

Г. С. ШТЕЙНБЕРГ

О ВЗРЫВНОМ ОБРАЗОВАНИИ КАЛЬДЕР

(Представлено академиком М. А. Садовским 8 VI 1971)

В настоящее время термин кальдера, по существу, является морфологическим, а не генетическим и практически охватывает все отрицательные вулканические формы, занимающие промежуточное положение между кратерами и вулканом-тектоническими депрессиями. В вулканологической литературе приходится встречаться с кальдерами обрушения, эксплозивными, эрозийными и др. (¹, ⁹, ¹¹). Однако механизм образования кальдер неясен, и определения, указывающие на генезис, следует воспринимать как предположительные.

Учитывая, что пространственно с кальдерами связаны отложения огромных масс пемз и игнимбритов, в ряде работ (¹⁰⁻¹²) высказывается предположение о преимущественно эксплозивном (взрывном) генезисе кальдер. Представляется целесообразным рассмотреть вопрос о взрывном образовании кальдер, используя хорошо разработанную, экспериментально обоснованную теорию взрыва на выброс.

Рассматривая кальдеру как воронку взрыва, мы в большинстве случаев имеем только один параметр, характеризующий ее радиус. В некоторых случаях по результатам гравиметрических работ (⁴, ¹⁰⁻¹²) можно оценить дефект масс, а по геологическим наблюдениям — площадь распространения взрывных отложений и их объем.

Таблица 1

	По (⁶)	По (⁷)	Оценка автора
Энергия, эрг	$1,2 \cdot 10^{24}$	$0,8 \cdot 10^{24}$	$1,0 \cdot 10^{24}$
Глубина кратера, м	600	500	—
Глубина центра взрыва, м	—	—	700

Характерные размеры взрывной воронки определяются параметрами источника взрыва и среды, в которой взрыв происходит, и в общем виде записываются (⁵):

$$\frac{R}{W} = F \left(\frac{E}{\rho g W^4} ; \frac{E}{\sigma W^3} ; \frac{E}{p_0 W^3} ; \frac{r_0}{W} ; \gamma ; k \right), \quad (1)$$

где R — радиус воронки, W — кратчайшее расстояние от центра взрыва до поверхности (линия наименьшего действия), k — коэффициент внутреннего трения, ρ — плотность пород, σ — прочность пород, p_0 — атмосферное давление, E — энергия взрыва, r_0 — радиус полости, γ — показатель адиабаты.

Как показали работы по моделированию крупных взрывов на выброс (⁵), радиус воронки связан с перечисленными выше параметрами зависимостью:

$$R = W \left(0,6 + \lg \frac{E}{\rho g W^4 + p_0 W^3 + \sigma W^3} \right). \quad (2)$$

Поясняя физический смысл этого выражения, отметим, что $E / \rho g W^4 = E / \rho g W^3 W$ отражает затрату энергий на перемещение выброшенного материала в поле силы тяжести; $E / p_0 W^3 = E p_0 W^2 W$ — энергию на преодоление атмосферного давления и $E / \sigma W^3$ — энергию на разрушение (раздробление) породы. Сопоставление размеров воронок в модельных экспериментах с натурными взрывами на выброс показало хорошую сходимость. Следует отметить, что энергия взрывов в лабораторных экспериментах составляла от 10^5 до 10^8 эрг, а при натурных — от 10^{13} до 10^{18} эрг, т. е. установленная закономерность оказалась справедливой в широком диапазоне энергий.

Уравнение (2) по существу связывает три величины: R , W и E (ρ и σ можно считать известными), из которых обычно известна одна (R). Вследствие этого уравнение (2) может быть решено в параметрическом виде. В качестве параметра целесообразно выбрать величину E . Решение уравнения (2) приведено на рис. 1.

В расчетах принято: $\sigma = 300 \text{ кг/см}^2$, $p_0 = 1 \text{ атм.}$, $\rho = 2,5 \text{ г/см}^3$. На рис. 2 даны зависимости $R_{\max} = f(E)$ при оптимальном W и $W = f(E)$ при $R_{\max}$. Применяя найденное решение, используем принцип наименьшего действия (2), справедливость которого применительно к геологическим процессам доказана (3) и в дан-

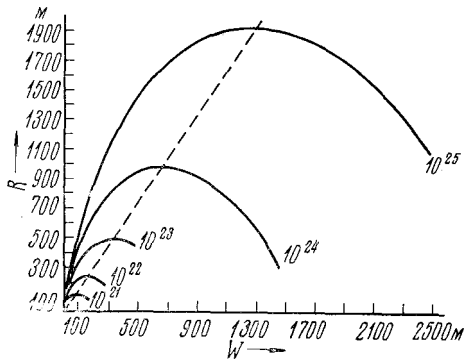


Рис. 1. Параметрическое решение уравнения (2) $p = 1 \text{ атм.}$, $\sigma = 300 \text{ кг/см}^2$

