдерную и посткальдерную, а также период омоложения, наступающий обычно после перерыва в несколько миллионов лет.

Наибольший объем вулканического материала извергается на стадии щитового вулкана, в течение которой вулкан поднимается с глубины 4—5 км и достигает поверхности океана. Для этой стадии характерны спокойные излияния толеитовых лав. Лавы эти имеют низкую вязкость и потому растекаются на большой площади, образуя пологие вулканические сооружения — щитовые вулканы.

Когда вулкан доходит до поверхности океана, спокойные лавовые излияния сменяются вулканическими взрывами; их называют гидромагматическими. Но как только вулкан поднимается над уровнем океана и изливающийся расплав уже не вступает в непосредственный контакт с водой, извержения вновь становятся спокойными с излиянием лав низкой вязкости. Такой тип извержений принято называть гавайским.

На кальдерной стадии в теле вулкана близ его поверхности формируется магматическая камера. Ее частичное опустошение во время извержений приводит к обрушению верхней части вулкана в образовавшуюся полость. Сформированные таким образом депрессии округлой формы называются кальдерами. На этой стадии, наряду с толеитовыми, изливаются и щелочные базальты. Они более насыщены газами, поэтому на кальдерной стадии кроме лавовых излияний наблюдаются и эксплозивные извержения, т. е. извержения, сопровождающиеся вулканическими взрывами. Последующей посткальдерной стадии свойственны как эксплозивные извержения, так и спокойные излияния лавы.

Период омоложения характеризуется излиянием лавы через мелкие побочные конусы на склонах щитовых вулканов. В дальнейшем вулканические острова раз-

¹⁰ Такой возраст имеют залегающие выше осадки, а интервал между окончанием вулканической деятельности и отложением морских осадков составляет несколько миллионов лет.

¹¹ О дискусионности идеи «горячих точек» см. вступление к статье Казымина В. Г. «Горячие точки» Земли, — «Природа», 1977, № 7, с. 104.

рушаются и, опускаясь, превращаются в атоллы и гайоты¹².

В южной части Тихого океана существует целый пояс островных и подводных вулканов типа «горячих точек»¹³. По меньшей мере 10 вулканов этого пояса были активны в плейстоцене и голоцене. Пояс состоит из нескольких близко расположенных цепей вулканов типа рассмотренной выше Гавайско-Императорской цепи, поэтому зависимость возраста вулкана от расстояния до активной «горячей точки» здесь затушевывается. Этот вулканический пояс расположен перпендикулярно рифтовой зоне Восточно-Тихоокеанского поднятия и приурочен к участку, где скорость раздвижения в обе стороны от рифтовой зоны максимальна. В таких участках могут возникать конвективные течения, являющиеся, вероятно, причиной образования данного пояса «горячих точек».

Общий объем вулканического материала, поставляемого на поверхность всеми активными вулканами типа «горячих точек», достоверно неизвестен. Американские вулканологи К. Бергер и Э. Джексон подсчитали, что суммарный объем вулканов Гавайского хребта составляет свыше 1 млн км³. Средняя «производительность» гавайской «горячей точки» за последние 40 млн лет составляет, таким образом, примерно 0,03 км³/год. В настоящее время на о-ве Гавайи изливается в среднем 0,17 км³ вулканического материала в год. Общий же объем вулканического материала, поставляемого на поверхность Земли всеми вулканами типа «горячих точек», вряд ли превышает 0,3—0,4 км³/год, так как гавайские вулканы являются наиболее активными. Во всяком случае, вклад вулканов типа «горячих точек» в транспортировку вещества из недр Земли на поверхность более чем на порядок ниже вклада вулканов рифтовых зон срединно-океанических хребтов.

ВУЛКАНЫ ОСТРОВНЫХ ДУГ И АКТИВНЫХ ОКРАИН КОНТИНЕНТОВ

Эти вулканы наиболее широко известны, так как они составляют подавляющее большинство среди вулканов, возвышающихся над уровнем моря. К тому же извержения их часто носят катастрофический эксплозивный характер. Большая часть

известных на Земле активных вулканов (по подсчетам А. Ритмана, около 62%) расположена по периферии Тихого океана, образуя так называемое Тихоокеанское «огненное» кольцо.

С точки зрения сторонников теории плитовой тектоники, вулканы островных дуг располагаются на краю надвигающейся на континент плиты, а очаги плавления питающей вулканы магмы сконцентрированы в сейсмофокальном слое (где расположены очаги землетрясений)¹⁴ и, вероятно, в верхней мантии выше сейсмофокального слоя.

