

УДК 550.34 + 551.24

## МАГМАТИЧЕСКИЙ ОЧАГ КАК СВОЙСТВО ЗЕМНОЙ КОРЫ

©2014 А.В. Викулин, Д.Р. Акманова

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006;  
e-mail: vik@kscnet.ru*

На основании наиболее общих распределений, характеризующих извержения вулканов (графиков их повторяемости, площадей, объемов изверженного материала), обосновывается гипотеза о постоянной, независимой от вулканического процесса, толщине магматического очага как свойстве земной коры. Гипотеза обсуждается в свете концепции блоковой геосреды и ее волновых геодинамических движений.

*Ключевые слова: магматический очаг, земная кора, блок, кальдера, граница Мохоровичича.*

*Природа проста и не роскошествует  
излишними причинами (И. Ньютон)*

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время накопился большой объем данных об извержениях вулканов мира в виде их региональных каталогов (Влодавец, 1973; Горшков, 1957, 1967; Гущенко, 1979; Каталог..., 1957; Sapper, 1917; Siebert et al., 2010; CCDB), на основании которых, нами была составлена электронная база (Викулин и др., 2010, 2012, 2014), позволяющая осуществить моделирование вулканического процесса и анализировать его взаимосвязь с другими геодинамическими процессами, например, сейсмическим и тектоническим (Vikulín et al., 2012).

Многочисленными исследователями под решение разных задач и с разной детальностью собрано большое количество данных о параметрах достаточно интенсивных извержений ( $W \geq 4$ ), таких как диаметры образовавшихся при извержениях кальдер, их площади, высоты бортов и объемы изверженных продуктов.

В сборе, обобщении и классификации этих данных принимали участие различные специалисты в области наук о Земле (Апродов, 1982; Болт и др., 1978; Бондаренко, 1990; Бондаренко, Рашидов, 2003; Гриб, Леонов, 2011; Зубин и др., 1971; Козлов и др., 2012; Короновский, 2012; Леонов, Гриб, 2004; Леонов, Рогозин, 2005; Лучицкий, 1971; Макдональд, 1975; Мелекесцев и др., 1998; Новейший..., 2005; Newhall et al., 1988; Spera

et al., 1981; Williams, 1941). С их использованием получены основные количественные оценки параметров процессов, протекающих как в постройке вулкана, так и в его магматическом очаге (Лучицкий, 1971; Макдональд, 1975; Федотов, 2006). Геофизические и петрофизические данные, на основе которых выполняются такие же оценки, как правило, являются решениями соответствующих «обратных задач», которые часто зависят от гипотетических знаний о строении, составе и  $p$ - $T$  условиях земной коры и верхней мантии. Поэтому интерпретация геофизических и петрофизических данных часто достаточно неоднозначна. Ярким подтверждением этому могут служить полученные на Кольской сверхглубокой скважине (Кольская..., 1984) результаты геофизических и петрофизических наблюдений, которых в большинстве своем не совпали с имевшимися моделями.

Проблемы происхождения магмы и образования магматических очагов далеки от своего решения. С одной стороны, считается общепринятым представление о том, что магма поступает из недр мантии и на некой глубине скапливается в виде определенного объема — магматического очага (Федотов, 2006). С другой стороны, имеются и другие гипотезы образования магматических очагов. Так, Г. Макдональд (1975, с. 370) считал маловероятным вывод о том, что «магматический очаг является продол-

жением крупного тела жидкой магмы». Веские соображения в пользу образования жидких силикатных расплавов в пределах коры приведены В.И. Лучицким (1971). Представления о палингенных очагах — магматических очагах, образованных в пределах коры, разрабатывались В.А. Ермаковым (1977), а возможность существования таких очагов подтверждена сейсмическими методами в работе (Балеста, 1981). Такие гипотезы происхождения магмы и ее генезиса до настоящего времени так никем и не опровергнуты, видимо, по причинам отсутствия достаточной ясности о происхождении магмы и связаны большие неопределенности в формулировках основных понятий вулканологии. Так, в справочнике (Влодавец, 1984) приводится 14 определений термина «вулкан», который затем на многих страницах детализируется: от «вулкан абортивный» до «вулкан эффузивный». Аналогичная ситуация с терминами «кратер»: 10 определений, детализация; «магма»: 10 определений, детализация; «очаг магматический»: четыре определения, детализация и т.д. Не прибавляет конкретного содержания и информация, содержащаяся в Геологических словарях (1978, 2011). Например, в работе (Геологический..., 2011) термин кальдера многократно и определяется и детализируется. Трактовке понятия магмы в монографии (Арискин, Бармина, 2000) посвящен целый раздел. Мы под магматическим (вулканическим) очагом будем понимать более общее его определение: изолированная камера, из которой происходит питание вулкана (Геологический..., 1978), и которое не противоречит всем остальным определениям этого вулканического объекта (Влодавец, 1984).

Такое «неопределенное» состояние наших знаний о процессах, протекающих в земной коре и верхней мантии под вулканами, есть, в том числе, и результат неоднозначности интерпретации данных, получаемых при геофизических и петрофизических исследованиях, проводимых на вулканах с применением все более совершенной аппаратуры.

