

И. И. ГУЩЕНКО

К МЕХАНИЗМУ ОБРАЗОВАНИЯ ПИРОКЛАСТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Рассматривая механизм образования пирокластики, следует иметь прежде всего четкие представления о природе вулканических взрывов, которая до сего времени остается невыясненной.

В настоящее время причина вулканических взрывов рассматривается как следствие избыточных давлений паров воды на определенный объем горной породы (Verhoogen, 1951). Основным фактором взрыва, по этому мнению, является увеличение количества пузырьков (паров воды) на единицу объема в единицу времени. Несмотря на то, что Ферхуген (Verhoogen, 1951) указанный механизм взрыва считал приемлемым лишь для жидкого магматического расплава в канале вулкана, выводы Ферхугена стали использоваться при объяснении образования любых видов пирокластики (в том числе резургентных пеплов). При этом недостаточно обращалось внимания на то обстоятельство, что механизм взрыва в трактовке Ферхугена применим для очень незначительной части пирокластики, той, где при эксплозиях доминирующее положение занимают ювенильные пеплы,

Объяснений механизма образования резургентного пеплового материала, т. е. составной части продукта подавляющей части всех эксплозий, до настоящего времени не дано. При обработке собранного нами пирокластического материала извержений вулканов Северной Камчатки (где представлены как продукты ювенильные, так и резургентные), мы пришли к заключению, что представления Ферхугена в большинстве случаев не находят или почти не находят своего подтверждения при эксплозивных процессах Северной Камчатки.

По нашим данным, при усилении извержений, носящих эксплозивный характер, происходит стабильное понижение парциального давления кислорода в канале вулкана. Указанный вывод основывается на том, что в пепловом материале эксплозий в ходе каждого извержения мы констатируем стабильное возрастание FeO по отношению к Fe_2O_3 . Все наиболее сильные вспышки эксплозивных проявлений Северной Камчатки характеризуются уменьшением парциального давления кислорода в канале вулкана. Исходя из общепринятых представлений о том, что парциальное давление кислорода отображает прежде всего количественное содержание паров воды в расплаве, мы можем считать, что в рассмотренных нами случаях не подтверждается представление Ферхугена об избыточном давлении паров воды как единственном источнике вулканических эксплозий.

Об этом свидетельствуют как извержения типа Плинианского, Катмайско-Безымянского, так и извержения типа Стромболи и Вулкано.

Таким образом, даже ювенильный материал эксплозий не свидетельствует о решающей роли воды при вулканических взрывах.

В тех случаях, для которых предположение Ферхугена не находит своего подтверждения, мы сочли необходимым дать свою оценку возможности протекания вулканических взрывов за счет окислительно-восстановительных реакций, происходящих между отдельными компонентами вулканических газов.

В связи с этим необходимо остановиться на наиболее существенных возражениях, которые выдвигались против возможности протекания химического взаимодействия вулканических газов со взрывом.

Наиболее существенным препятствием вулканическому взрыву является активное стремление вулканических газов к равновесию. Особый интерес для нас должны представлять цепные газовые реакции, как наиболее реальные в этих условиях, поскольку решающим моментом при вулканических взрывах должна быть скорость протекания реакций.

Поэтому мы сочли полезным не ограничиваться обычными ссылками на литературные источники, трактующие физико-химические условия протекания взрыва, а для доказательства возможности таких взрывов и при эксплозиях вулканов воспроизвели по опубликованным литературным данным физико-химические представления на природу взрывов.

Другой нашей задачей была попытка оценить количество газов, которые могут активно взаимодействовать при вулканических взрывах.

Кинетика вулканических газов

К настоящему времени мы располагаем большим количеством химических анализов, которые характеризуют газы фумарол вулканов. По общепризнанному мнению, подавляющая часть этих анализов не может служить мерилем для выявления истинных соотношений в вулканических газах. Имеются лишь единичные анализы, в которых воздушные примеси и примеси контаминированных грунтовых вод были сведены к минимуму. Но и эти наиболее качественно выполненные анализы характеризуют только те извержения (главным образом Гавайского типа), которые не являются эксплозивными. На основании этих анализов сложилось убеждение, что процентное содержание активных (способных ко взрывам) газов в канале вулкана недостаточно для того, чтобы служить источником вулканических эксплозивных проявлений.

Поскольку мы хотим рассмотреть роль кинетики газов при эксплозивных процессах, уместно будет предварительно оценить данные анализов вулканических газов и анализы газов, растворенных в кристаллических горных породах (остаточные газы).

