



УДК 550.34 +551.24

А. В. Викулин, Д. Р. Акманова

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский
e-mail: vik@kscnet.ru

Параметры интенсивных вулканических извержений и модель питающих их магматических очагов

В работе на основании анализа параметров, характеризующих извержения вулканов планеты за последние 94 млн лет (диаметров и площадей кальдер и шлаковых конусов больших размеров, объёмов изверженного материала), обосновывается гипотеза о постоянном, независимом от вулканического процесса, «тонком» по толщине магматическом очаге, питающем извержение. Предложена модель такого магматического очага вулкана за счёт перегрева глубинного вещества в результате его пластической деформации в рамках известной в материаловедении концепции «тепловой взрыв».

Введение

Согласно общепринятым моделям магматический очаг представляет собой изолированную камеру, заполненную силикатным расплавом, поступающим из глубин мантии [10, 11]. В этой модели существует ряд противоречий и «внутренних» несогласованностей. Аномальный эффект поглощения сейсмических волн должен соответствовать «зоне тени», которая не должна совсем пропускать через себя поперечные сейсмические волны. На возможно не «жидкое» состояние магматического очага указывают и данные, приведённые в работах [1, 12, 14, 19]. Другие исследователи связывают пониженные значения скоростей с наличием вязкости у вещества в вулканическом очаге [21], в пределах которой располагаются многочисленные очаги землетрясений, непосредственно предвещающих извержение вулкана [13, 22].

Противоречивость данных об очагах и питающих системах извергающихся в настоящее время вулканов вынуждает исследователей искать новые подходы для моделирования и изучения вулканического процесса.

Данные о магматических очагах

За последние десятилетия достижением науки стала разработка блоковой концепции геологической и геофизической сред — геосреды [6, 7]. Имеющиеся волновые представления о сейсмическом процессе, протекающем в блоковой геосреде, могут быть перенесены и на вулканический процесс. Действительно, вулканические пояса Земли, как и сейсмические активные зоны, являются крупнейшими линейными структурами планеты. Для трёх наиболее активных вулканических поясов — Тихоокеанского, Альпийско-Гималайского и Срединно-Атлантического, показано, что миграция вулканической

активности, как и миграция сейсмической и тектонической активности, является проявлением волнового геодинамического процесса. В рамках таких блоковых представлений должны существовать механизмы, которые бы могли обеспечить «взаимодействие» как магматических очагов между собой (миграцию вулканической активности), так и вулканизма, сейсмичности и тектоники [8, 24]. В рамках таких представлений должны существовать механизмы, которые могли бы обеспечить «взаимодействие» как магматических очагов между собой (миграцию вулканической активности), так и вулканизма, сейсмичности и тектоники.

Отражением «блокового характера» вулканического процесса является питающий извержение вулкана магматический очаг (аналог очага землетрясения), о размерах которого в случае достаточно интенсивного извержения вулкана можно судить по образовавшейся на поверхности кальдере — «округлой по форме значительной по площади (в поперечнике до 10–15 км и более) вулканической депрессии с наклонными стенами (высотой до нескольких сот метров и более), образовавшейся в результате извержения» [10, 11].

В работе приведены новые более полные данные о $N = 735$ различных по интенсивности (взрывы, излияния лавы и пеплопады и др.) и типам (гавайский, пелейский, стромболианский и др.) извержениях вулканов планеты, произошедших за последние 94 млн лет (табл. 1), с объёмами изверженного материала $V = 0,3 \div 3000 \text{ км}^3$, площадями $S = 1 \div 4712 \text{ км}^2$ и диаметрами $D = 0,2 \div 150 \text{ км}$ кальдер, собранные различными исследователями.

С использованием данных табл. 1 был проведён анализ распределений чисел вулканических извержений N по объёмам изверженного материала V : $\text{Lg}N = b_v \text{Lg}V + \text{const}_1$ и чисел вулканических

Таблица 1. Параметры извержений вулканов планеты.