О процессах, протекающих в магматических очагах, нет полной ясности. Во-первых, согласно работе (Хубуная и др., 2007; Koulikov et al., 2011) на основании большого объема сейсмотомографических исследований под магматическим очагом понимается объем земной коры и/или верхней мантии с аномально низкими значениями скоростей сейсмических волн, в том числе и поперечных сейсмических волн, которые через такой «жидкий» долгоживущий магматический очаг не должны проходить вообще. Именно в пределах таких аномальных областей, обладающих повышенной вязкостью и пониженной прочностью (Федотов и др., 2010) и

локализованы гипоцентры большей части предварающих извержения очагов землетрясений (Действующие..., 1991а, 1991б). Другими словами, результаты инструментальных геофизических исследований на вулканах привели, по нашему мнению (Викулин, Иванчин, 2012), к полному их противоречию с концепцией жидкого долгоживущего магматического очага.

Во-вторых, разработка принципиального по своему смыслу геологического содержания понятия магмы, как родоначальницы магматических геологических пород, привело к разработке таких «единых» с точки зрения петролого-геохимических моделей состояния магматического очага понятий, как «резервуар», «магматическая каша», «кристаллическая каша» и др., которые оказались достаточно эффективными при изучении вулканических и интрузивных пород (Арискин, Бармина, 2000; Annen et al., 2005). И, в то же время, исследования магматизма различных геодинамических обстановок позволили разделить все магматические расплавы на существенно различающиеся друг от друга интегральные и дифференциальные (Арискин, Бармина, 2000; Соболев, 1997).

В-третьих, в соответствии с работой (Френкель и др., 1988) эволюцию магматических систем можно разделить на две части: термодинамическую и динамическую. Термодинамическая, то есть петролого-геохимическая составляющая, соответствует действительности. Результаты же динамических исследований, связанных с особенностями второй составляющей — динамикой магмы внутри очага (оценки чисел Рэлея, значений стоксовых скоростей оседания кристаллов и других параметров теплопереноса), то есть «локальной» динамикой поведения магматического очага, оказались противоречивыми (Арискин, Бармина, 2000). Более того, возможное термодинамическое состояние вещества магматического очага, которое могло быть связано с движениями самой земной коры, являющимися по отношению к магматическому очагу «глобальными», не исследовались вообще.

Каждое извержение, несомненно, уникально, неповторимо и сопровождается явлениями, ранее часто не отмечаемыми при предыдущих извержениях. Но это вовсе не означает, что у извержений вулканов не может быть таких параметров, которые могли бы служить некой их общей мерой. Так, например, для землетрясений, каждое из которых, как и извержения, неповторимо и уникально, более 100 лет тому назад Ф. Рейду удалось «нащупать» некий общий механизм, известный как модель упругой отдачи. На ее основе в 1930-е гг. Ч. Рихтером была создана энергетическая классификация землетрясений (Ванек, 1980) — магнитуда, с ис-

пользованием которой мы в настоящее время располагаем инструментальными детальными каталогами землетрясений, позволяющими и достаточно детально исследовать сейсмический процесс и разрабатывать соответствующие средства защиты.

С развитием науки вулканологии возникла необходимость введения шкалы или классификации явлений вулканизма. С использованием накопленных количественных данных о параметрах извержений была разработана концепция индекса вулканической эксплозивности  $W$ , в основе которой используется представление, в том числе, и об объеме извергнутого при извержениях материала  $V$  (Siebert et al., 2010).

Основная энергия извержения вулкана заключена в тепле от материала, выносимого на поверхность. Энергетика, пропорциональная объему извержений,  $W$  (Siebert et al., 2010), по сути, близка энергетической классификации землетрясений – их магнитуде. Построенная авторами настоящей статьи и их коллегами электронная база данных, использующая классификацию  $W$ , включает 6499 извержений 627 вулканов мира, извергавшихся за последние 12 тыс. лет (по 2010 г. включительно) с  $W \geq 1$ ,  $V \geq 10^{-4}$  км<sup>3</sup>;  $W_{max} = 7$ ,  $V_{max} \approx 200$  км<sup>3</sup> (Викулин и др., 2012, 2014). Такая база позволяет, с помощью специального математического аппарата, обрабатывать большие массивы исходных данных и достаточно детально исследовать вулканический процесс на региональном и планетарном уровнях (Vikulin et al., 2012).

Достижением научной мысли, на наш взгляд, является разработка блоковой концепции геологической и геофизической сред – геосреды (Викулин, Иванчин, 2013б; Садовский, 2004; Опарин и др., 2007; Vikulin et al., 2013). Волновые представления о сеймотектоническом процессе, протекающем в блоковой геосреде, должны быть перенесены и на вулканический процесс, так как вулканические пояса Земли, как и сейсмические активные зоны, являются крупнейшими линейными структурами нашей планеты. Их образование началось в раннем мелу и происходило достаточно синхронно (Планета..., 2004). Для трех из таких наиболее активных вулканических поясов – Тихоокеанского, Альпийско-Гималайского и Срединно-Атлантического, нами показано, что миграция вулканической активности, как и миграция сейсмической и тектонической активности, являются проявлением волнового геодинамического процесса (Викулин и др., 2010, 2012; Vikulin et al., 2012). В рамках таких блоковых представлений должны существовать механизмы, которые бы могли обеспечить «взаимодействие» как магматических очагов между собой, так и вулканизма, и сейсмичности и тектоники.