Фумарольные газы. В анализах фумарольных газов отмечается постоянное присутствие взрывоспособных компонентов в виде Cl_2 , H_2 , H_2S , CN_4 . Общее количество этих компонентов, если отбросить контаминированные газы, колеблется, по данным Готье, Джаггара (Jaggar, 1940), И. З. Иванова (1938), Л. А. Башариной (1958), Л. Сурниной (1959), от долей процента до 10%.

Из данных многочисленных исследований вытекает, что характер и интенсивность выделения газов в значительной степени определяются физическим состоянием расплава (термодинамические условия).

Газы, растворенные в горных породах. Более высокий процент содержания взрывоспособных газов показывают анализы сухого газа, входящего в остывшие горные породы. По данным Шеперда, в базальтах гавайских вулканов (в об. %) взрывоспособные газы представлены в еще большем объеме (общее среднее содержание Cl_2 , F_2 ,

СО составляет до 17%). Исследования (Чемберлен, Готье) по изучению состава сухих газов в андезитах и базальтах различных провинций, как и по другим породам, отмечают очень высокое процентное содержание взрывоспособных газов в породах, в частности содержание водорода составляет 34—42%. На вулкане Санторин содержание водорода в сухом газе пород 56,72%. Вместе с тем, резко снижается содержание паров воды.

Очень высок процент содержания HCl и Cl в обсидианах Кракатау, Исландии, шлаках Везувия; например содержание HCl и Cl в обсидианах Кракатау извержения 1883 г. составляет свыше 70 об. % общего содержания сухого газа, растворенного в горных породах (Sapper, 1927).

Исходя из данных Никогосяна (1940), отмечается следующая особенность распределения остаточного сухого газа в горных породах: каждому типу пород характерна определенная доля содержания газовых компонентов. Это относится как к общему валовому составу, так и отдельным газовым компонентам.

Таким образом, на основании изложенных данных можно предполагать, что в чистых вулканических газах, не подвергшихся контаминации близповерхностными водами и воздухом, содержание взрывоспособных газов (Cl_2 , F_2 , H_2 , СО и др.) может измеряться от 10 до 70 об. % всей газовой фазы. Учитывая, что отсутствие свободного кислорода в вулканических газах не сказывается на их способности взрываться, можно рассматривать кинетическую энергию взрыва этих газов как источник образования масс пирокластического материала. Прежде всего, следует рассмотреть возможность протекания цепных взрывов. Поскольку условия протекания цепных реакций в газах изучены достаточно хорошо Н. Н. Семеновым (1958) и другими, на основании этих исследований можно сделать некоторые замечания по вулканическим газам.

Свойства вулканических газов. В газах вулканов могут быть определены почти все элементы, входящие в менделеевскую таблицу. Рассматривая наиболее распространенные из вулканических газов, мы сочли возможным расчленить их на следующие группы:

- 1) взрывоспособные активные газовые компоненты, способные при взаимодействии между собой давать цепные реакции типа взрывов. Сюда относятся ++ H_2 , -- Cl_2 , СО, - ОН, - F_2 , - Br, - I, H_2S , CH_4 ;
- 2) активные катализаторы взрывоспособных смесей. Они способны энергично увеличивать скорость реакций (до 1000 и более раз); сюда относится, главным образом, H_2O ;
- 3) прореагировавшие взрывчатые смеси, с малой энергией активации, являются частично взрывоспособными и частично катализаторами;
- 4) невзрывоспособные инертные газы. Отрицательные катализаторы N_2 , CO_2 . Они оказывают эффект прямо пропорциональный теплопроводности и обратно пропорциональный теплоемкости (ср.) газов,

т. е. $\sqrt{\frac{\lambda}{c_p}}$;

- 5) частичные катализаторы S_2 , SO_2 , SO_3 .

Как известно, интенсивность и характер выделения газов из расплава обуславливаются прежде всего термодинамическими условиями. В газовой фазе, как только она обособится из магматического расплава, начинают идти многочисленные реакции, последовательность и характер которых можно представить в зависимости от интенсивности и характера обособления газов из магматического расплава. Состав отдельных газовых компонентов может значительно видоизменяться.

Возможность цепных реакций и тепловых взрывов при эксплозиях. Природа взрыва, как известно, та же самая, что и горения. Решающим фактором является скорость протекания

реакций. Способность газов к самовзрыванию и вынужденному взрыву определяется величиной энергии активации (E). В случае вынужденного взрыва нижняя граница взрываемости определяется по правилу Ле-Шателье.

