

## Механизм вулканических извержений

Ю. Б. Слезин



*Юрий Борисович Слезин, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией Института вулканической геологии и геохимии ДВО РАН (Петропавловск-Камчатский). Область научных интересов — физические основы механизма вулканической деятельности. Автор многочисленных научных публикаций, один из основных соавторов монографии «Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка. 1975—1976» (М., 1984).*

**КАК РАБОТАЕТ** вулкан? Коротко можно ответить так: «Он извергается». Извержения поражают своей мощью и красотой, они пугают и завораживают, удивляют своим разнообразием, которое трудно уложить в единую схему. Чтобы ответить на поставленный вопрос подробнее, надо проникнуть во «внутреннюю кухню» вулкана, о которой имеется лишь косвенная информация.

Характер вулканического процесса зависит от механических свойств извергаемых продуктов и движущей силы — перепада давления. Непосредственно извержению предшествуют процессы возникновения, формирования и переноса к поверхности пород из недр, а затем следует перенос этих продуктов по поверхности Земли до их отложения или рассеяния в атмосфере. Первая группа процессов определяет механизм извержения в узком смысле, ее мы и рассмотрим.

### ЧТО ИЗВЕРГАЕТСЯ?

Твердые, жидкие и газообразные вулканические продукты. Проще всего с жидкими — это лава, представляющая собой силикатный расплав, состоящий из 45—75% кремнезема, существенно меньшего количества оксидов железа, алюминия и магния и еще меньшего количества некоторых других компонентов. Лавы, как правило, не перегреты, всегда содержат немного взвешенных кристаллов, температура их находится в интервале 800—1200°C, а вязкость —  $10^1$ — $10^9$  Па·с.

Твердыми продуктами обычно называют пирокластику — раскаленный обломочный материал, от крупных «бомб» до тонкого пепла. Они представляют собой затвердевший расплав,

раздробленный и вынесенный на поверхность потоком газа. Холодный резургентный материал — это заново передробленные продукты предыдущих извержений, результат частичного разрушения вулканической постройки.

Газы сопровождают любую вулканическую деятельность. Бывает выделение только газов, но невозможно извержение только конденсированных продуктов. При достаточно интенсивных и продолжительных событиях надежно установлена пропорциональность расходов расплава и газа. Почти все газы первоначально были растворены в расплаве и отделились в свободную фазу лишь при снижении давления в процессе извержения.

Глубинный расплав, содержащий растворенные летучие компоненты, принято называть магмой. Лава — магма, излившаяся на поверхность земли и потерявшая при этом большую часть летучих компонентов. (Газовая фаза и взрывные явления могут возникать и в результате контактного взаимодействия расплава с поверхностными водами. Такие, вторичные, эффекты здесь рассматривать не будем.)

Чтобы объяснить вулканическую деятельность, надо понять: как возникает магма? Что толкает ее вверх? Почему ее поступление на поверхность прерывисто? Описание механизма извержения в узком смысле отвечает на вопрос: с чем связано наблюдаемое разнообразие продуктов и режимов извержения?

#### ВУЛКАНИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Ответ на первый из перечисленных выше вопросов выглядел просто в не столь давние времена, когда господствовали гипотезы, предполагавшие «горячее» образование Земли из солнечной материи. Когда же стало ясно, что Земля до глубины 2900 км в целом твердая, выяснение причин и конкретных механизмов генерации магмы превратилось в одну из сложнейших проблем, не решенную до сих пор. На сегодняшний день считается,

что расплав с наибольшей вероятностью может возникнуть на глубинах от 100 до 300 км, где температура вещества в среднем близка точке его плавления, а вязкость понижена. Причины локального плавления можно разделить на три группы: разогрев из-за действия локального источника тепла, притока тепла снизу или ограничения оттока сверху; местное понижение температуры плавления за счет привноса снижающих эту температуру компонентов или за счет сброса давления; подъем сильно разогретых масс глубинного вещества в результате макроконвекции в мантии.