Отражением «блокового характера» вулканического процесса, его «квантовой» характеристикой отдельно взятого извержения вулкана является питающий извержение вулкана магматический очаг – аналог очага землетрясения в сейсмическом процессе. О размерах магматического очага в случае достаточно интенсивного извержения вулкана, очевидно, 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» (Геологический..., 2011, с. 12).

Целью настоящей работы является анализ распределений, характеризующих извержения вулканов и, выдвинутая, на основании этого анализа гипотеза о постоянной, независимой от вулканического процесса, толщине магматического очага как свойстве земной коры (Викулин, Акманова, 2014).

#### РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧИСЕЛ ИЗВЕРЖЕНИЙ И РАЗМЕРОВ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ФОРМ ПЛЕЙСТОЦЕН-ГОЛОЦЕНОВЫХ КУРИЛО-КАМЧАТСКИХ ВУЛКАНОВ

Наиболее полные и однородные данные об извержениях и размерах вулканических форм собраны различными авторами (Леонов, Гриб, 2004; Бондаренко, 1990; Мелекесцев и др., 1998; Новейший..., 2005) для плейстоцен-голоценовых вулканов в пределах Курило-Камчатской дуги.

*График повторяемости извержений.* Для 70 вулканов Курило-Камчатской дуги, извергавшихся  $N = 692$  раза за последние 9.5 тыс. лет (Vikulin et al., 2012), в интервале индексов эксплозивности  $2 \leq W \leq 7$  построен график повторяемости извержений (Викулин и др., 2012):

$$LgN = 3.60 - (0.48 \pm 0.1)W \quad (1)$$

С учетом взаимосвязи между энергетической характеристикой извержения  $W$  и объемом изверженного материала  $V$  (Siebert et al., 2010):  $W = LgV[\text{км}^3] + 5$ , график повторяемости извержений (1) можно переписать в «объемном» виде:

$$LgN = 1.15 - (0.48 \pm 0.1)LgV, [V] = \text{км}^3 \quad (2)$$

Данные о вулканических формах (кальдерах – диаметром  $\geq 2$  км, крупных воронках на шлаковых конусах – от 10 м и более, депрессий – до 300-350 км) Камчатки и Курильских островов, представленных в работах (Леонов, Гриб, 2004; Новейший..., 2005 и др.), приведены в табл. 1. С использованием этих данных методом наименьших квадратов было построено следующее распределение чисел вулканических форм  $N$  по их площадям  $S$ :

$$LgN = (2.32 \pm 0.16) - (0.47 \pm 0.14)LgS, [S] = \text{км}^2 \quad (3)$$

Как можно видеть из полученных соот-

ношений, «угол наклона» энергетического  $W$  (1) и/или «объемного»  $V$  (2) распределения  $0.48 \pm 0.1$  практически совпадает с «углом наклона» распределения чисел вулканических форм по их площадям  $S$  (3) –  $0.47 \pm 0.1$ . Числа, используемые при вычислениях извержений вулканов и размеров вулканических форм, достаточно большие и статистически значимые. Энергетический диапазон и размеры кальдер, характеризующие распределения (1) – (3), охватывают весь спектр вулканических извержений, включая и максимальные значения  $W_{max} = 7(V_{max} = 100-800 \text{ км}^3)$  и  $S_{max} = (15 \times 20) - (20 \times 25) \text{ км}^2$  и более (табл. 2).

По своему смыслу распределения (1) – (3) являются достаточно общими статистическими распределениями, характерными для вулканического процесса, протекающего в пределах протяженного региона ( $\sim 2500 \text{ км}$ ) в течение продолжительного отрезка времени ( $\sim 1 \text{ млн. лет}$ ). Поэтому близость наклонов энергетического (1) и/или объемного (2) и площадного (3) распределений позволяет сформулировать следующую гипотезу: отношение объема изверженного материала  $V$  к площади образовавшейся вулканической формы  $S$  есть величина постоянная:

$$V/S = \Delta h = \text{const}, \quad (4)$$

которую мы называем толщиной магматического очага (Викулин, Акманова, 2014).

Следует особо отметить следующее. Гипотеза, выраженная с помощью соотношения (4), является результатом анализа таких статистических распределений (1) – (3), описывающих наиболее общие энергетические и пространственные закономерности, которые характерны, в целом, для всех геодинамических процессов, протекающих в пределах достаточно протяженных регионов ( $\sim 2500 \text{ км}$ ) в течение продолжительного времени ( $\sim 1 \text{ млн. лет}$ ), включая и вулканический процесс. Поэтому, по нашему мнению, есть все основания считать, что гипотеза (4), определяющая постоянство размера магматического очага – его толщины  $\Delta h$ , является для вулканологии фундаментальной.

## ВУЛКАНИЧЕСКИЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ ПЛАНЕТЫ

Угол наклона графика повторяемости 6499 извержений 617 вулканов планеты в интерва-

**Таблица 1.** Числа вулканических форм Камчатки и Курильских островов как функции их площадей  $S$  по данным (Новейший..., 2005).

Диапазоны	Сечения, $S$ , км <sup>2</sup>				Всего
	$0.2 \leq S < 2$	$2 \leq S < 20$	$20 \leq S < 200$	$200 \leq S$	
Среднее, $S$	1	7	32	324	
Камчатка	47	56	4	2	109
Курилы	130	47	1	–	178
Всего	177	103	5	2	287

ле времени 9650 до н.э. – 2010 гг. в диапазоне  $W = 1-7$  (Викулин и др., 2012):

$$LgN = -(0.52 \pm 0.1)W \quad (5)$$

близок наклону для извержений Курило-Камчатских вулканов (1).

Для извержений вулканов всей планеты проанализируем распределения чисел извержений вулканов как функции площадей образовавшихся кальдер и объемов выброшенного материала.

*Параметры извержений вулканов планеты (n.l)* полученные из работ (Апродов, 1982; Бондаренко, 1990; Бондаренко, Рашидов, 2003; Гриб, Леонов, 2011; Гущенко, 1979; Ермаков, Штейнберг, 1999; Козлов и др., 2012; Короновский, 2012; Макдональд, 1975; Новейший ..., 2005; CCDB, Newhall et al., 1988; Spera et al., 1981; Williams, 1941 и другие) обобщены в работе (Викулин, Акманова, 2014) и представлены за последние 94 млн. лет. Для достижения поставленной в настоящей работе цели, авторами решено использовать наиболее представительные данные за последние 33 млн. лет (табл. 3, 4).

Параметры кальдер и величины объемов выброшенного материала при их образовании, изменяются в пределах многих порядков величины (табл. 3):  $D = 2-150 \text{ км}$ ,  $S = 2-4648 \text{ км}^2$ ,  $V = 0.3-3000 \text{ км}^3$ . Тем не менее, как показано на рисунках (рис. 1, 2) и в соотношениях (6) и (7), углы наклонов распределений площадей  $S$  (6) и объемов изверженного материала  $V$  (7) с высокой статистически значимой достоверностью близки между собой:

$$LgN = (1.87 \pm 0.1) - (0.49 \pm 0.1)LgS, [S] = \text{км}^2 \quad (6)$$

$$LgN = (1.41 \pm 0.2) - (0.42 \pm 0.1)LgV, [V] = \text{км}^3 \quad (7)$$

Продолжительности интервалов осреднения исходных значений  $S$  и  $V$  увеличивались при увеличении самих значений таким образом, чтобы в логарифмическом масштабе обеспечить достаточно равномерный шаг осредненных значений.

Таким образом, данные об извержениях вулканов планеты в течение последних 33 млн. лет (табл. 3) подтверждают справедливость гипотезы (Викулин, Акманова, 2014) о постоянстве толщины магматического очага.

*О геометрии магматического очага.* Полученные ранее данные позволяют количественно оценить толщину магматического очага по параметрам извержений вулканов планеты  $\Delta h_{n.l}$ . С этой целью в формулу (4) из табл. 3 подстав-

**Таблица 2.** Параметры кальдер, объемы выброшенного на поверхность материала и толщины магматических очагов для плейстоцен-голоценовых извержениях Камчатки и Курильских островов (кк).

Кальдера	Координаты		Возраст, тыс. лет	D, км	S, км <sup>2</sup>	V, км <sup>3</sup>	h <sub>кк</sub> <sup>1</sup> км	Δh <sub>гкк</sub> <sup>1</sup> км	Δh <sub>зкк</sub> <sup>2</sup> км	Ссылки
	с.ш.	в.д.								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>Камчатка</i>										
1. Кошелевская	51.31	156.65	110-80	3	7					Леонов, Гриб, 2004
2. Влк. Явинский	51.54	156.55	180-150	8.5	56					Леонов, Гриб, 2004
3. Курильское озеро	51.45	157.10	7.7	7	40					Леонов, Гриб, 2004
				10	79					Newhall, Dzurisin, 1988
4. Ильинская	51.50	157.20	7.7	6	29					Леонов, Гриб, 2004
5. Желтовская	51.58	157.32	15	4	13					Леонов, Гриб, 2004
6. Призрак	51.66	157.35	120-80	4	13					Леонов, Гриб, 2004
Призрак (2 кальдеры)				4	13					
7. Курильское озеро -Ильинская	51.5	157.2	7.7		152	V <sub>2</sub> = 70			0.46	Мелекесцев и др., 1998
8. Паужетская депрессия	51.46	156.80		20×25	397	V <sub>1</sub> = 140		0.35		Newhall, Dzurisin, 1988
				26×20	415	V <sub>1</sub> = 300	0.55	0.72		Новейший..., 2005
				20×25	397					Newhall, Dzurisin, 1988
9. Влк. Мутновский	52.50	158.20		1.5×2	2					Новейший..., 2005
				9	64					Гущенко, 1979
10. Половинки	53.95	159.44	180-150	11	95					Леонов, Гриб, 2004
				15	177					Newhall, Dzurisin, 1988
11. Влк. Однобокий	53.98	159.46	110-80	4×6	20					Леонов, Гриб, 2004
				4×5	16					Newhall, Dzurisin, 1988
12. Влк. Иголки Ксулач*	52.03	156.90	180-150	7	38					Леонов, Гриб, 2004
				8	50					Леонов, Гриб, 2004
13. Ксулач I	51.80	157.54		7×9	50	V <sub>1</sub> ≈ 105		2.10		Новейший..., 2005
				7	38	V <sub>1</sub> ≈ 105		2.76		Новейший..., 2005
15. Ксулач III			8.7-8.8	2-3	7	V <sub>2</sub> = 1.5			0.21	Новейший..., 2005