Ниже приведены данные по ряду бинарных систем, взаимодействие между которыми характеризуется цепным механизмом взрыва:

	(g) ккал/моль
$H + Cl_2 = HCl + Cl$	+45
$H + CH_4 = H_2 + C_2H_5$	+2,0
$H + HCl = H_2 + Cl$	+1,1
$OH + CH_4 = H_2O + CH_3$	+16,0
$OH + CO = CO_2 + H$	+26,0
$Cl + H_2 = HCl + H$	- 1,1
$F + H_2 = HF + H$	+31,0
$Cl + CH_4 = HCl + C_7H_{15}$	+ 8,0

Из этих данных следует, что подавляющая часть реакций характеризуется экзотермичностью. В семи из восьми случаев тепловой эффект реакции (q) положительный. Данные взяты из работ В. Йоста (1952), Л. Н. Хитрина (1957), Н. Н. Семенова (1958), Г. И. Кунина и В.И.Сердюкова (1946).

Приведем также нижние концентрации взрываемости газовых смесей, которые колеблются в пределах от 1,0 до 15,5% (объемных):

Водород	4,00
Окись углерода	12,50
Аммиак	13,5—15,50
Сероводород	1,0—4,3
Хлор	12,00—15,00

Условия взрываемости вулканических газов должны определяться размерами пузырьков газа в расплаве. При давлениях, приближающихся к атмосферному, цепной механизм реакции возможен, если диаметр пузырьков газа в расплаве равен нескольким миллиметрам (для цепной реакции $H_2 + Cl_2$ диаметр должен быть не менее 4 мм). При давлениях, измеряемых десятками атмосфер, минимальный диаметр должен быть не менее десятых долей миллиметра.

Энергия взрыва газов. Подавляющая часть извержений вулканов характеризуется взрывами в самых различных формах. К сожалению, количественных оценок энергии взрыва вулканов очень мало. Более других исследован в этом отношении вулкан Безымянный. Взрыв этого вулкана 30 марта 1956 г. характеризовался, по свидетельству очевидцев, отсутствием сколько-нибудь заметного пламени. Температура выброшенного взрывом пирокластического материала составляла 650° (для взрывоспособных компонентов нижний температурный предел взрываемости газов в ряде случаев ниже 300° при $P=1$ атм, а средняя температурная граница нижнего предела взрываемости составляет около 650°). Хотя нижняя граница взрыва газов определяется в отдельных случаях несколькими объемными процентами к общему содержанию газов, в условиях вынужденного взрыва очень большое значение приобретает сам характер этого возбуждения. Поэтому для оценки минимальных концентраций вулканических газов, способных устойчиво взрываться, нам кажется целесообразным выбрать для рассмотрения взрывчатую смесь, составляющую 1/3 всей газовой фазы, так как по условиям эксперимента, проведенного Г. И. Куниным и В. И. Сердюковым (1946), устойчивый взрыв может быть лишь с этой величины. Средняя

величина энергии теплового эффекта реакции (g) лежит в пределах $-1,1$ до $+45,0$ *ккал/моль* для наиболее распространенных компонентов. Примем условно за среднюю величину $g = 30$ *ккал/моль*. При содержании инертных примесей в 67% и взрывчатых вулканических газов в 33% общая величина теплового эффекта для газовой фазы указанного состава будет 10 *ккал/моль*. Считая, что при цепном механизме реакции, характеризуемом изотермичностью, теплота реакции (g) выражает собой энергию взрыва, мы можем считать, что 1 *моль* газовой фазы (считая и инертные примеси) дает в среднем энергию взрыва, равную 10 *ккал/моль*, или, в эргах, 1 *моль* дает энергию взрыва $0,418 \cdot 10^{12}$. Указанная цифра отвечает многочисленным условиям эксперимента при $P=1$ *атм* и температуре $600-700^\circ$, при которых в лабораторных условиях отмечается устойчивое протекание взрыва с цепным механизмом реакции.

Условия взрыва с образованием пирокластического материала

При любом взрыве имеет место образование пеплового материала. Рассмотрим сначала условия образования ювенильного пепла. Одним из условий взрыва вулканических газов с теплообразованием является наличие определенной величины давления внутри пузырьков газов, заключенных в расплаве. Это внутреннее давление газовых пузырьков должно в какой-то определенный момент превысить силы внутреннего давления, создаваемые вязким магматическим расплавом. Сила извержения зависит от количества взрывающихся (а не образующихся) в единицу времени газовых пузырьков. Спротивление, которое испытывают газовые пузырьки при движении в расплаве, предопределяется его плотностью и вязкостью. Возможные концентрации газа в приповерхностных участках магматического расплава устанавливаются по разнице удельного и объемного весов пород, слагающих верхнюю часть канала магматического расплава.

При объемном весе пород $0,5-2,4$ и удельном весе $2,5$ мы имеем возможный предел концентраций газовой фазы от 4 до 80% всего объема породы.

