Доклады Академии наук СССР
1976. Том 229, № 2

УДК 552.11

*ПЕТРОГРАФИЯ*

В. А. ДРОЗНИН, Т. М. ФИЛОСОФОВА

# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИВНОСТЬ КРИСТАЛЛИЧНОСТИ ПРОДУКТОВ ИЗВЕРЖЕНИЯ

*(Представлено академиком Д. С. Коржинским 24 II 1976)*

Вещественный состав продуктов извержения несет информацию о термодинамических условиях в канале вулкана и его магматическом очаге. Определение значений температур и давлений производится по изучению минеральных парагенезисов, выявляемых в изверженной породе.

Затвердевшие продукты извержения состоят из смеси вкрапленников, микролитов и стекла. При минералогических подсчетах стекло с мелкими микролитами представляет основную массу, крупные микролиты относятся к кристаллической фазе. Советскими вулканологами установлен факт изменения степени кристалличности (объемной доли кристаллической фазы) в ходе извержения (рис. 1) ([1–5]).

В настоящей работе предлагается метод расчета термодинамических условий в канале вулкана на основе изучения кристалличности продуктов извержения.

Процесс, происходящий в канале вулкана во время извержения, аналогичен процессу вспенивания газированной жидкости при снятии нагрузки ([6]). Впервые Грейтон ([7]) обратил внимание на то, что наличие летучих в расплаве позволяет рассчитать изменение термодинамических условий с глубиной. Невозможность практической реализации такого подхода обусловлена прежде всего обособлением в приповерхностной зоне мест выхода лавы и газа. Кроме того, для большинства типов извержений не удается измерить температуру продуктов извержения при входе в атмосферу.

Вещество изверженных пород имеет примечательное свойство затвердевать при быстром охлаждении с образованием стекла, при медленном — с образованием кристаллов, что позволяет определять по степени кристалличности значение температуры, при которой происходит прекращение роста кристаллов. Предлагается характеризовать указанное свойство значением предельной скорости падения температуры $(\partial T/\partial t)_{\text{opt}}$, т. е. такого изменения температуры, при котором еще происходит рост кристаллов, находящихся в физико-химическом равновесии с расплавом. Соответственно, при значительно большей скорости падения температуры кристаллы в расплаве не образуются. Значение параметров, при которых достигается предельная равновесная скорость падения температуры, будем называть равновесными. Тогда уравнение связи степени кристалличности $n$ и равновесной температуры $T_{\text{р}}$ на основе данных экспериментов по плавлению горных пород ([11]) можно представить в виде

$$n=\psi\frac{T_L-T_{\text{р}}}{T_L-T_S},$$

где $T_L$ — температура ликвидуса, $T_S$ — температура солидуса.

Пусть до начала извержения в канале, имеющем площадь поперечного сечения $S$, находится газированный расплав, содержащий кристаллы. Обозначим давление на кровле расплава через $\Delta P$, степень кристалличности $n_0$, весовую долю летучих в свободной фазе или газосодержание $x$, весовую долю растворенных летучих или газонасыщенность $\varphi$. При снятии

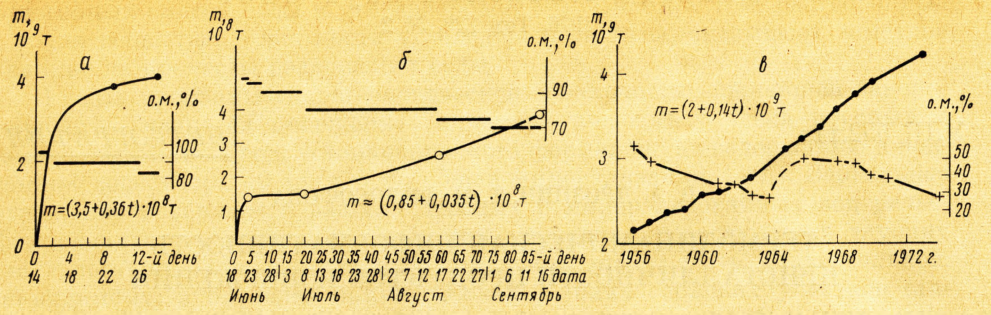



Рис. 1. Рост массы продукции и изменение процентного содержания основной массы в ходе извержения вулканов. *а* – Тятя, 1974 г.; *б* – Алаид, прорыв Олимпийский, 1972 г.; *в* – Безымянный