Таблица 2. Продолжение.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
16. Ксулач IV			6.1	5×6	24	$V_2 = 5$			0.21	Новейший..., 2005
			1.7-1.8	4×6.5	22	$V_2 = 6.5$			0.30	Новейший..., 2005
			1.8			$V_1 = 13$	0.7			Новейший..., 2005
18. Опала	52.50	157.35	39-40	15	177					Леонов, Гриб, 2004
				13×19	201	$V_1 = 90$	0.45			Новейший..., 2005
				10×12	155	$V_1 = 200$	1.29			Frank et al., 1981
				13×15	95		0.3			Newhall, Dzurisin, 1988
19. Влк. Академия Наук	53.09	159.46	28-48	4	13					Гуценко, 1979
			10-11	2	3					Леонов, Гриб, 2004
				3×5	13					Новейший..., 2005
										Newhall, Dzurisin, 1988
20. Карымская	54.05	159.50	8.6		26	$V_1 = 13$		0.50		Новейший..., 2005
			7.9	5	20					Леонов, Гриб, 2004
			7.9	6.5×5	26	$V_2 = 7$			0.27	Мелекесев и др., 1998
				6×4	20					Новейший..., 2005
21. Влк. Козельский	53.23	158.88		5	20					Гуценко, 1979
			9	1.5	2	$V_1 = 0.7$	0.35			Новейший..., 2005
			180-150	9	64					Леонов, Гриб, 2004
			34-35	9×12	87					Леонов, Гриб, 2004
23. Влк. Горелый	52.55	158.05		13×12	123					Кириянов, 2009
				10×13	104	$V_1 = 200$	1.90			Frank et al., 1981
			34-35	12.5×9	91	$V_1 = 120$	0.18			Newhall, Dzurisin, 1988
			30	4.5-5	20	$V_1 = 15$	0.75			Новейший..., 2005
24. Влк. Авачинский	53.25	158.82		4	13					Леонов, Гриб, 2004
				4	13					Гуценко, 1979
25. Влк. Стена	54.10	159.70	180-150	12	113				Леонов, Гриб, 2004	

Таблица 2. Продолжение.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
26. Стены-Соболиного	54.10	159.70	180-140 180-150	20×10 12 21×15	177 113 254	$V_1 = 100$		0.56		Леонов, Гриб, 2004 Леонов, Гриб, 2004 Newhall, Dzurisin, 1988
27. Малый Семячик	54.11	159.65	20	7 6×7 10	38 33 79					Леонов, Гриб, 2004 Newhall, Dzurisin, 1988 Гущенко, 1979
28. Малосемячинская депрессия			30-40	19×13	201	$V_1 = 20$		0.10		Новейший..., 2005
29. Карышина	52.9	157.78	1780	25×15	427	$V_1 = 825$		1.93		Леонов и др., 2012
30. Большой Семячик*	54.31	159.85	120-80 30-40	10 12×10	79 95	$V_1 = 42$		0.53		Леонов, Гриб, 2004 Новейший..., 2005
31. Борт			30	5	20					Леонов, Гриб, 2004
32. Влк. Ушковский	56.07	160.45	9.5	6	28					Новейший..., 2005
33. Плоские сопки				4	13					Новейший..., 2005
34. Узонская депрессия	54.0	160.0		50×45	1771					Новейший..., 2005
35. Комарова	55.02	160.72		2.5×4 2.5	8 5					Леонов, Гриб, 2004 Гущенко, 1979
36. Узон-Гейзерная депрессия*	54.50	160.00	40	9×18 16×8 18×7 12×10 7×18	143 113 123 95 123	$V_1 = 46$	0.35	0.41		Леонов, Гриб, 2004 Леонов, Гриб, 2004 Новейший..., 2005 Гущенко, 1979 Newhall, Dzurisin, 1988
37. Крашенинникова	54.61	160.25	35-38 40	10 9×10 9×11	79 71 79	$V_1 = 70$	0.50	0.99		Леонов, Гриб, 2004 Новейший..., 2005 Newhall, Dzurisin, 1988 Гущенко, 1979
38. Плоский Толбачик	55.81	160.38	7 0.6 1975 г.	3 3.5×3 2×1.5 1.6×1.2	7 8 2 2				0.18	Леонов, Гриб, 2004 Новейший..., 2005 Новейший..., 2005 Новейший..., 2005