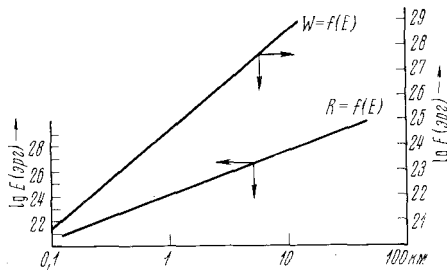


Рис. 2. Зависимости $R = f(E)$ при оптимальном W и $W = f(E)$ при $R_{\max}$

Таблица 2

Объект	Поперечные размеры кальдеры, кратера, км	Радиус, принятый в расчетах, км	Энергия взрыва, эрг	Глубина центра взрыва, км
Курильские острова				
Кальдера Головинна, оз. Кипищее	$0,5 \times 0,4$	0,22	$9 \cdot 10^{21}$	0,15—0,20
Вулкан Менделеева, вершинный кратер	1,4	0,7	$4 \cdot 10^{23}$	0,50—0,55
Кальдера Львиная Пасть	$9 \times 6,5$	3,8	$2 \cdot 10^{26}$	2,0—3,0
Кальдера Тау Русыр	7,5	3,75	$2 \cdot 10^{26}$	2,0—3,0
Кальдера Заварицкого	$3,3 \times 2,7$	1,45	$5 \cdot 10^{24}$	0,75—1,0
Пик Прево	$0,66 \times 0,45$	0,27	$2 \cdot 10^{22}$	0,20—0,25
Вулкан Ушишир	1,6	0,8	$6 \cdot 10^{23}$	0,55—0,60
Вулкан Матуа	$0,25 \times 0,30$	0,13	$2 \cdot 10^{21}$	0,08—0,1
Камчатка				
Вулкан Авача (Сомма)	4,1	2,05	$2 \cdot 10^{25}$	1,0—2,5
Кратер Чаша, Толмачев дол	0,9	0,45	$9 \cdot 10^{23}$	0,50—0,75
	0,4	0,20	$7 \cdot 10^{21}$	0,15—0,20
Маар Валентина, район Карымского вулкана	0,74	0,37	$5 \cdot 10^{22}$	0,25—0,40
Маар Галя, район Кроноцкого вулкана	$1,4 \times 1,1$	0,62	$3 \cdot 10^{23}$	0,30—0,60
Кратер Тая-1, район вулкана Толбачик	0,4	0,4	$5 \cdot 10^{22}$	0,25—0,4

ном случае состоит в получении максимально возможной воронки при заданной энергии взрыва.

Проверим полученное решение на примере вулкана Безымянный (эксплозивное извержение 1956 г.), для которого имеются независимые определения энергии (⁶, ⁷). По графику (рис. 1) находим, что $R = 1000$ м соответствует $E = 1,0 \cdot 10^{24}$ эрг и $W = 700$ м.

Как видно из приведенной табл. 1, сходимость хорошая.

Аналогичным образом найдем, что для мощного эксплозивного извержения вулкана Шивелуч (1964 г.), полагая, что новый кратер ($3,0 \times$

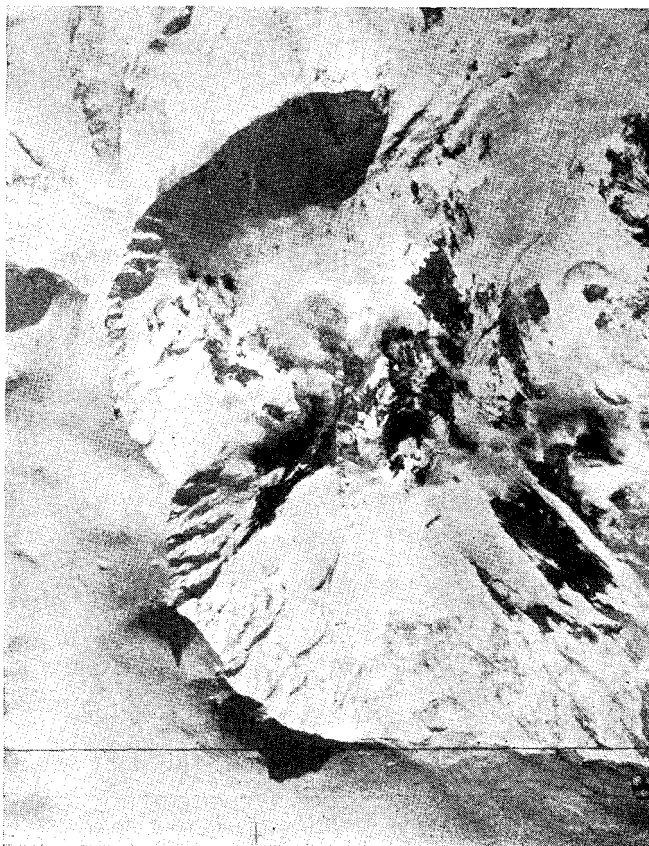


Рис. 3. Взрывной кратер Вулкана Шивелуч, извержения 1964 г. (фото автора)