№	N	T , лет	D , км	V , км ³	S , км ²	Δh , км
1	513	$94 \cdot 10^6 \div 2000$ г.	$0,6 \div 150$ (14±10)	$0,3 \div 3000$ (316±361)	$0,3 \div 4712$ (201±229)	$0,04 \div 7$ (1,3±0,9)
2	215	$16 \cdot 10^6 \div 2000$ г.	$1,2 \div 50$ (9±5)	$0,6 \div 825$ (77±78)	$1 \div 472$ (78±66)	$0,004 \div 5$ (0,9±0,6)
3	250	$94 \cdot 10^6 \div 1912$ г.	$0,6 \div 110$ (18±13)	$3 \div 3000$ (481±468)	$0,3 \div 4712$ (315±338)	$0,09 \div 7$ (1,6±1,1)
4	122	$7 \cdot 10^6 \div 2000$ г.	$1,5 \div 30$ (9±5)	$0,3 \div 175$ (48±43)	$1,3 \div 471$ (77±78)	$0,004 \div 5$ (0,9±0,7)
5	101	$6 \cdot 10^6 \div 1888$ г.	$1,5 \div 31$ (9±6)	$0,3 \div 175$ (35±37)	$1,3 \div 735$ (91±94)	$0,004 \div 1,6$ (0,4±0,3)
6	106	$16 \cdot 10^6 \div 1964$ г.	$1,5 \div 50$ (10±6)	$0,8 \div 825$ (103±99)	$1,8 \div 450$ (67±59)	$0,2 \div 5$ (1,2±0,7)
7	56	$0,1 \cdot 10^6 \div 1957$ г.	$1,5 \div 31$ (8±5)	$10 \div 170$ (66±47)	$2,4 \div 735$ (72±69)	$0,13 \div 5$ (1,7±0,9)
8	84	$16 \cdot 10^6 \div 1964$ г.	$1,5 \div 50$ (11±7)	$0,8 \div 825$ (114±120)	$2 \div 735$ (82±72)	$0,13 \div 2,6$ (0,9±0,5)
9	154	$94 \cdot 10^6 \div 1912$ г.	$1 \div 110$ (19±11)	$3 \div 3000$ (508±446)	$2 \div 4712$ (414±430)	$0,01 \div 6$ (1,7±1,2)
10	29	$46 \cdot 10^6 \div 260$ г.	$0,6 \div 20$ (9±5)	$25 \div 150$ (85±52)	$0,3 \div 314$ (82±66)	$1 \div 1,2$ (0,9±0,01)
11	55	$25 \cdot 10^6 \div 0,003 \cdot 10^6$	$2 \div 60$ (13±9)	$2,8 \div 2541$ (557±733)	$3 \div 1649$ (198±211)	$0,1 \div 2,8$ (0,9±0,8)
12	84	$46 \cdot 10^6 \div 260$ г.	$0,6 \div 60$ (14±9)	$2,8 \div 2541$ (388±544)	$0,3 \div 1649$ (157±166)	$0,1 \div 2,8$ (0,9±0,5)
13	7	$0,03 \cdot 10^6 \div 0,01 \cdot 10^6$	$6 \div 10$ (7±1)	нет	$28 \div 79$ (42±15)	нет
14	57	$5 \cdot 10^6 \div 1452$ г.	$1 \div 150$ (12±7)	$17 \div 175$ (93±58)	$1 \div 3533$ (193±232)	$0,03 \div 1,4$ (0,5±0,4)
15	58	$12 \cdot 10^6 \div 1991$ г.	$1,5 \div 100$ (10±7)	$18 \div 2000$ (339±534)	$2 \div 2000$ (135±143)	$0,46 \div 5,4$ (1,4±1,3)
16	85	$33 \cdot 10^6 \div 2007$ г.	$1 \div 34$ (9±5)	$1 \div 72$ (20±18)	$1 \div 755$ (70±64)	$0,004 \div 0,8$ (0,4±0,2)
17	75	$2 \cdot 10^6 \div 4000$	$0,5 \div 40$ (8±5)	$2 \div 12$ (7±5)	$1 \div 942$ (69±74)	$0,2 \div 0,4$ (0,3±0,05)
18	735	$46 \cdot 10^6 \div 2007$ г.	$0,2 \div 150$ (13±9)	$0,3 \div 3000$ (294±350)	$0,3 \div 4712$ (209±221)	$0,004 \div 7,04$ (1,2±0,9)
в среднем			11±7	207±235	142±146	1±0,7