Таблица 2. Продолжение.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
39. Влк. Шивелуч	56.62	161.30	30 65-40	9	64		1.60			Леонов, Гриб, 2004 Новейший..., 2005 Новейший..., 2005
40. Влк. Безымянный			1956 г.	9	64	$V_1 = 50$		0.78		Кириянов, 2009
41. Влк. Заречный	56.37	160.83	30	2.8×1.7	4	$V_1 = 50$		0.70		Новейший..., 2005
42. Хангар	54.75	157.40	30	3.7	11					Леонов, Гриб, 2004
43. Хангар I			30	12×16	154					Леонов, Гриб, 2004
44. Уксичан	56.08	158.40	180-150	15×12	154					Новейший..., 2005
45. Влк. Ичинский	55.70	157.75	30	14×16	177					Новейший..., 2005
46. Ичинская вершина				3×5	13					Леонов, Гриб, 2004
				6.4×3.3	19					Новейший..., 2005
					17					Новейший..., 2005
					28					Гущенко, 1979
47. Влк. Большой	56.45	157.75	200	6	154				Действующие..., 1991	
48. Влк. Кекукнайский	56.47	157.95	180-150	12-15	7				Леонов, Гриб, 2004	
49. Влк. Малая Кетепана	56.09	150.43	180-150	3	24				Леонов, Гриб, 2004	
50. Влк. Тигильский	56.55	159.45	200	5.5	13				Леонов, Гриб, 2004	
51. Влк. Большой Чекчебонай	56.08	159.08	250	4	13				Леонов, Гриб, 2004	
52. Влк. Переваловый	56.74	159.42	180-150	4	20				Леонов, Гриб, 2004	
53. Влк. Черный	56.83	159.68	180-150	5	50				Леонов, Гриб, 2004	
54. Влк. Малый Чекчебонай	56.93	159.44	180-150	8	28				Леонов, Гриб, 2004	
55. Карымско-Семячинская система	53.25	159.70		6	96163					Леонов, Гриб, 2004
56. Большой Семячик-Гейзерная система	54.30	160.00		6	70650					Леонов, Гриб, 2004
57. Карымская депрессия	54.05	159.5		350	133					Новейший..., 2005



Таблица 2. Продолжение.

Курильские острова										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
58. Карпинского	50.09	155.22		5	20		0.70			Гущенко, 1979
59. Влк. Эбеко	50.40	155.56	2-2.5	3-5	13					Гущенко, 1979
60. Влк. Кунтоминар	48.46	154.01		2	3		0.50			Гущенко, 1979
61. Влк. Берга	46.04	150.05		2	3					Гущенко, 1979
62. Влк. Севергина	49.03	154.26		2	3					Гущенко, 1979
				1.5×2	2				Новейший..., 2005	
Немо*	49.34	154.49		20×13	215					Новейший..., 2005
				8-9	57				Гущенко, 1979	
				9×10	71	$V_2 = 50$	0.70		Новейший..., 2005	
				6	28	$V_2 = 10$	0.36		Новейший..., 2005	
65. Немо III	49.34	154.49		5.5×4.5	20	$V_2 = 5$	0.25			Новейший..., 2005
				5.5×4.5	20	$V_1 = 9$	0.45		Новейший..., 2005	
66. Тао-Русыр	49.22	154.43	7.5	7	38					Гущенко, 1979
				7.8×7	43	$V_2 = 30$	0.70		Новейший..., 2005	
					43	$V_1 = 50$	1.16		Новейший..., 2005	
				7.5	44				Newhall, Dzurisin, 1988	
67. Саргчева	48.06	153.12	50	3×3.5	8					Гущенко, 1979
				4	13				Новейший..., 2005	
				5.5×5	22	$V_1 = 25$	1.14		Новейший..., 2005	
68. Влк. Трезубец	46.04	150.07		2	3					Гущенко, 1979
				2.5	5				Гущенко, 1979	
69. Влк. Берутарубе	44.28	146.56		5.5×5	22	$V_1 = 30$		1.36		Новейший..., 2005
				9	64				Гущенко, 1979	
				6	28				Newhall, Dzurisin, 1988	
71. Улишир	47.5	152.8		1.5	2					Гущенко, 1979
				8×6	38	$V_1 = 40$	1.05		Новейший..., 2005	
72. Броутона	47.12	152.25		7.5×7	41	$V_2 = 30$		0.73		Козлов и др., 2010
					41	$V_1 = 50$	1.22		Новейший..., 2005	