противодавления $\Delta P$ газ, находящийся в свободной фазе, должен расшириться, в результате произойдет увеличение объема колонны расплава и, как следствие, излив на дневную поверхность. Давление в слое, достигающем уровня, где давление равно $P_{вых}$, в момент $t_0$, когда масса продукции равна $M$, можно записать через параметр $m(t)$ — рост массы продукции в виде

$$P=P_{вых}+\frac{\dot{M}}{S}-\frac{m}{S}$$

при начальном давлении в этом слое

$$P_0=\Delta P+\frac{M}{S}.$$

Вслед за Грейтоном будем считать, что течение адиабатическое, фазы находятся в температурном равновесии. Тепловые эффекты эндотермических (выход летучих в свободную фазу) и экзотермических (кристаллизация, теплота вязкого трения и пр.) реакций учтем введением эффективной величины теплоемкости расплава $C$. Связь температуры и давления в слое расплава может быть записана в виде

$$T=T_0(P/P_0)^{(K-1)/K}.$$

Показатель адиабаты для псевдогаза, как это рекомендуется в работе [8], при малых значениях газосодержания $x\ll 1$ определяется выражением

$$\frac{K-1}{K}\simeq\frac{xR}{\mu C}$$

где $R$ — универсальная газовая постоянная, $\mu$ — молекулярный вес летучих. Скорость падения температуры задается выражением

$$\frac{\partial T}{\partial t}=T_0\frac{K-1}{K}\left(\frac{P_0}{P}\right)^{1/K}\frac{1}{P_0}\frac{\partial P}{\partial t}+T_0\left(\frac{P}{P_0}\right)^{(K-1)/K}\frac{1}{K^2}\frac{\partial K}{\partial t}$$

Приближенное решение в аналитическом виде получим, обозначая давление на уровне, где прекращается спутное движение газа и расплава, $P_{вых}$ и полагая, что:

1) рост массы продукции можно аппроксимировать линейной функцией времени $m=m_0+\alpha t$;

2) газосодержание в поднимающемся слое расплава не меняется во времени;

3) степень кристалличности — линейная функция величины охлаждения $\psi=1$;

4) площадь сечения подводящего канала не меняется с глубиной;

5) степень охлаждения $\Delta T$ расплава от начальной $T_0$ до равновесной $T_р$ температуры такова, что $\Delta T/T_0\ll 1$.

Тогда

$$n=n_0+\frac{T_L-n(T_L-T_S)}{T_L-T_S}(K-1)\left\{\ln\frac{-(\partial T/\partial t)_{\text{opt}}}{[(K-1)/K][T_L-n_0(T_L-T_S)]}+\right.$$
$$\left.+\ln\frac{\Delta PS+M}{\alpha-(\partial P_{\text{вых}}/\partial t)}\right\}. \qquad (1)$$

На рис. 2 приведена зависимость степени кристалличности от логарифма массы продукции (для вулкана Безымянного от логарифма начального давления при $\Delta PS=0{,}75\cdot10^9$ т). В табл. 1 приведены расчетные значения предельной равновесной скорости падения температур и молекулярного веса летучих при условии, что $T_0=1200°$ С, $T_L-T_S=200°$, $n_0=0$, $\partial P_{\text{вых}}/\partial t \ll \alpha$, эффективная теплоемкость расплава $C=0{,}3$ кал/г·град.

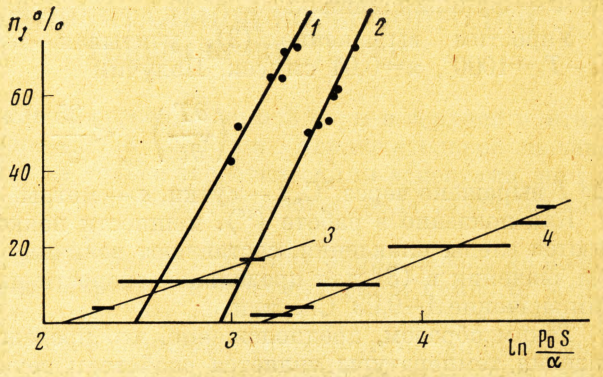



Рис. 2. Зависимость степени кристалличности от логарифма массы продукции для извержения вулканов. *1* – Безымянный, 1956–1963 гг.; *2* – Безымянный, 1963–1974 гг.; *3* – Алаид (прорыв Олимпийский), 1972 г.; *4* – Тятя, 1974 г.

По значению молекулярного веса летучих можно говорить о существенной доле водорода. Значения предельной скорости падения температуры совпадают по порядку величины с используемыми в экспериментах по плавлению горных пород, когда при точности 5° для достижения равновесия расплав — кристаллы образцы выдерживаются вблизи солидуса 25–30 дней, а в области, близкой к ликвидусу, 1–2 дня.