Примечание: 1 – вся окраина Тихого океана, 2 – северо-западная окраина Тихого океана (Японские о-ва, Курильские о-ва, п-ов Камчатка, Алеутские о-ва), 3 – Северная, Центральная и Южная Америки, 4 – Японские и Курильские о-ва, 5 – Японские и Алеутские о-ва, 6 – Курильские о-ва и п-ов Камчатка, 7 – Курильские и Алеутские о-ва, 8 – п-ов Камчатка и Алеутские о-ва, 9 – Северная Америка, 10 – Центральная Америка, 11 – Южная Америка, 12 – Центральная и Южная Америки, 13 – Антарктида, 14 – Австралия и Океания, 15 – Юго-Восточная Азия (Индонезия и Филиппины), 16 – Альпийско-Гималайский пояс, 17 – Африка и Аравийский п-ов, 18 – вся планета; N – общее число кальдер; T – время их образования; D и S – диаметры и площади образовавшихся при извержениях кальдер, соответственно; V – объёмы изверженного материала; Δh – толщины магматических очагов, рассчитанные как отношения объёмов V к площадям образовавшихся кальдер S : $\Delta h = V/S$ для $N = 151$ извержений, для которых известны V , и S ; в скобках представлены среднее значение и его среднеквадратичное отклонение

форм по их площадям S : $\text{Lg}N = b_s \text{Lg}S + \text{const}_2$. Значения коэффициентов углов наклонов (b_v и b_s), соответствующих таким распределениям, имеют близкие значения (рис. 1а, табл. 2).

Полученный результат позволяет сформулировать гипотезу: отношение объёма изверженного материала V к площади S образовавшейся вулканиче-

ской формы есть величина примерно постоянная:

$$\frac{V}{S} = \Delta h = \text{const} \quad (1)$$

и, как следует из данных табл. 1 и 2, равная $\Delta h_{\text{планета}} \approx 1,2 \pm 0,9$ км.