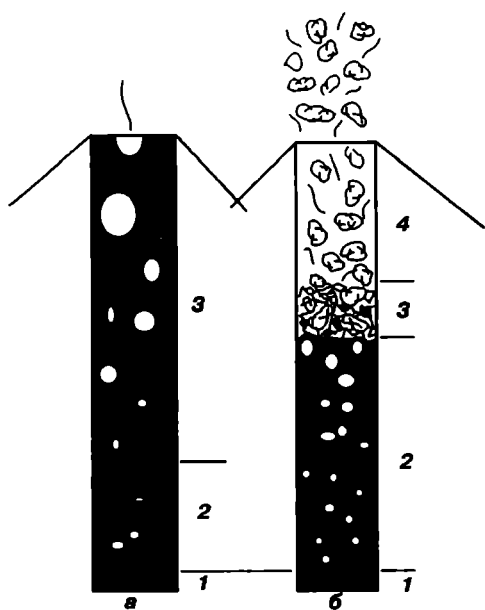
Плавление должно быть мало-мощным, частичным, сопряженным с дифференциацией вещества, которая также понижает плотность расплава по отношению к окружающей среде на 5—15 %. Возникающая сила плавучести обуславливает конвективный подъем разуплотненных масс в виде отдельных медленно всплывающих струй<sup>1</sup>.

В относительно холодной литосфере, где вязкость вещества на 3—5 порядков выше, чем в астеносфере, всплывание невозможно, и дальнейший подъем осуществляется по трещинам, развивающимся в основном по механизму гидроразрыва<sup>2</sup>. Неоднородность литосферы и, особенно, коры приводит к образованию промежуточных очагов — горизонтально протяженных объемов, заполненных магмой. Последний такой резервуар соединяется каналом с поверхностью земли. При достаточно длительном функционировании системы очаги и каналы изменяют свою форму. Очаг становится практически сферическим, канал — цилиндрическим. Так возникает магматическая система вулкана. Этот термин, по-видимому, ввел Л.Грейтон, первый попытавшийся последовательно проанализировать физический механизм извержения<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Федотов С.А. // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1976. № 10. С.25—37.

<sup>2</sup> Попов В.С. // Там же. 1973. № 10. С.48—57.

<sup>3</sup> Грейтон Л. Предположения о вулканическом тепле. М., 1949.



*Основные режимы двухфазного течения в канале вулкана:*

*а — барботирующий; б — дисперсионный. 1 — однородная жидкость; 2 — пузырьковый односкоростной поток; 3 — слева — пузырьковый двухскоростной поток (барботирующий); справа — разрушающаяся пена; 4 — газозвесь. При небольшой скорости подъема магмы на поверхность может поступать разрушающаяся пена, устанавливается экстремальный режим извержения.*

Геологическими и геофизическими данными достаточно надежно подтверждено существование только последнего «этажа» магматической системы — периферического, с выводным каналом, но именно этот «этаж» в основном и определяет механизм извержения. Очаг представляет собой емкость, в которой накапливается магма, а канал — элемент сопротивления, через который емкость разряжается. Свойства текущей по каналу магмы обуславливают нелинейность этого сопротивления, что и приводит к прерывистости вулканической деятельности даже при непрерывной генерации магмы в глубине.

Извержения, как правило, — относительно кратковременные события. Продолжительность интервалов покоя

превосходит суммарную продолжительность действия в среднем в 30 раз для вулканов островных дуг и в 60 раз для остальных<sup>4</sup>, причем статистически установлена прямая связь величины полной энергии извержения с продолжительностью предшествовавшего ему периода покоя. Если же расход вещества усреднять на интервалах, включающих несколько событий, он оказывается практически неизменным.

Последний факт легко объяснить постоянством подпитки очага из более глубоких частей магматической системы, и тогда эта подпитка приблизительно в те же 30, 60 или более раз должна быть меньше расхода при извержении. В это время поступлением в очаг вещества и энергии в первом приближении можно пренебречь. Расчеты показывают, что пренебречь можно и тепло- и массообменом через стенки и рассматривать в качестве системы «извергающийся вулкан» систему очаг—канал, изолированную со всех сторон, кроме выхода из канала в атмосферу.

Вначале в очаге имеется некоторое избыточное давление, которое постепенно падает. Соотношение геометрических размеров очага и канала и времени протекания процессов извержения позволяет свести задачу к описанию квазистационарного течения магмы по каналу под действием медленно меняющегося перепада давления. Более того, можно пренебречь и изменением температуры магмы вдоль канала. Оказалось, что столь простой модели достаточно для описания почти всего разнообразия режимов извержения.

#### СТРУКТУРА ПОТОКА И ОСНОВНЫЕ РЕЖИМЫ ИЗВЕРЖЕНИЯ

Во время активности вулкана, начиная с некоторого уровня, по

<sup>4</sup> Simkin T., Siebert L. Explosive Eruptions in Space and Time: Duration, Intervals, and a Comparison of the World's active belts. // Explosive volcanism: Inception, Evolution and Hazards. Washington D.C., 1984. P.110—121.