Давая математическое выражение энергии взрыва, Ферхуген исходил из условий равновесного существования газовых пузырьков в жидкости, при котором вязкость и давление взаимно уравниваются. Такое условие, вероятно, правомерно в очень малом объеме в силу того, что подобное пеплообразование может происходить в зоне минимальной вязкости. Наличие же жидкого столба лавы, находящейся под различным давлением и сохраняющей одинаковую величину вязкости, мало вероятно. А для резургентного пеплообразования подобный процесс вообще не может быть.

Определенная последовательность выделения газов из расплава, обуславливаемая термодинамическими условиями, предопределяет некоторую дифференцированность газовых пузырьков в зависимости от состояния расплава. Изменение термодинамических условий создает в ряде случаев скачкообразные условия перехода, при которых газы приобретают условия взрывоспособности (при экспериментальных исследованиях оказывается, что аномальное поведение газовых систем присуще по существу всем газам).

Первыми выделяются из расплава газы с большей энергией активации. Газовые смеси непрерывно находятся во взаимодействии между собой. При достижении некоторых объемов газом, отделившимся от расплава, могут развиваться цепные реакции, существенно изменяющие скорость протекания этих взаимодействий.

Резургентные пеплы являются прежде всего продуктом взаимодействия взрывчатых смесей отдельных газовых компонентов с твердыми участками канала вулкана.

О влиянии физико-механических свойств горных пород на давления, возникающие в канале вулканов в момент взрывов

Предельное давление, испытываемое газами, расположенными в верхних участках магматического канала вулкана, создается из собственного веса лежащих выше пород и добавочного сопротивления боковых пород кровли вулкана. Создаваемое добавочное сопротивление, сопротивление скалыванию, в значительной мере зависит от размера подводящего канала магмы.

В этих условиях большое значение приобретают состав и механические свойства пород, слагающих приповерхностные участки вулкана. Непосредственными измерениями сопротивлений изверженных пород на скалывание мы не располагаем, но нам известны определенные взаимоотношения временного сопротивления сдвигу и сопротивления скалыванию, которые могут характеризовать изверженные породы. Проведено много испытаний изверженных пород на временное сопротивление сдвигу (смещение в условиях двустороннего сжатия). Сопротивление скалыванию горных пород может колебаться по отношению к величине сжатия (обозначаемое через R) в пределах от 0,02 до 0,08 R : для гранита, в частности, эта величина составляет 0,07 R (Саваренский, 1939, Разин, 1948). Если мы применим коэффициент для гранита к изверженным породам, то получим величины, характеризующие сопротивление скалыванию различных типов изверженных горных пород. В табл. 1

Таблица 1

Величины сопротивления скалыванию

Название породы	Временное сопротивление сжатию, кг/см ²	Коэффициент R	Временное сопротивление сдвигу, кг/см ²
Базальты плотные	4560	0,07	319,5
Андезиты плотные и базальты средней плотности	2700	0,07	188,5
Андезиты средней плотности	1700	0,07	119,0
Андезито-базальты стекловатые	900	0,07	63,0
Андезито-базальты пористые, разложенные	180	0,04	7,2
Артикские туфы	107	0,07	7,5

приведены величины сопротивлений скалыванию для интересующих нас горных пород, полученные при помощи коэффициента для гранитов. Характеристики временного сопротивления сжатию различных типов пород взяты из работ Саваренского (1939) и Овсянникова (1959).

Коэффициент $R = 0,07$, видимо, не во всех случаях будет отражать истинные соотношения, но размер этих отклонений крайне невелик и возможен лишь в сторону некоторого уменьшения значений сопротивлений скалыванию горных пород. Многочисленные эксперименты говорят о том, что полученные характеристики физико-механических свойств горных пород в значительной мере зависят от величины испытываемого образца (чем меньше образец, тем меньшее давление требуется для его разрушения, скалывания и прочих воздействий). Согласно данным Мюллера (Muller, 1936) и других исследователей, трещины образуются

и распространяются при любом напряжении меньше разрывного. Скорость роста трещин зависит от нагрузки, температуры и среды. Отсюда видно, что величины, характеризующие состояние прочности горных пород кровли на скалывание, следует рассматривать, понимая всю их условность. Приводимый рисунок иллюстрирует влияние сопротивления на скалывание верхней кровли вулкана при различных диаметрах вывозного канала магмы. Безусловно, физико-механические характеристики для статических нагрузок являются завышенными, но для условно-мгновенных прочностей горных пород в ряде случаев требуются именно повышенные сопротивления пород скалыванию.