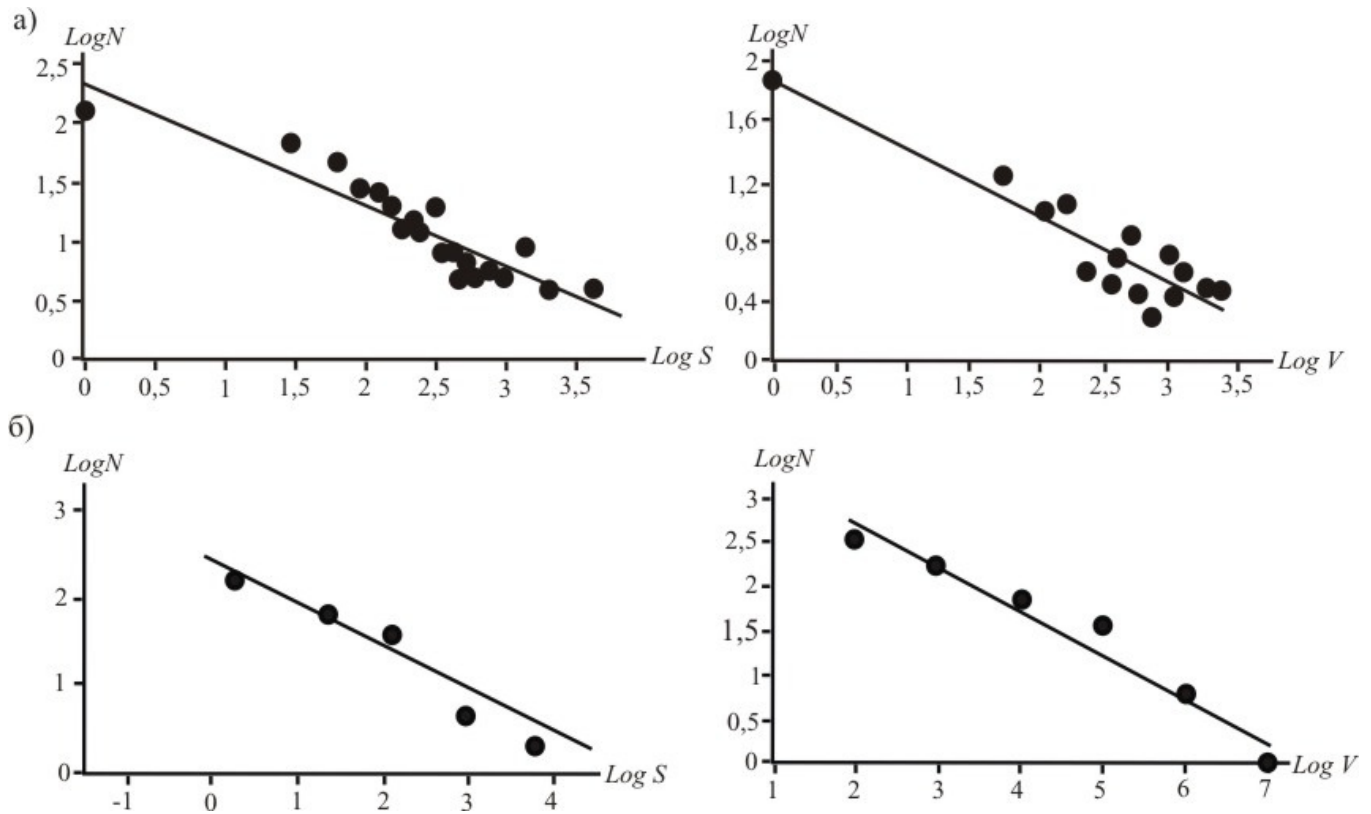


Рис. 1. Распределения $LgN = a_s - b_s LgS$ и $LgN = a_v - b_v LgV$ для вулканов планеты (а) и Курило-Камчатской дуги (б).

Таблица 2. Значения коэффициентов b_s и b_v распределений $LgN(S)$ и $LgN(V)$.

Вулканическая область	b_s	b_v
Вся окраина Тихого океана	$-0,47 \pm 0,08$	$-0,68 \pm 0,1$
Сев.-зап. окраина Тихого океана	$-0,58 \pm 0,09$	$-0,54 \pm 1,61$
Северная, Центральная и Южная Америки	$-0,54 \pm 0,07$	$-0,42 \pm 0,08$
Японские и Курильские о-ва	$-0,53 \pm 0,11$	$-0,34 \pm 0,02$
Японские и Алеутские о-ва	$-0,48 \pm 0,06$	$-0,41 \pm 0,05$
Курило-Камчатская дуга	$-0,54 \pm 1,8$	$-0,42 \pm 0,08$
п-ов Камчатка – Алеутские о-ва	$-0,41 \pm 0,08$	$-0,42 \pm 0,04$
Северная Америка	$-0,41 \pm 1,89$	$-0,41 \pm 0,09$
в среднем	$-0,49 \pm 0,07$	$-0,46 \pm 0,07$

Примечание: $b_{s,v}$ – углы наклонов распределений $LgN(S)$ и $LgN(V)$. Коэффициенты корреляции распределений более 0,8.

В [4, 5] с использованием однородных данных по извержениям Курило-Камчатской дуги, собранных «под одной крышей» И. В. Мелекесцевым [20], были построены (рис. 1 б) аналогичные распределения $N(S)$ и $N(V)$, наклоны ($b_s = -0,47 \pm 0,14$; и $b_v = -0,48 \pm 0,06$) которых являются близкими «планетарным» данным в табл. 2. Определённые по Курило-Камчатским данным толщины очагов оказались равными $\Delta h_{\text{кур-кам}} \approx 0,5 \pm 0,1$ км. Таким образом, толщину магматического очага, питающего извержения вулканов планеты, можно принять равной: $\Delta h = 0,5 \div 1,0$ км.

Кроме того, как видно из данных табл. 1, толщины магматических очагов много меньше диаметров образовавшихся при извержениях кальдер: $D \gg \Delta h$, что позволяет определить геометрию магматического очага как достаточно тонкий слой – «блин».