каналу движется двухфазный газожидкостный поток, в котором постепенно увеличивается объемная и расходная доля газа. Такие потоки хорошо изучены в технике, особенно пароводяные смеси. Газовая фаза появляется в виде отдельных пузырьков, т.е. возникает пузырьковый режим течения, который по мере увеличения объемного расхода газа сменяется пробковым или снарядным, а затем дисперсным, когда поток представляет собой взвесь капелек жидкости в газе.

В вулканическом канале такая классическая схема далеко не всегда может осуществиться. Причина — в характерных особенностях системы: высокой вязкости жидкости, возрастающей по мере дегазации; значительной вертикальной протяженности канала (многие километры); низкой массовой доли летучего компонента (несколько процентов); большого количества центров зародышей газовых пузырьков.

Классическая смена режимов течения характерна только для самых жидких базальтовых и андезитобазальтовых магм, причем, и там до дисперсного режима, как правило, дело не доходит, ибо такие магмы обычно содержат около 1 мас.% летучих.

Вулканам присуща другая последовательность режимов. Пузырьки газа вырастают до состояния, близкого к «плотной упаковке», без объединения друг с другом, и пузырьковый поток переходит в новое качество — пену, которая при дальнейшем увеличении объемного расхода газа разрушается с образованием газозвеси. Частицы силикатной пены, выносимые потоком газа, и представляют собой пирокластическую — вулканический пепел, лапилли и бомбы.

Очень важно, как осуществляется распад пены и переход к газопирокластическому потоку в стационарном режиме. Многие вулканологи полагают, что такой переход происходит мгновенно, так как разрушению предшествует значительное повышение давле-

ния в пузырьках<sup>5</sup>. Причину этого они видели в торможении роста пузырька, связанном с необходимостью «проталкивать» очень вязкий расплав через все утончающиеся межпузырьковые перегородки. Однако, как мне удалось показать, растущий пузырек в этой ситуации деформирует вокруг себя не жидкость в тонком жестком зазоре, а пену, сопротивление которой уже не растёт, а снижается с утоньшением перегородок<sup>6</sup>. (Кстати, о необходимости рассматривать силикатную пену как «новую фазу» впервые упомянул еще Грейтон, но его совет был надолго забыт.)

В этом случае избыточное давление в пузырьках становится небольшим, и, как правило, сразу после распада пены скорость освободившегося газа недостаточна для отрыва соприкасающихся частиц друг от друга и поддержания их в состоянии газозвеси. Разрушение оказывается неполным. Возникает некая движущаяся масса, пронизанная системой соединяющихся пор и каналов, по которым с опережающей скоростью движется газ. При дальнейшем росте объемного расхода газа эта структура — разрушающаяся пена — переходит в газозвесь. В пользу существования такой достаточно протяженной переходной зоны говорит широкий спектр размеров пирокластических частиц. Мгновенное же разрушение пены порождает лишь тонкий пепел, состоящий преимущественно из «скорлупок» (остатков межпузырьковых перегородок), так как большое избыточное давление должно разрушать все пузырьки. Еще одно доказательство — структура пор в крупных кусках пирокластики (пемзы), которые почти все соединены друг с другом и образуют связный лабиринт<sup>7</sup>.

Выше были описаны возможные структуры потока и последователь-

<sup>5</sup> Sparks R. S. J. // J. of Volcanol. and Geotherm. Res. 1978. № 3. P.1—37.

<sup>6</sup> Слезин Ю.Б. // Вулканология и сейсмология. 1980. № 2. С.56—66; 1995. № 4—5. С.76—84.

<sup>7</sup> Witham A.G., Sparks R.S.J. // Bull. Volcanol. 1986. V.48. P.209—223.

ность их образования в канале. Характер же наблюдаемого извержения определяется структурой потока на выходе из канала. Здесь возможны три варианта. Первый режим я назвал барботирующим. При нем непрерывной фазой является жидкость, дисперсной — газ (жидкость с пузырьками газа). При реальных содержаниях летучих в магмах он возможен только при удалении избытка газа всплывающими с опережением пузырьками. Второй — дисперсионным, при котором непрерывная фаза — газ, дисперсная — газозвесь. Третий — режимом разрушающейся пены, или экструзивным с двумя непрерывными фазами. Он устанавливается только при медленном выдавливании вязкой магмы.