$\times 1,5$ км) образовался в результате одного взрыва (⁸), энергия взрыва составит $2 \cdot 10^{24}$ эрг, а глубина центра взрыва 700—800 м. Если же считать, что взрывов было два, что судя по конфигурации кратера (рис. 3) представляется более вероятным, энергия взрывов и глубина их центров составят соответственно: $5 \cdot 10^{23}$ эрг и 200—400 м для северного кратера и $3 \cdot 10^{23}$ эрг и 300—700 м для южного. Рассчитанные аналогичным образом параметры, характеризующие эксплозивные формы различных вулканических объектов Камчатки и Курильских островов, приведены в табл. 2.

Рассмотрим некоторые выводы, следующие из решения уравнения (2), применительно к кальдерам. Предварительно необходимо определить диапазон изменений параметра E . В первую очередь оценим верхний предел. Учитывая, что энергия сильнейших землетрясений в земной коре и верхней мантии не превышает 10^{25} — 10^{26} эрг и полагая, что значения энергии,

мгновенно реализуемые при взрывах в верхних горизонтах земной коры, их не превосходят, в качестве максимального значения можно принять $E = 5 \cdot 10^{26}$ эрг.

По графику $W = f(E)$ (рис. 1) находим, что взрывы, которые могут привести к образованию кальдер, происходят на глубинах менее 3,5 км, т. е. в самых верхних горизонтах земной коры. Из рис. 1 видно, что при взрывах мощностью $5 \cdot 10^{26}$ эрг максимальный диаметр воронки не превысит 11 км, т. е. кальдеры диаметром более 11 км взрывным путем образоваться не могли. Соответственно, предположение о взрывном генезисе таких крупных кальдер, как Асо, Куттяро (¹¹) ошибочно. Как видно из рис. 1, для образования кальдер диаметром 20—25 км потребовались бы взрывы мощностью в 10^{28} — 10^{29} эрг, что на 2—3 порядка больше допустимых значений.

Полученные граничные значения ($W \leq 3,5$ км; $D \leq 11$ км) являются верхними оценками, так как предполагается, что центр взрыва располагается на оптимальной глубине. Кроме того, следует отметить, что только в первом приближении вулканический взрыв можно рассматривать как точечный взрыв на выброс. Резкое снижение давления в полости взрыва после взламывания лавовой пробки или пород, залегающих выше полости взрыва, приводит к увеличению рабочей массы (летучих, выделившихся из лавы), т. е. масса «взрывчатого вещества» при вулканическом взрыве — величина переменная, увеличивающаяся в процессе развития взрыва. Соответственно во времени вулканический взрыв заметно растянут по сравнению с химическим или ядерным.

Автор выражает благодарность И. В. Мелекесцеву за представленные данные по взрывным кратерам и кальдерам Курильских островов и М. Г. Сербуленко за помощь в расчетах.

Институт вуканологии
Дальневосточного научного центра Академии наук СССР
Петропавловск-Камчатский

Поступило
28 V 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. И. Влодавец, Изв. АН СССР, сер. геол., № 5 (1944); В. И. Влодавец, Б. И. Пийц, Бюлл. вулканологич. станций, № 25 (1957). ² М. Палек, Сборн. Варшавские принципы механики, 1959. ³ И. Г. Клушин, Зап. Ленингр. горн. инст., 46, в. 2 (1963). ⁴ М. И. Зубин, Б. В. Иванов, Г. С. Штейнберг, Геология и геофизика, № 1 (1971). ⁵ М. А. Садовский, В. В. Адушкин и др., Физика горения и взрыва, № 1 (1967). ⁶ Г. С. Горшков, Г. Е. Богоявленская, Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения 1963—1965, «Наука», 1966. ⁷ Ю. Н. Рябинин, В. П. Родионов, В кн. Вулканизм и глубинное строение Земли, «Наука», 1966. ⁸ Г. С. Горшков, Ю. М. Дубик, В кн. Вулканы и извержения, «Наука», 1969. ⁹ H. Williams, Univ. Calif. Publ. Bull. of the Dept. Geol. Sci., 25, № 6 (1941). ¹⁰ I. Yokoyama, J. Earth., 6, № 2 (1958). ¹¹ I. Yokoyama, Nature, 191, № 4792 (1961). ¹² I. Yokoyama, Structure Calderas and Gravity Anomaly. Intern. Symp. on Volcan. Japan, 1962.