Природа магматического очага

Была предложена модель тонкого магматического очага, и проведён термодинамический расчёт состояния заполняющего его вещества с использованием известных данных об алюминии, термодинамические параметры которого близки магмати-

ческому расплаву [23, 24]. Расчёты показали, что в результате теплового расширения при локальных плавлениях вокруг магматического очага создаётся дополнительное давление, и за счёт этого появляется поле упругих напряжений. Под действием такого давления тонкий слой «твёрдого» вещества очага оказывается в перегретом состоянии и способен пропускать сквозь себя объёмные продольные и поперечные сейсмические волны. Создаваемое дополнительным давлением упругое поле вокруг такого «твердотельного» очага, как показали расчёты, имеет энергию порядка 10^{15} Дж на 1 км^3 перегретой породы. Таким образом, магматические очаги достаточно сильных ($W > 5$) извержений с объёмами изверженных пород $V > 1 \text{ км}^3$, по величине накопленной вокруг них упругой энергии оказываются близкими очагам наиболее крупных (протяжённостью 100 км и более) землетрясений с магнитудами $M \approx 8$ и более. Такая «энергетическая» близость магматических и сейсмических очагов при их параллельном, на удалении 50–100 км друг от друга, простирании, позволяет в рамках модели блоковой геосреды объяснить и взаимодействие вулканов между собой (миграцию вулканической активности) [8, 24], и взаимодействие вулканизма, сейсмичности и тектоники [2, 3, 9]. К выводу о существовании такой взаимосвязи между составляющими геодинамического процесса — вулканизмом, сейсмичностью и тектоникой, пришли авторы работы [18]: «Кальдерообразующие извержения в большинстве случаев происходят не из-за внутренних причин, обусловленных развитием очага, а в связи с внешними причинами (тектоно-магматическими активизациями... сеймотектоническими процессами)».

Выводы

Собраны и обобщены все известные опубликованные данные о параметрах извержений вулканов планеты: об объёмах изверженного материала и диаметрах и площадях вулканических форм (кальдер и шлаковых конусов крупных размеров). Определены аналитические выражения для распределений $N(V)$ и $N(S)$, которые строились для различных выборок в широком диапазоне V и S . Значения коэффициентов наклонов b_s и b_v оказались близкими: $b_s = -0,51 \pm 0,05$, $b_v = -0,54 \pm 0,08$, это позволило сформулировать гипотезу: толщина магматического очага (отношение объёма изверженного материала к площади вулканической формы (1)) есть величина постоянная и равная $\Delta h = 0,5 \div 1,0$ км.

Полученные для различных по протяжённости, геодинамическим обстановкам регионов, типам вулканов и их извержений результаты (например, пелейский тип извержения — влк. Безымянный, Монтань-Пеле; гавайский тип — влк. Мауна Лоа, Питон де ла Фурнез; Бандайский тип — влк. Бандай, Талаль; плинианский тип — влк. Везувий, Пинатубо, Сент-Хеленс и др.) подтверждают сформулированную гипотезу о тонкой толщине магматического очага. Более того, как видно из этих данных, тол-

щины магматических очагов, питающих такие извержения, никак не зависят от их типа. Поэтому можно предположить, что толщина магматического очага не зависит от вулканического процесса и определяется свойствами и движениями блоков земной коры.

Предложена новая модель тонкого магматического очага [15, 16, 17], в основе которой заложены представления о пластической деформации по границам блоков. В рамках такой модели оказывается возможным объяснить и взаимодействие вулканов между собой в виде миграции вулканической активности вдоль вулканической цепи [24], и взаимодействие вулканизма и сейсмичности. При таком подходе к задачам геодинамики не требуется привлекать широко распространённые в настоящее время модели подъёма магмы с глубин мантии и ядра.