Барботирующий режим характерен для всех эффузивных (лавовых) извержений и для эксплозивных (с ритмической последовательностью взрывов). Дисперсионный — для извержений пепловых и пирокластических потоков любой мощности.

Какие же критерии определяют возможность и необходимость становления того или иного режима? Первым серьезно занялся этой проблемой Дж. Ферхуген, который последователь-

но рассмотрел процесс дегазации поднимающейся магмы<sup>8</sup>.

Условием пеплообразования он считал достижение растущими пузырьками «плотной упаковки», которая возможна, если скорость роста пузырька превышает скорость его всплывания. Первая скорость, по Ферхугену, определялась величиной коэффициента диффузии летучего компонента, а вторая — вязкостью расплава. Применяя в этом случае соотношение Стокса—Эйнштейна, связывающее коэффициент диффузии с вязкостью, он исключил эти параметры из конечного выражения и пришел к парадоксальному выводу, что возможность пеплообразования определяется только количеством пузырьков в единице объема ( $n$ ).

Позже мы показали, что в основу вывода критерия Ферхугеном было положено сравнение не скоростей, а конечных расстояний между пузырьками и расстоянием, которое пузырек способен пройти до всплытия<sup>9</sup>. Кроме того, в канале вулкана скорость роста пузырька должна в основном определяться не коэффициентом диффузии, а скоростью подъема магмы, обеспечивающего снижение давления. В итоге был получен критерий, зависящий от пяти параметров:

$$Di = U\eta n^{1/3} a^2 / c_0^2 = \frac{U\xi}{c_0^2}, \quad \xi = \eta n^{1/3} a^2. \quad (1)$$

Здесь  $U$  — скорость подъема магмы без пузырьков;  $\eta$  — вязкость;  $n$  — число зародышей пузырьков в единице объема магмы;  $c_0$  — массовая доля летучих в магме;  $a$  — коэффициент (в приближенном выражении) для зависимости растворимости летучего компонента в расплаве от давления. Три параметра, произведение которых обозначено  $\xi$ , одинаковым образом зависят от типа магмы, монотонно увеличиваясь при переходе от основных магм к кислым. Величина  $\xi$ , имеющая размерность, обратную скорости, воз-



*Зависимость критической скорости от содержания летучих. Границы режимов извержения для разных типов магм показаны кривыми. Ниже каждой кривой — область барботирующего режима, выше — дисперсионного или экструзивного. Числа у кривых —  $lg\xi$ . Значения -1 и -2 соответствуют кислым магмам, 5 — основным. Область барботирующего режима обширна для базальтовых (основных) магм и мала для кислых.*

<sup>8</sup> Verhoogen J. // Am. J. Sci. 1951. V. 249. № 10. P.729—739.

<sup>9</sup> Слезин Ю.Б. // Вулканология и сейсмология. 1979. № 3. С.69—76; 1995. № 2. С.72—82.

растает примерно от  $10^{-5}$  до  $10^{-1}$  с/м при переходе от базальтов к риолитам и может считаться обобщенной характеристикой типа магмы.

Величина критерия  $Di$  определяет режим извержения: при  $Di \leq Di_{cr}$  ( $Di_{cr} = 0.05$ ) устанавливается барботирующий режим, в противоположном случае — дисперсионный или экструзивный. Подставив в выражение для  $Di$  его критическое значение и задав величину  $\xi$ , получим уравнение для границы между режимами в координатах  $U - c_0$  и условие существования барботирующего режима, выраженное через скорость подъема магмы  $U$ :

$$U_{cr} = \frac{Di_{cr} c_0^2}{\xi}, \quad U < U_{cr}. \quad (2)$$

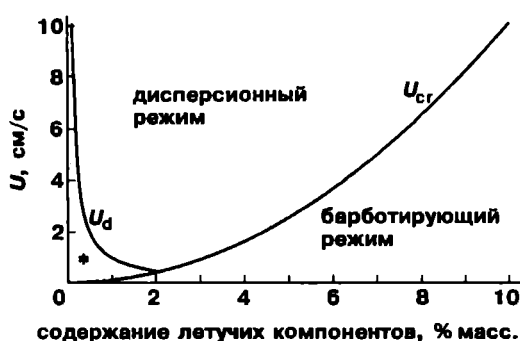
Граница между дисперсионным и экструзивным режимами определяется критической величиной скорости газа, необходимой для «оживления» пирокластических частиц (т.е. перехода в газовзвесь). Скорость газа пропорциональна массовой доле летучего компонента  $c_0$  и скорости подъема магмы  $U$ , а ее критическое значение, необходимое для «псевдооживления», зависит еще и от размера частиц  $d_p$ . Можно получить выражение для критической скорости подъема магмы  $U_d$ , соответствующей границе дисперсионного и экструзивного режимов, и условие осуществления экструзивного режима, выраженное через эту скорость:

$$U_d = \frac{\delta_0 k(\delta_0) \sqrt{48 \rho_{га} d_p}}{c_0 3 \rho_p}, \quad U < U_d. \quad (3)$$

где  $\rho_{га}$  и  $\rho_p$  — плотности газа и частиц соответственно;  $\delta_0$  — объемная доля свободного газа в начале оживления;  $k(\delta_0)$  — коэффициент, учитывающий влияние плотности частиц на коэффициент сопротивления. (Выражение для  $U_d$  в (3) получено без учета слипания частиц.)

**ДИСПЕРСИОННЫЙ РЕЖИМ  
И ПРИРОДА КАТАСТРОФИЧЕСКИХ  
ЭКСПЛОЗИВНЫХ ИЗВЕРЖЕНИЙ**

Дисперсионный (газоридрокластический) режим наиболее сложен и



содержание летучих компонентов, % масс.

«Карта» трех основных режимов течения. При  $U < U_{cr}$  устанавливается барботирующий режим; при  $U > U_{cr}$ ,  $U > U_d$  — дисперсионный; при  $U > U_{cr}$ ,  $U < U_d$  — экструзивный (показан звездочкой).

интересен. При нем в системе присутствуют все структуры потока и происходят самые мощные и опасные катастрофические взрывные, или «плинианские» извержения (названные так по имени Плиния Младшего, давшего классическое описание подобного извержения Везувия в 79 г.). При плинианском извержении может быть выброшено от 1 до 1000 км<sup>3</sup> конденсированного вещества и даже больше (вулкан Тоба 75 000 лет назад) со средней интенсивностью выноса порядка 100 000 м<sup>3</sup>/с. В историческое время крупнейшим было извержение вулкана Тамбора 1815 г. (свыше 100 км<sup>3</sup>), которое уничтожило все живое на о.Сумбава и привело к гибели 90 тыс. человек.

Первоначально такие извержения интерпретировались как взрывы. Предполагалось, что при извержении реализуется энергия сжатого газа, накопленного в близповерхностном резервуаре, как в паровом котле. Однако в этом случае извержение должно начинаться резко, с максимальной интенсивностью, которая бы к концу монотонно спадала. На самом деле это не так. Многие катастрофические события начинаются как весьма умеренные. Вулкан Безымянный извергал бомбы и пепел целых пять месяцев прежде чем произошел пароксизмальный «взрыв»<sup>10</sup>,

<sup>10</sup> Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. Вулкан Безымянный // Природа. 1998. № 3. С.35–38.

Кракатау перед катастрофой был активен три месяца, а Тамбора — три года. И еще одна особенность, плохо увязывающаяся с моделью «парового котла»: пароксизмальная фаза оканчивается резко, но непосредственно за ней часто следует не полный покой, а опять-таки умеренное извержение — выдавливание экструзивного купола.

Посмотрим, как можно объяснить все это в рамках предлагаемой квазистационарной модели.

Поток магмы в канале вулкана описывается системой уравнений гидродинамики, которые в изотермическом приближении в несколько условной форме можно записать так:

$$\begin{aligned} (\rho u)_{nv} &= \text{const}, \\ (\rho u)_v &= \text{const}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$dp = dp_{st} + dp_u + dp_d; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \rho_g &= \rho_g(p), \\ \rho_l &= \rho_l(p), \\ \rho &= \rho(p, \rho_g, \rho_l) \end{aligned} \quad (6)$$

$$c = ap^\gamma \text{ при } p < \frac{c_0^2}{a^2}, \quad (7)$$

$$c = c_0 \text{ при } p \geq \frac{c_0^2}{a^2},$$

$$u_g - u_l = F(P_i). \quad (8)$$

Здесь (4) — два уравнения непрерывности (для нелетучего и летучего компонентов); (5) — уравнение импульсов, записанное как сумма приращений потерь давления вдоль канала; (6) — три уравнения состояния (для каждой из двух фаз и для смеси); (7) — закон массообмена между фазами (растворимость летучего компонента в нелетучем); (8) — распределение импульса между фазами ( $P_i$  — различные параметры потока, от которых зависит этот обмен).