Некоторые вулканы островных дуг в своем раннем развитии прошли через подводную стадию. Современные подводные вулканы наиболее часто встречаются в Идзу-Бонинской и Марианской дугах, где их в последние годы изучают сотрудники нашего института, используя для этой цели судно «Вулканолог».

И для подводных, и для наземных вулканов островных дуг характерны эффузивные породы от базальтов до дацитов. Судя по образцам, поднятым при драгировании, вершины мелководных вулканов сложены подушечными лавами. Эксплозивные же продукты извержения преобладают у мелководных вулканов.

Для наземных вулканов островных дуг характерны как спокойные излияния гавайского типа, так и катастрофические взрывы, подобные извержению вулкана Тамбора в Индонезии (1815 г.), в результате которого было выброшено почти 200 км³ вулканического материала.

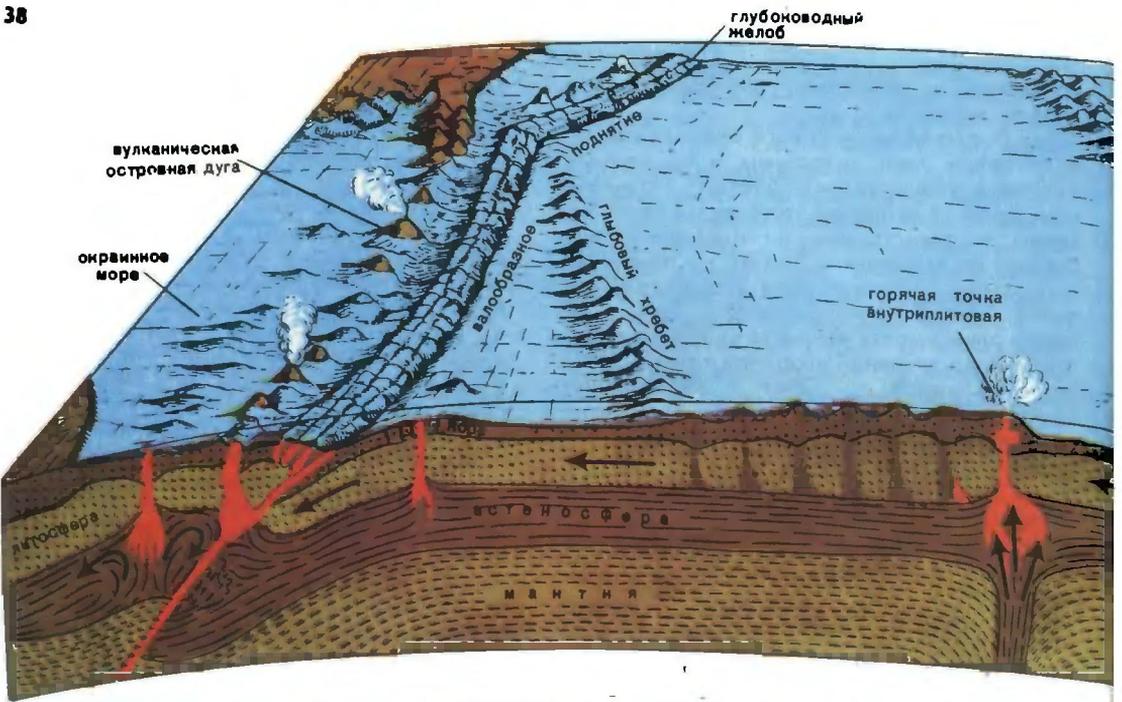
Несмотря на такие гигантские извержения, объем вулканического материала, доставляемого на поверхность вулканами островных дуг, значительно ниже, чем у вулканов срединно-океанических хребтов. По подсчетам Е. К. Мархинина, наземные вулканы поставляют 1—1,5 км³ вулканического материала в год. Для подводных вулканов такой подсчет затруднен, но судя по тому, что подводных вулканов островных дуг значительно меньше, чем наземных, вряд ли эта цифра превысит 0,3—0,5 км³/год.