Таблица 2. Продолжение.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
73. Паласа	47.21	152.29		9; 2.5 2.5×2.7 5; 1.5	64; 5 5 20; 2					Гущенко, 1979 Новейший..., 2005 Newhall, Dzurisin, 1988
Заварицкого*			1957 г.	6	28					Рэдулеску, 1979
74. Заварицкого I				6	28					Новейший..., 2005
75. Заварицкого II				6	28					Новейший..., 2005
76. Заварицкого III	46.57	151.57		3.3×2.7	7					Новейший..., 2005
77. Заварицкого IV						$V_1 = 8$				Новейший..., 2005
78. Заварицкого VI				3.5	10					Новейший..., 2005
Заварицкого				10; 8	79; 50					Newhall, Dzurisin, 1988
79. Медвежья	45.23	148.48	24.5	8	50					Newhall, Dzurisin, 1988
80. Медвежья II				10×9.5	75		0.60			Новейший..., 2005
81. Цирк			1000	6.5×5.5	28					Новейший..., 2005
82. Урбич				6.5×5.5	28					Новейший..., 2005
83. Подводная кальдера (залив Простор)			39	21×15	254					Новейший..., 2005
84. Иван Грозный	45.01	147.52		4	13					Гущенко, 1979
85. Горшкова	46.30	150.52	30-35	2.3	4					Новейший..., 2005
86. Внешняя кальдера Горшкова				11.5×7.5	71		0.60			Бондаренко, 1990
87. Тятя	43.54	146.15		15×20	185	$V_1 = 130$		0.70		Бондаренко, Рашидов, 2003
88. Менделеева	43.54	145.42	40	2.5	5					Гущенко, 1979
				2.1×2.4	4					Новейший..., 2005
				2.5	5					Новейший..., 2005
				2.5	5					Гущенко, 1979
				8.5×6	41					Новейший..., 2005
				6; 3	28; 7					Newhall, Dzurisin, 1988

Таблица 2. Продолжение.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1. Головинна	43.49	145.33		4.5	16					Гущенко, 1979 Новейший..., 2005
			39	5×4	16					
2. Львиная Пасть			9.4	9×6.5	51	$V_2 = 55$			1.08	Бондаренко, 1990 Новейший..., 2005
					51	$V_1 = 170$		3.33		
Среднее значение (среднее квадратичное)										
Число данных										
							0.54 ± 0.21	1.07 ± 0.6	0.45 ± 0.2	
							13	27	12	

Примечание: \* – кальдерная система;  $D$  – диаметры кальдер;  $S$  – площади кальдер;  $h_{\text{вк}}$  – высоты бортов кальдер;  $V_1$  – объемы выброшенного на поверхность материала;  $V_2$  – объемы опустошенных магматических очагов, рассчитанные И.В. Мелекесцевым (Новейший..., 2005); толщины магматических очагов  $\Delta h_{\text{вк}}$  и  $\Delta h_{2\text{вк}}$ .

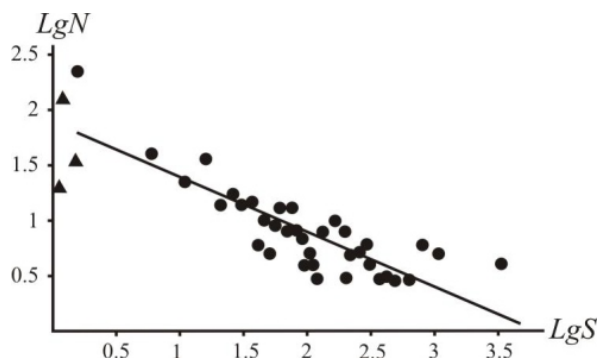
**Таблица 3.** Параметры образовавшихся во время извержений кальдер планеты за последние 33 млн. лет.

Вулканическая область	Число кальдер	Время образования, лет	Диаметр, км	Площадь, км <sup>2</sup>	Объем изверженного материала, км <sup>3</sup>	Высоты бортов кальдеры $h_{пл}$ , км	Толщина магматического очага $\Delta h_{пл}$ , км
Австралия и Океания	25	0.4×10 <sup>6</sup> -180	2-150	3-130	24-100		0.2
Азия	194	2.8×10 <sup>6</sup> -1975	2-100	2-1775	0.3-1750	0.008-1.6	0.004-3.49
Америка	89	33×10 <sup>6</sup> -1912	2-85	7-4648	2-3000	0.18-3	0.1-3
Антарктида	3		3-10				
Африка	26	1×10 <sup>6</sup> -0.004×10 <sup>6</sup>	2-22	10-80	2-12	1	0.4
Европа	36	0.3×10 <sup>6</sup> -1875	2-20	3-300	2-72	0.7-2.4	0.008-1.2
Всего	373	33×10 <sup>6</sup> -1975	2-100	2-4648	0.3-3000	0.01-2.4	0.01- 3.3
Среднее значение (среднее квадратичное)			11	247	233	0.5±0.4	0.9±0.6

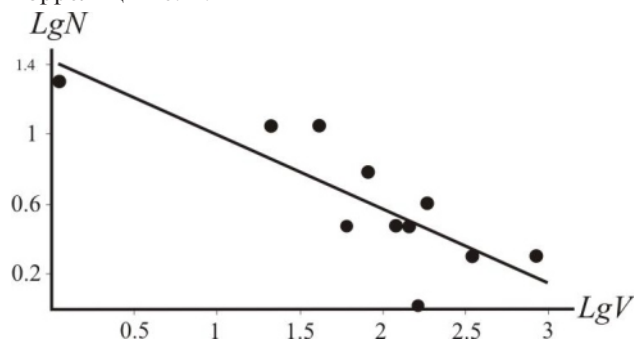
**Таблица 4.** Параметры образовавшихся во время извержений воронок на шлаковых конусах за последние 14 тыс. лет.