Конкретная запись уравнений различна в зонах с разной структурой потока, и приводить ее мы здесь не будем.

Из написанных уравнений лишь одно дифференциальное, которое интегрируется численно. Остальные представляют собой конечные соотношения. В качестве граничных условий

задается давление на обоих концах канала и накладывается требование непрерывности потока на границах зон с разной структурой.

В результате решения задачи можно получить зависимость расхода от параметров системы и ряд характеристик потока вдоль канала.

Для анализа поведения расхода выберем три так называемых основных управляющих параметра: длину канала (глубину очага) —  $H$ ; «проводимость» канала —  $\sigma = b^2/\eta$ , где  $b$  — характерный поперечный размер канала;  $p_{ex}$  — избыточное давление в очаге, равное разности полного давления и гидростатического давления столба магмы без газовой фазы.

Оказалось, что зависимость расхода от любой пары параметров обладает особенностью типа «сборки» (или «сборки Уитни»), которая отображает так называемую стандартную катастрофу двухпараметрических семейств функций<sup>11</sup>.

Проекция сборки на плоскость управляющих параметров имеет вид угла с острием — «точкой сборки», которая характеризуется критическими значениями параметров. Вне угла каждой точке плоскости принадлежит одно значение расхода, внутри — три, соответствующие трем листам изогнутой поверхности. Верхний и нижний лист характеризуются устойчивым состоянием системы, средний — неустойчивым. Изменение значений управляющих параметров описывается движением точки по плоскости. Если изменение параметра проводит изображающую точку через острие параллельно оси сборки, он называется «расщепляющим» и определяет саму возможность неоднозначности решений. Параметр, проводящий изображающую точку перпендикулярно оси сборки, называется «нормальным». При его изменении пересечение границы сборки — «сепаратрисы катастрофы» — приводит к скачку системы из одного устойчивого состояния в другое.

<sup>11</sup> Арнольд В.И. Теория катастроф // Природа. 1979. № 10. С.54–63.

Анализ конкретных зависимостей показал, что ни в одной паре параметров нельзя в строгом смысле один из них считать расщепляющим, а другой — нормальным (ось сборки в области острия не параллельна ни одной из осей координат). Однако условно такое подразделение провести можно. Так, при неизменном давлении в очаге расщепляющим параметром можно считать глубину очага, которая, как правило, остается практически неизменной на значительных этапах извержения. Неоднозначность и скачки расхода возможны только при глубине очага меньше критической. Последняя при этом зависит практически только от содержания летучего компонента, причем линейно:

$$H_{cr}(\text{км}) = 360(c-0.01). \quad (9)$$

Критическая глубина очага должна составлять 1—10 км для базальтовых вулканов, которым свойственно содержание летучих в пределах 1—3%, и 10—20 км для кислых, где содержание летучих обычно составляет 4—6%. Реальные глубины очагов базальтовых вулканов обычно значительно больше 10 км, а кислых — меньше этой величины. Поэтому скачкообразные изменения расхода с катастрофическим его возрастанием и резким спадом должны быть свойственны только кислым вулканам. Это и наблюдается в действительности.

Амплитуда скачка расхода тем больше, чем больше разница между реальной глубиной очага и ее критическим значением. Неравномерный рост расхода может достигать трех порядков при неизменной геометрии канала и более, если выход из канала в процессе извержения превращается в расширяющееся сопло. Такой скачок практически может выглядеть, как неожиданный взрыв. Скачок вниз в конце превышает по амплитуде скачок вверх, и результатом его может быть полное прекращение активности вулкана.

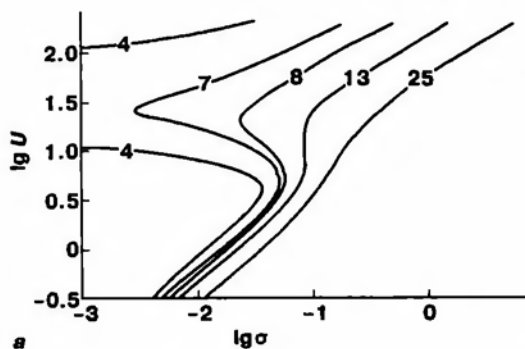
Физический механизм неустойчивости расхода связан с особенностями структуры потока магмы в канале. Расход определяется соотношением движу-

щего перепада давления (равного разности полного и гидростатического перепада) и трением. Как гидростатический перепад, так и трение очень сильно зависят от относительной протяженности зоны газозвеси, в которой они на несколько порядков меньше, чем в зонах с жидкостным течением.