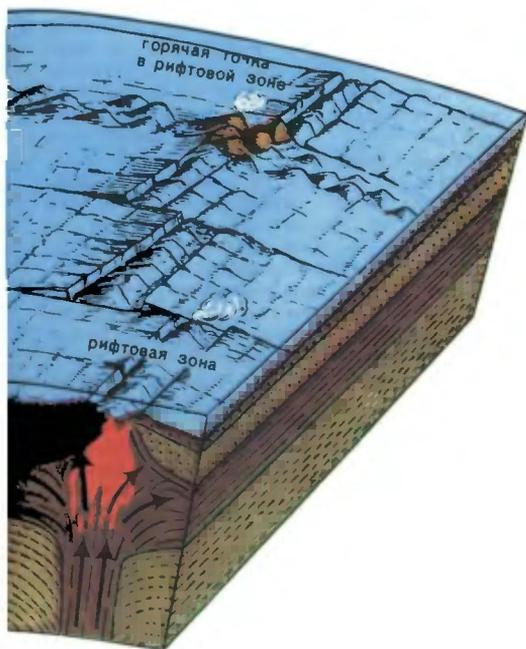
Вулканизм окраинных морей изучен пока еще очень слабо, да и сведения о проявлении здесь вулканической деятельности крайне малочисленны. Мелководные вулканы, такие как Ветеран и Иль-де-Сандр в Южно-Китайском море, расположенные на коре континентального типа, были, ве-

¹² Гайоты — подводные горы с плоскими вершинами.

¹³ А в д е й к о Г. П. «Вулканология и сейсмология», 1979, № 3, с. 83—97.

¹⁴ Токарев П. И. «Известия АН СССР, сер. физика Земли», 1970, № 3, с. 384—391.





Схематическое изображение соотношения современного вулканизма с тектоническими структурами.

Изменение возраста вулканов в цепи Гавайские о-ва — Императорский подводный хребет. Цифры на рисунке — возраст вулканов, млн лет.

роятно, когда-то вулканами островных дуг и, следовательно, не могут быть отнесены к типу вулканов окраинных морей.

Свежие толеитовые базальты, близкие по составу к толеитам рифтовых зон срединно-океанических хребтов, найдены в Марианской впадине в тыловой части Марианской островной дуги, а также в бассейне Лау в тыловой части островной дуги Тонга. Во время 4-го рейса судна «Вулканолог» со дна Ново-Гвинейского моря с глубины 2000 м также подняты образцы толеитовых базальтов, свидетельствующие об активной вулканической деятельности. Если судить по отсутствию отдельных вулканических центров и наличию обширных лавовых полей, то следует предположить, что извержения глубоководных котловин окраинных морей являются трещинными. Они проявляются, вероятно, в структурах типа рифтов, являющихся зонами растяжения.

Объем продуктов вулканизма ок-

раинных морей пока еще не известен. Можно лишь сказать, что предполагаемая площадь распространения вулканизма этого типа уступает вулканизму островных дуг и, тем более, вулканизму рифтовых зон срединно-океанических хребтов.

Проявление подводного вулканизма возможно также и в пределах валообразных поднятий, ограничивающих глубоководные желоба со стороны океана. Здесь в поле сжатия отмечаются локальные зоны растяжения, обусловленные изгибанием океанической плиты при ее пододвигании под континентальную. Однако имеются лишь единичные сведения об извержениях подводных вулканов на валообразных поднятиях.

Таким образом, современная подводная вулканическая деятельность значительно превосходит деятельность наземных вулканов вокруг океанов и в континентальных областях. Наиболее значителен вклад вулканизма рифтовых зон срединно-океанических хребтов, в результате которого изливается более 4 км^3 лав в год. Он проявляется исключительно в подводных (преимущественно глубоководных) условиях. Трещинные подводные излияния характерны и для вулканизма окраинных морей. Два других типа вулканизма — островных дуг и внутриплитовых «горячих точек» — проявляются как в подводных, так и в наземных условиях.

В целом, в результате современной подводной вулканической деятельности извергается примерно в 4 раза больше вулканического материала, чем в результате деятельности наземных вулканов. Близкие соотношения подводного и наземного вулканизма имели место и в более древние геологические эпохи.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Авдейко Г. П., Мархинин Е. К. СОВРЕМЕННЫЙ ВУЛКАНИЗМ ОКЕАНОВ.— В кн.: Геология океана, т. 1. Осадкообразование и магматизм океана. М., 1979.

Лучицкий И. В. ОСНОВЫ ПАЛЕОВУЛКАНОЛОГИИ, т. 1. СОВРЕМЕННЫЕ ВУЛКАНЫ. М., 1971.

Макдональд Г. ВУЛКАНЫ. М., 1975.

Мархинин Е. К. РОЛЬ ВУЛКАНИЗМА В ФОРМИРОВАНИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ. М., 1967.

Ритман А. ВУЛКАНЫ И ИХ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ. М., 1964.

Рэдулеску Д. П. ВУЛКАНЫ СЕГОДНЯ И В ГЕОЛОГИЧЕСКОМ ПРОШЛОМ. М., 1979.