Значение предельной скорости падения температуры можно также получить, решая задачу о плавлении вмещающих пород интрузивным телом с образованием витрифицированных пород. Расчет изменения температуры во вмещающей породе, вызванного охлаждением дайки мощностью $2a$,

Таблица 1

Значение предельной равновесной скорости падения температуры и молекулярного веса летучих

| Вулкан | Годы | $(\partial T/\partial t)_{\text{opt}}$, °С/сутки | $K-1$ | $\varkappa$ | $\mu$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Безымянный | 1956–1963 | 0,042 | 0,15 | 0,04 | 1,8 |
| | 1964–1974 | 0,03 | 0,166 | 0,04 | 1,6 |
| Алаид | 1972 | 1,5 | 0,03 | 0,02 | 4,4 |
| Тятя | 1973 | 4,0 | 0,027 | 0,02 | 5,0 |

в зависимости от безразмерных параметров — времени $F_0=\varkappa t/a^2$ и расстояния до контакта $x/a$, при начальной температуре дайки $T_0$, породы $T_c$ и равенстве теплофизических свойств приведен в работе [9]. Для образования стекла во вмещающей породе необходимо, чтобы температура поднялась выше температуры солидуса $T_s$, а скорость понижения температуры была больше равновесной. Температура и скорость охлаждения в любой точке вмещающей породы всегда меньше, чем на контакте. Используя аналитическое выражение для температуры на контакте, легко прийти

к условию для максимальной мощности дайки, когда еще наблюдается стекло:

$$a < \sqrt{\frac{(a/\sqrt{\varkappa t})^{3/2}_{\max}(T_0 - T_c)}{2\sqrt{\pi}(\partial T/\partial t)_{\text{opt}}}}. \qquad (2)$$

Величина $(a/\sqrt{\varkappa t})$ находится из условия:

$$\frac{T_0 - T_c}{2}\Phi\left[\left(\frac{a}{\sqrt{\varkappa t}}\right)_{\max}\right] > T_s - T_c,$$

где Ф — функция ошибок.

Упростим выражение (2), учитывая порядок величин $a/\sqrt{\varkappa t} \approx 1$, $T_0 - T_c = 1000°$, $\varkappa = 0{,}01$ см$^2$/сек. Получим

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{\text{opt}} < \frac{25}{a^2}, \qquad (3)$$

где $T$ выражено через °С, $t$ — сутки, $a$ — метры.

Как показано в работе ([10]), мощности некков, вблизи которых наблюдаются следы плавления, составляют величину $2a = 10$—$60$ м. Подставляя эти значения в (3) для предельной скорости падения температуры, получим значение 1—0,03° С/сутки.

Таким образом, предположение, что предельная равновесная скорость падения температуры является свойством вещества изверженных пород, позволило:

а) построить количественную зависимость степени кристалличности продуктов извержения на выходе от ее начального значения и параметров извержения — роста массы продуцируемого материала, газосодержания, начального противодавления, геометрии подводящего канала и значения давления на уровне прекращения спутного движения расплава и летучих; зависимость доведена до аналитического выражения при указанных в работе приближениях;

б) дать количественную формулировку условия сохранения следов плавления вмещающих пород интрузивными телами.

На основе полученных соотношений удалось провести анализ имеющихся данных по кристалличности продуктов извержений вулканов Безымянный, Алаид, Тятя и данных по следам плавления вмещающих пород интрузивными телами, показавший, что:

а) предельная равновесная скорость падения температуры в области солидус — ликвидус составляет величину порядка 0,03—5° С/сутки;

б) доля водорода в составе изверженного газа — на основании значений молекулярного веса летучих достаточно существенна.

Авторы благодарны А. П. Хренову за предоставление материалов по извержению вулканов Алаид и Тятя.

Институт вулканологии
Дальневосточного научного центра Академии наук СССР
Петропавловск-Камчатский

Поступило
4 II 1976

ЛИТЕРАТУРА

[1] *Г. П. Авдейко и др.*, Бюлл. вулканол. станции, № 50, 64 (1974). [2] *И. Т. Кирсанов, А. А. Важиевская*, В сб.: Вулканизм и глубина Земли, М., «Недра», 1971, стр. 157. [3] *Г. Е. Богоявленская*, В сб.: Геодинамика вулканизма и гидротермального процесса, Петропавловск-Камчатский, 1974, стр. 121. [4] *Ю. М. Дубик, О. Н. Волынец*, Бюлл. вулканол. станции, № 48, 64 (1972). [5] *А. П. Хренов*, В сб.: Геодинамика вулканизма и гидротермального процесса, Петропавловск-Камчатский, 1974, стр. 172. [6] *В. А. Дрознин*, там же, 1974, стр. 167. [7] *Л. К. Грейтон*, Предположения о вулканическом тепле, М., ИЛ, 1949. [8] *Г. Б. Уоллис*, Одномерные двухфазные течения, М., «Мир», 1972. [9] *Г. Карслоу, Д. Егер*, Теплопроводность твердых тел, М., «Наука», 1964. [10] *О. Н. Волынец*, В сб.: Кислый вулканизм, Новосибирск, «Наука», 1972, стр. 151. [11] *A. J. Piwinskii, R. J. Wylle*, J. Geol., v. 76, № 2, 205 (1968); J. Geol., v. 78, № 1, 52 (1970).