Список литературы

1. Балеста С. Т. Земная кора и магматические очаги областей современного вулканизма. М.: Наука, 1981. 135 с.
2. Викулин А. В. Физика Земли и геодинамика. Учебное пособие. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2009. 463 с.
3. Викулин А. В. Сейсмичность. Вулканизм. Геодинамика. Сборник трудов. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2011. 463 с.
4. Викулин А. В. Кальдеры обрушения, параметры магматических очагов и строение земной коры // Материалы региональной конференции, «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога, 29–30 марта 2013 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2013. С. 153–157
5. Викулин А. В., Акманова Д. Р. Магматические очаги и строение земной коры // VII Международная научная конференция «Вулканизм, биосфера и экологические проблемы». Сборник материалов. Майкоп: Из-во АГУ. 2013. С. 7–10.
6. Викулин А. В., Иванчин А. Г. О природе Мохо как фазовой границе раздела между блоковой земной корой и неблоковой верхней мантией // Геологическая история, возможные механизмы и проблемы формирования впадин с субокеанической и аномально тонкой корой в провинциях с континентальной литосферой. М.: Геос. 2013 а, С. 38–42.
7. Викулин А. В., Иванчин А. Г. О современной концепции блочно-иерархического строения геосреды и некоторых её следствиях в области наук о Земле // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых (ФТПРПИ). 2013 б. № 3. С. 67–84.
8. Викулин А. В., Мелекесцев И. В., Акманова Д. Р., Иванчин А. Г., Водинчар Г. М., Долгая А. А., Гусяков В. К. Информационно-вычислительная система моделирования сейсмического и вулканического процессов как основа изучения волновых геодинамических явлений // Вычислительные технологии. 2012. Том. 17. № 3. С. 34–54.
9. Викулин А. В., Тверитинова Т. Ю. Энергия тектонического процесса и вихревые геологические структуры // Доклады РАН. 2007. Т. 413. № 3. С. 372–374.
10. Влодавец В. И. Справочник по вулканологии. М.: Наука, 1984. 340 с.

11. Геологический словарь в 3-х т. Т. 2. СПб: ВСЕГЕИ, 2011. 480 с.
12. *Голыцын Б.Б.* Избранные труды. Том.2. М.: АН СССР, 1960. 491 с.
13. Действующие вулканы Камчатки. В 2-х Т. / Ред. Федотов С. А., Масуренков Ю. П.. М.: Наука, 1991. Том. 1, 320 с. Том. 2, 415 с.
14. *Ермаков В.А.* Формационное расчленение четвертичных вулканических пород. М.: Недра, 1977. 223 с.
15. *Иванчин А.Г.* Роль кооперативных эффектов при движении дислокаций в диссипации энергии. Дисс. на соискание уч. ст. канд. физ. — мат. наук. Томск: ИОА СО АН СССР, 1982. 131 с.
16. *Иванчин А.Г., Викулин А.В.* Модель теплового взрыва при пластической деформации и землетрясении // Матер. Всеросс. конф. «Школа по фундаментальным основам моделирования обработки материалов» Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2010. С. 22–25.
17. *Иванчин А.Г., Викулин А.В., Фадин В.В.* Ротационная модель теплового разогрева и проблема вулканических очагов // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Третьей научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2011. С. 302–306.
18. *Леонов В.Л., Гриб Е.Н.* Структурные позиции и вулканизм четвертичных кальдер Камчатки. Владивосток: Дальнаука, 2004. 189 с.
19. *Макдональд Г.* Вулканы. М.: Мир, 1975. 432 с.
20. Новейший и современный вулканизм на территории России / под. ред. Лаверов Н. П. М.: Наука, 2005. 604 с.
21. *Федотов С. А.* Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов. М.: Наука, 2006. 455 с.
22. *Федотов С.А., Жаринов Н. А., Гонтовая Л.И.* О деятельности, магматической питающей системе и глубинном строении Ключевской группы вулканов // Вулканизм и геодинамика. Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и сейсмологии, 22–27 сентября 2009 г., Петропавловск-Камчатский. Том.1. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. С. 24–27.
23. *Ivanchik A. G., Vikulin A. V.* Solid-liquid phase transition as a mechanism of volcano eruption // Cornell University. Library Physics. 2012. (<http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1206,5992.pdf>)
24. *Vikulin A. V., Akmanova D. R., Vikulina S. A., Dolgaya A.A.* Migration of seismic and volcanic activity as display of wave geodynamic process // Geodynamics and Tectonophysics. 2012. V. 3. № 1. P. 1–18.