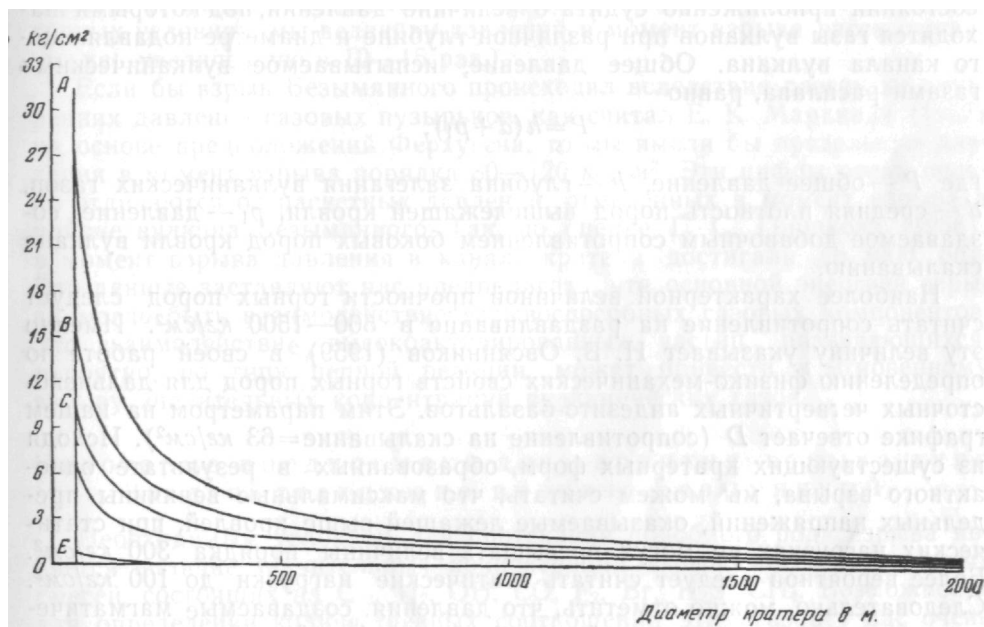


Рис. 1. Сопротивление (в $\text{кг}/\text{см}^2$) скалыванию на 1 м глубины при различных диаметрах кратера

Как известно, условно-мгновенные прочности горных пород при тектонических нарушениях требуют повышения давления в 5—10 раз по отношению к предельным нагрузкам, необходимым для преодоления временного сопротивления сдвигу. На основании этого можно приближенно считать выведенные нами величины сопротивлений горных пород скалыванию приближающимися к действительности.

Рассмотрение взрывных проявлений показывает, что в подавляющей части выброшенный взрывом материал крупного одноактного взрывного проявления очень часто соответствует по объему размерам разрушенного (взорванного) участка вулкана. Исходя из этой предпосылки, можно судить о приближенных глубинах, на которых протекает и зарождается процесс взрыва. Рассматривая существующие в природе взрывные кратеры и кальдеры, можно отметить, что глубина их варьирует от десяти до нескольких сот метров. Во всяком случае глубины взрывных одноактных кратеров больше 1 км неизвестны. Диаметры кратеров, кальдер взрывного типа имеют размеры от 10 м до нескольких километров. Поскольку максимальное влияние вмещающей кровли на предельные давления, испытываемые газами, сказывается в значительной мере лишь в кратерах диаметром до 2 км (см. рис. 1), то мы ограничились рассмотрением влияния вмещающей кровли (сопротивление скалыванию) лишь до размера кратера с диаметром не свыше 2 км.

Как уже отмечалось, подводящий канал вулкана в своей верхней части испытывает статическое давление, создаваемое собственным весом лежащих выше пород над расплавом и добавочного сопротивления боковых пород кровли вулкана скалыванию. Это скалывающее напряжение боковых стенок вулкана создает добавочное давление, испытываемое магматическим расплавом и вулканическими газами, находящимися в подводящем канале вулкана. Величина этого дополнительного давления представлена нами графически на рисунке. Пользуясь этим графиком, где для каждого типа пород (согласно табл. 1) представлена величина дополнительного давления на магматический расплав, мы в состоянии приблизительно судить о величине давлений, под которыми находятся газы вулканов при различной глубине и диаметре подавляющего канала вулкана. Общее давление, испытываемое вулканическими газами расплава, равно

$$P = h(d+p_1),$$

где P — общее давление, h — глубина залегания вулканических газов, d — средняя плотность пород вышележащей кровли, p_1 — давление, создаваемое добавочным сопротивлением боковых пород кровли вулкана скалыванию.