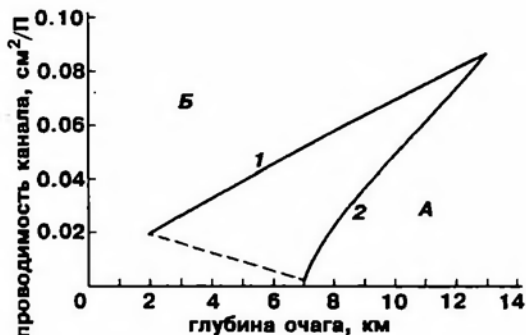
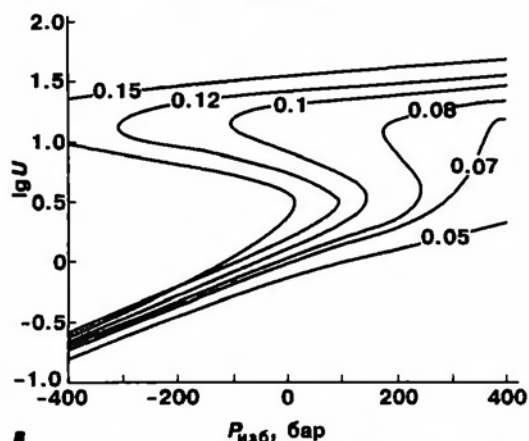
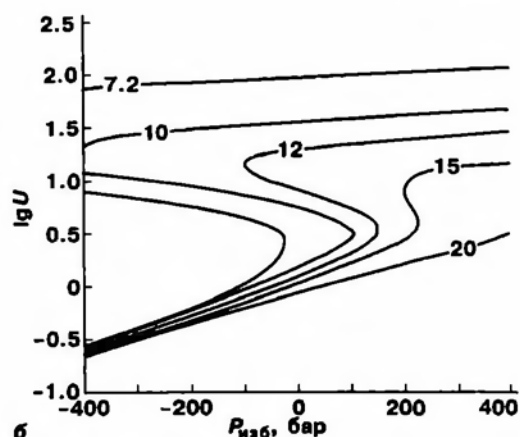
Увеличение расхода приводит к росту скорости потока и тем самым пропорционально увеличивает трение во всех зонах, что приводит к росту общего сопротивления. Но одновременно увеличивается относительная протяженность зоны газозвеси и уменьшается средняя плотность вещества в ней, что уменьшает общее сопротивление и увеличивает движущий перепад давления. При определенных условиях второй эффект преобладает над первым, и любая положительная флуктуация расхода приводит к катастрофическому его росту. Новое устойчивое состояние возникает, когда полное сопротивление трению в зоне газозвеси становится соизмеримым с сопротивлением в жидкостной зоне, или поток «запирается» в результате достижения критической скорости. Точно так же небольшое снижение расхода при определенных условиях может привести к катастрофическому сокращению зоны газозвеси до нуля и переходу в экструзивный режим или к полной остановке активности.

Стандартный сценарий развития извержения вулкана с глубиной очага меньше критической выглядит так. Во время покоя канал частично «замерзает», определенная часть его отмирает полностью. В начале извержения она возникает заново. В это время проводимость канала мала и мал расход — точка, изображающая состояние системы, находится на нижней ветви одной из S-образных кривых рисунка зависимости расхода от основных управляющих параметров (а). Дегазация магмы с дискретными взрывами, поступление из глубины более горячих ее порций, прогрев и эрозия стенок канала приводят к быстрому росту его проводимости. Изображающая точка подходит к точке поворота кривой (к линии





Зависимости скорости течения ( $U$ ) при разных значениях основных управляющих параметров: а — от проводимости канала ( $\sigma$ ) при значении  $P_{изб}=200$  бар; б, в — от избыточного давления ( $P_{изб}$ ): при  $\sigma=0.1$  (б), при  $H_0=12$  км (в). На рис. а и б числа у кривых — глубина, в км. На рис. в — проводимость, в  $см^2/П$ .