Наиболее характерной величиной прочности горных пород следует считать сопротивление на раздавливание в 500—1500 кг/см². Именно эту величину указывает Н. В. Овсянников (1959) в своей работе по определению физико-механических свойств горных пород для дальневосточных четвертичных андезито-базальтов. Этим параметром на нашем графике отвечает D (сопротивление на скалывание = 63 кг/см²). Исходя из существующих кратерных форм, образованных в результате одноактного взрыва, мы можем считать, что максимальные величины предельных напряжений, оказываемые лежащей выше кровлей, при статических нагрузках не могут превышать величины порядка 300 кг/см². Более вероятной следует считать статические нагрузки до 100 кг/см². Следовательно, можно отметить, что давления, создаваемые магматическим расплавом с включенной в него газовой фазой, на лежащую выше кровлю при статических нагрузках очень малы (не выше 100—300 кг/см²). При рассмотрении возможных величин нагрузок мы исходили из существующих в природе кратерных форм в определенных геометрических соотношениях $D \geq H$. Считая процесс взрыва в вулкане тождественным с взрывами бинарных и более сложных систем, проводимых в лабораторных условиях, мы можем считать, что в момент взрыва вулканов предельные давления увеличиваются по сравнению со статическими в 10—15 раз, т. е. максимальная величина давлений при современных вулканических взрывах не должна превышать 4500 кг/см².

В качестве примера можно рассмотреть статические предельные напряжения, существовавшие в канале вулкана Безымянный до момента взрыва 30 марта 1956 г. Размер выброшенного при этом взрыве материала составлял 1 км³ агломератового потока и 0,15 км² пепла. Согласно нашему графику, получается, что при диаметре вулкана Безымянного в 2 км к глубине 700 м статическое напряжение в восточной части верхнего участка канала вулкана определялось в основном собственным весом лежащей выше кровли, поскольку восточный участок вулкана Безымянного был сложен целиком грубообломочным пирокластическим материалом. Для западного сектора вулкана, где 9/10 вскрытой толщи составляли лавовые потоки, влияние сопротивления на скалывание было довольно значительным.

Из всей 600-метровой западной стенки кальдеры, вскрытой в момент взрыва, лавовый материал составлял 540 м. Сопротивление скалыванию в нижних участках составляло около 100 кг/см² и вес лежащей выше

толщи был равен 145 кг/см^2 (см. рисунок). Таким образом, предельные статические нагрузки для западного сектора вулкана составляли 245 кг/см^2 и в восточном секторе для 700 м толщи — 160 кг/см^2 . Разница допустимых предельных нагрузок составляла 80 кг/см^2 ; благодаря этой разнице мы наблюдаем ассиметрию дна кальдеры вулкана и развитие взрыва направленного действия.

Предположив, что максимальная концентрация газовой фазы была на глубине 300—350 м, мы будем иметь для газов средние давления до взрыва порядка 80—120 кг/см^2 , в момент взрыва — 800—1800 кг/см^2 в средней, вскрытой части канала вулкана и до 3600 кг/см^2 в нижней зоне взрыва. (Исходя из аналогии по взрывам бинарных систем в лабораторных условиях, мы величину давлений в момент взрыва рассматриваем, как увеличенную в 10—15 раз.)

Если бы взрыв Безымянного происходил вследствие разгрузки внутренних давлений газовых пузырьков, как считал Е. К. Мархинин (1957) на основе предположений Ферхугена, то мы имели бы предельные давления в момент взрыва порядка 80—120 кг/см^2 . Эти цифры очень сильно отличаются от расчетных давлений, отмеченных в момент взрыва в районе вулкана Безымянного. Так, по оценке Г. С. Горшкова (1956), в момент взрыва давления в канале кратера достигали до 3000 бар. Эти данные заставляют нас предполагать, что основной энергией взрыва могло быть взаимодействие взрывоспособных газовых компонентов. Это взаимодействие высокоактивированных частиц, развивающихся, вероятно, по типу цепной реакции, может привести к мгновенному взрыву значительных концентраций вулканических газов.

Некоторые предпосылки для развития взрыва типа цепной реакции на вулкане Безымянный

Необходимым условием для протекания подобного рода взрыва является наличие значительных концентраций взрывоспособных газовых смесей, состоящих из Cl_2 , H_2 , OH , CO , F_2 , Br , H_2S , CH_4 . Возможности для определений количественных соотношений этих газов у нас очень ограничены. Для взрыва Безымянного 30 марта 1956 г. мы располагаем лишь определениями содержания хлора в воднорастворимых вытяжках продуктов этого взрыва. Эти данные (Товарова, 1958) позволяют нам с некоторой уверенностью утверждать, что наличие хлора было в таких концентрациях, что даже одно взаимодействие хлора с водородом ($\text{H} + \text{Cl}_2$) могло привести к взрыву подобной силы. Согласно данным И. И. Товаровой, получается, что на 1 млрд. т продуктов извержения приходится около 0,5 млн. т хлора. Если исходить из того, что вес выброшенного взрывом Безымянного материала составляет 1,8 млрд. т, то хлора в продуктах взрыва должно было быть не менее 0,9 млн. т. Исходя из молекулярного веса хлора 70,9 его веса $9 \cdot 10^{11} \text{ г}$, теплового эффекта реакции 45 ккал/моль (на основании данных табл. 1), мы в состоянии приблизительно подсчитать количество граммолекул хлора (n) и оценить потенциальную энергию взрыва (E) вулкана Безымянного по цепной реакции ($\text{H} + \text{Cl}_2$):

$$n=9 \cdot 10^{11} \text{ г}; 70,9=1,271 \cdot 10^{10} \text{ молей},$$

отсюда энергия взрыва

$$E=1,271 \cdot 10^{10} \cdot 45 \text{ ккал} = 57,3 \cdot 10^{10} \text{ ккал/моль} = 2,38 \cdot 10^{22} \text{ эрг.}$$

У нас есть все основания полагать, что хлора было в продуктах извержения больше (мы не смогли учесть хлор, унесенный в атмосферу) и, кроме того, происходили, по-видимому, цепные реакции между другими компонентами газовой фазы. Таким образом, можно считать, что

энергия взрыва составляет не менее $n \cdot 10^{22}$ эрг. Указанной энергии вполне достаточно для того, чтобы выбросить в результате взрыва массу в 1,8 млрд. т агломератового и пеплового материала на высоту порядка сотен метров. Перенос же в более верхние слои атмосферы осуществлялся турбулентными воздушными потоками.

Достаточно отметить, что при рассматриваемом нами взрыве 30 марта 1956 г. интенсивность тепловыделения над кратером за счет передачи тепла нагретым пирокластическим материалом в атмосферу была в $n \cdot 10^5$ раз больше, чем с такой же единицы поверхности отложившегося агломератового потока вулкана Безымянный при той же температуре. Учитывая, большую интенсивность теплоотдачи в атмосферу мелким пепловым материалом, можно допустить, что до 10% тепловой энергии мелкого пепла ($E=1,2 \cdot 10^{23}$ эрг) способны перейти в короткий промежуток времени в кинетический вид энергии. Вероятно, эта величина E и представляет собой второй скачок записи барограммы, представленной Горшковым Г. С. в работе 1959 г. Эта дополнительная энергия и осуществляет, по-видимому, дальнейший перенос пеплового материала в верхние слои атмосферы.

Помимо нижнего предела взрыва, определяемого в $2,38 \cdot 10^{22}$ эрг, можно оценить верхний предел кинетической энергии взрыва вулкана. Это можно сделать исходя из содержания и состава взрывоспособных газов, растворенных в горных породах. Для вулкана Безымянного на весь объем выброшенного взрывом материала приходится примерно около 1 км^3 объема пор, заполненных газами. Эти газы находились в порах под давлением от 1 до 250 кг/см^2 . Если за среднюю величину возьмем $P=100 \text{ кг/см}^2$, то в этом случае возможный вес всех взрывоспособных газов (при 50% содержании их к общему весу газов) может составить 12—13 млн. т газов, на выброшенную взрывом 30 марта 1956 г. массу агломерата и пепла. Таким образом, оценка энергии взрыва Безымянного представляется возможной благодаря цепному механизму реакций взрывоспособных газов. Потенциальная энергия взрыва этих газов колеблется в пределах от $n \cdot 10^{22}$ до $n \cdot 10^{23}$ эрг.

Наша оценка энергии взрыва хорошо согласуется с данными других авторов. Оценка энергии взрыва по воздушной волне на основании барограмм, Г. С. Горшков (1957, 1959) и Стюарт (Stewart, 1959) давали величины в пределах $n \cdot 10^{21}$ — $n \cdot 10^{23}$ эрг.

Вязкость магмы в канале кратера и пеплообразование

Крайне важно определить местоположение участка с максимальной концентрацией газовой фазы, поскольку главным образом в этом участке возможны наиболее значительные эксплозивные проявления.

Максимальные концентрации газовой фазы, по-видимому, должны сосредотачиваться под мантией плотного материала пород, составляющих лежащую выше кровлю вулкана. Следствие этого — постоянное присутствие в продуктах извержения вулкана резургентного материала. Другим возможным участком концентрации вулканических газов в значительных объемах следует считать расположенные ниже приповерхностные зоны минимальной вязкости расплава. Подобное представление базируется прежде всего на свойствах силикатных расплавов. Ведь с увеличением давления до некоторого предела вязкость силикатных расплавов уменьшается и в связи с этим повышается скорость кристаллизации расплава. Об этом свидетельствует ряд экспериментальных работ (Леонтьева, 1953; Воларович и Леонтьева, 1947). В связи с этим, вероятно, появляются повышенная скорость выделения газов из расплава и несколько аномальные температурные условия.