Проекция трехмерной «сборки», соответствующей семейству кривых предыдущего рисунка (а), на плоскость управляющих параметров. А, Б — области существования только «нижнего» и «верхнего» режимов, соответственно. При пересечении линий происходит скачкообразное изменение режимов.

правой «складки») и сскакивает на верхнюю ветвь. Интенсивность резко возрастает — возникает катастрофический плинианский режим.

Дальше, в течение некоторого времени, еще возможен медленный рост расхода, а затем проводимость канала стабилизируется, начинает превалировать эффект снижения давления, и изменение расхода описывается движением изображающей точки влево вдоль верхней ветви соответствующей кривой рисунка (б), вплоть до ее сскакивания на нижнюю ветвь.

Это, естественно, идеальная картина, однако внешние помехи искажают ее, по-видимому, не очень сильно. Отметим часто наблюдаемый эффект «спусковых крючков», провоцирующих начало катастрофической стадии. Наиболее известный и эффектный из них — обрушение постройки вулкана и последующий взрыв<sup>12</sup>. Вся последова-

<sup>12</sup> Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. Гигантские обвалы на вулканах // Природа. 1997. № 11. С.70—81.

тельность событий впервые была четко прослежена на вулкане Сент-Хеленс в 1980 г. Во время умеренной стадии извержения началось внедрение в тело вулканической постройки близповерхностной интрузии — «криптокупола», — деформировавшей эту постройку. В конце концов склон потерял устойчивость, и произошёл грандиозный обвал. Резкое снятие нагрузки привело к бурному выделению газа, который раздробил и выбросил с большой скоростью материал криптокупола. Затем началась плинианская стадия, продолжавшаяся девять часов, а через три недели после ее окончания начал выдавливаться экструзивный купол.

Здесь была цепочка из двух «спусковых крючков»: обвал спровоцировал взрыв, а взрыв — плинианскую фазу, так как обвал и взрыв резко укоротили канал и увеличили его проводимость.

«Помочь» переходу в катастрофическую стадию может любой фактор, дающий достаточный эффект уменьшения канала (увеличения движущего перепада давления). Например, на Везувии таким фактором был отток лавы через трещины на боковых склонах конуса. Ссылаясь на Булларда и Перре, И.В.Луцицкий так описывает последовательность событий:

«Уровень лавы в очаге понижается по мере излияния, вследствие чего вершина конуса частично обрушивается. Наконец, когда давление лавовой колонны вследствие излияния уменьшается, происходит мощный газовый выброс (gas blow off), образующий гигантскую эруптивную тучу высотой более 10 км»<sup>13</sup>.

Впервые эту фазу установил Перре (1924) по наблюдениям извержения 1906 г. «В сущности это не эксплозия, не взрыв, а стремительное выделение газовой струи, находящейся под громаднейшим давлением, подобное испусканию паров локомотива. Эта фаза наиболее интенсивного проявле-

ния активности продолжается немногие часы и означает окончание цикла. Затем вулкан приходит в состояние покоя».

Таков довольно точное описание начала и прекращения катастрофического плинианского режима соответствует нашей теории. Кстати, известные характеристики магматической системы Везувия также указывают на необходимость именно полного прекращения извержения без экструзивной фазы, что и наблюдалось.

При большой глубине очага боковой отток магмы по трещинам не может привести к катастрофическому скачку расхода, но может породить паузы в дисперсионном режиме. Такие паузы продолжительностью от минут до нескольких часов наблюдались перед новыми прорывами лавы на Толбачинском извержении в 1975 г. и соответствовали толчкообразному раскрытию и заполнению новых трещин в глубине.

В заключение хочется подчеркнуть два момента. Первый — это возможность прогноза вулканических катастроф на основе сведений о состоянии магматической системы в данный момент, что представляет собой принципиальный шаг вперед по сравнению с прогнозом путем экстраполяции. И второй — универсальность поведения динамических систем. Ограниченный набор устойчивых квазистационарных состояний и скачки из одного в другое при плавном изменении управляющих параметров свойственны вулканам так же, как звездам, популяциям живых существ и экономике. Здесь опять проявляется «универсальная гармония мира», которую основоположник теории динамических систем Анри Пуанкаре считал «единственной настоящей объективной реальностью и источником всякой красоты».

**Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 96-05-64179.**

<sup>13</sup> Луцицкий И.В. Основы палеовулканологии. М., 1971. Т.1.