Подобное явление, по-видимому, должно быть выражено во всех типах магм. Аномальные температурные условия объясняются значительным присутствием газовых компонентов, растворенных в силикатных расплавах. При отсутствии газовых компонентов, подобной аномалии в силикатных расплавах не наблюдается (Воларович и Леонтьева, 1947). Для основных лав подобное понижение температуры с глубиной было зафиксировано при измерении температурного режима лавового озера в кратере Килауэа. Но этот факт был целиком приписан окислительным процессам на поверхности жидкой лавы (Jaggar, 1940). В работах Д. Кеннеди это предположение опровергается экспериментальными и расчетными данными. Исходя из подобных свойств магматического расплава, нам кажется вероятной возможность существования пластично жидкого участка, окруженного твердым пластичным материалом приповерхностного канала магмы среднего и кислого составов.

ВЫВОДЫ

1. Движущей силой взрывных проявлений может быть кинетическая энергия окислительно-восстановительных реакций отдельных высокоактивированных газовых компонентов, входящих в состав вулканических газов. Энергия этих взрывов достаточна для развития взрывных процессов.

2. В рассмотренных нами случаях представления Ферхугена о движущей силе взрывных проявлений неприменимы.

3. Исходя из существующих в природе кратерных форм в определенных геометрических соотношениях $D \geq H$, мы вправе считать, что давления, создаваемые магматическим расплавом на лежащую выше кровлю вулкана при статических нагрузках, не превышают 300 кг/см^2 . В момент взрыва вулкана эти давления не превышают 4500 кг/см^2 .

4. Взрыв 30 марта 1956 г. на вулкане Безымянный мог развиваться благодаря цепному механизму реакций взрывоспособных вулканических газов этого вулкана.

ЛИТЕРАТУРА

- Башарина Л.А. Исследование газообразных продуктов вулканов Ключевского и Швелуча. «Бюлл. Вулк. станции», № 27, 1958.
- Башарина Л.А. Вытяжки пепла и газы пепловой тучи вулкана Безымянного. «Бюлл. Вулк. станции», № 27, 1958.
- Бриджмен П. В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. М., 1955.
- Воларович М.П. и Леонтьева А.А. О влиянии давления на линейную скорость кристаллизации расплавов горных пород. «Докл. АН СССР», 1947, т. 55, № 3.
- Горшков Г. С. Извержения вулкана Безымянного. «Бюлл. Вулк. станции», № 26, 1956.
- Иванов И. З. Исследования газообразных продуктов побочных вулканов Ключевской сопки и Швелуча. «Бюлл. Вулк. станции», № 4, 1938.
- Пост В. Взрывы и горения в газах. ИЛ, 1952.
- Кунин Г. И., Сердюков В. И. Границы и температуры взрыва хлора и водорода в хлористом водороде. «Журнал общей химии», 1946, т. XVI, вып. 9.
- Леонтьева А. А. Зависимость линейной скорости кристаллизации от вязкости для стекол из системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$. «Зап. Всес. минер. об-ва», № 72, № 1(62), 1943.
- Мархинин Е. К. Об энергии образования ювенильного вулканического пепла. «Докл. АН СССР», 1957, т. 116, № 5.
- Никогосян Х. С. Некоторые данные по изучению газовой составляющей горных пород. «Труды 3-го совещ. по эксперим. минер. и петрогр.», 1940.
- Овсянников Н. В. О зависимости механических свойств андезито-базальтов от их геолого-петрографических особенностей. «Труды Дальневост. политехн. ин-та им. В. В. Куйбышева», т. 54, вып. 1, 1959.
- Саваренский Ф. П. Справочник по инженерной геологии. 1939.

- Семенов Н. Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности. Изд-во АН СССР, 1958.
- Сурнина Л. Химический состав газов вулкана Эбеко. «Геохимия», 1959, № 5.
- Товарова И. И. О выносе воднорастворимых веществ из пирокластики вулкана Безымянного. «Геохимия», 1958, № 7.
- Хитрин Л. Н. Физика горения и взрывов. 1957.
- Gorshkov G. S. Gigantic eruption of the Volcano Bezymianny. «Bull. Volc». S. II, T. XX, Napoli, 1959.
- Jaggat T. A. Magmatic gases. Am. J. Sci., v. 238. May, 1940.
- Muller A. Smekal j Soc. Glass Techn. 20, 432, 1936.
- Sapper K. (1927) Vulkankunde. Stuttgart, 1927.
- Stewart K. H. Air waves from a volcanic explosion. Meteorol. Mag., 1959, 88, No. 1039. 1—3.
- Verhoogen J., Mechanics of ash formation. Am. J. Sci., 1951, 249, N. 71.