Вулканическая область	Число воронок на шлаковых конусах	Время образования, лет	Диаметры, км	Площади, км <sup>2</sup>
Австралия и Океания	19		0.07-1.5	0.004-1.8
Азия	99	0.3 ×10 <sup>6</sup> -1935	0.05-1.8	0.003-2.5
Америка	49	0.014×10 <sup>6</sup> -1883	0.03-2	0.001-7
Антарктида	2		1-1.5	0.8-2
Африка	6		0.09-1.7	0.006-2.3
Европа				
Всего	175	0.014×10 <sup>6</sup> -1935	0.03-2	0.001-7
Среднее значение (среднее квадратичное)			0.8 ± 0.6	2

Примечание: отсутствие доступной информации о тех или иных параметрах показаны в таблице пустыми строками.



**Рис. 1.** Распределение чисел  $N = 373$  (табл. 2) кальдер (точки) и крупных воронок  $N = 75$  (табл. 3) на шлаковых конусах (треугольники) по величинам их площадей  $S$  и  $s$  [км<sup>2</sup>], соответственно, образованных на вулканах планеты; коэффициент корреляции 0.71.



**Рис. 2.** Распределение чисел извержений как функция объемов выброшенного материала  $V$  [км<sup>3</sup>],  $N = 125$ , при извержениях вулканов планеты; коэффициент корреляции 0.69.

лялись данные об извержениях вулканов, для которых известны и площади кальдер  $S$  и объемы выброшенного материала  $V$ ,  $N = 125$ . В результате было получено равенство:

$$\Delta h_{nl} = 0.90 \pm 0.6 \text{ км.} \quad (8)$$

Средние значения диаметров кальдер планеты  $D_{nl} = 11$  км (табл. 3) и толщин магматических очагов  $\Delta h_{nl}$  (8) соотносятся между собой следующим образом:

$$D_{nl} \gg \Delta h_{nl}, \quad (9)$$

что вполне однозначно позволяет определить геометрию магматического очага как достаточно тонкий слой – «блин».

Обращают на себя внимание следующие «совпадения». Во-первых, рассчитанные по формуле (4) толщины магматических очагов оказались, в среднем  $\sim$  на 50%, близкими высотам бортов кальдер (табл. 3):

$$\Delta h_{nl} \approx h_{nl}, \quad (10)$$

что также можно рассматривать как подтверждение гипотезы о тонкослойном с постоянной толщиной магматическом очаге.

Во-вторых крупные воронки на шлаковых конусах (рис. 1) не могут существенным образом изменить аналитическое выражение зависимости (6). Другими словами, представления о тонкослойном магматическом очаге (4), (8), (9), по сути, стирают различия между крупными воронками на шлаковых конусах и кальдерами. Как видим и само понятие о кальдерообразующем извержении, как некоем «особом» классе извержений, в определенном смысле, теряет смысл.

### ТОЛЩИНА МАГМАТИЧЕСКОГО ОЧАГА ВУЛКАНА

Приведенные в табл. 3 параметры вулканов планеты представляют собой достаточно неоднородную совокупность данных, для разных регионов, представленную с разной детальностью. Возможно, по этой причине, толщина магматического очага, вычисленная по такой неоднородной выборке, определена нами с достаточно большой погрешностью. Параметры же извержений современных Курило-Камчатских вулканов исследованы с большей детальностью (Гриб, Леонов, 2011; Леонов, Гриб, 2004; Мелекесцев и др., 1998) и потому с их помощью можно попытаться проверить наше предположение о постоянстве толщин магматических очагов. Такие данные представлены двумя совокупностями:  $\Delta h_{1kk}$  и  $\Delta h_{2kk}$  (табл. 2), каждая из которых является достаточно однородной. Рассмотрим каждую из них в отдельности.

*Данные о Курило-Камчатских кальдерах.* С помощью соотношения (4) были определены толщины магматических очагов для 25 плейстоцен-голоценовых Курило-Камчатский кальдер

(табл. 2), собранные и классифицированные И.В. Мелекесцевым (Новейший..., 2005): для  $N = 14$  кальдер Камчатки и для  $N = 9$  – кальдер Курильских островов. Анализ полученных данных (табл. 2) показал, что толщины магматических очагов разбиваются на две компактные совокупности  $\Delta h_{1kk}$  и  $\Delta h_{2kk}$ . К первой из них:

$$\Delta h_{1kk} = 1.05 \pm 0.1 \text{ км,} \quad (11)$$

относятся толщины магматических очагов, которые были определены на основании данных об объемах выброшенного на поверхность вулканического материала  $V_1$ . Ко второй:

$$\Delta h_{2kk} = 0.51 \pm 0.2 \text{ км,} \quad (12)$$

которые были определены пересчетом отложений на поверхности  $V_1$  к объему первичного магматического очага  $V_2$  – величине, которая равна объему опустошенного при извержении магматического очага (Новейший..., 2005).

Первое значение  $\Delta h_{1kk}$  (11) близко такому же «планетарному» значению (8):  $\Delta h_{1kk} \approx \Delta h_{nl}$ , что позволяет считать: толщины магматических очагов  $\Delta h_{1kk}$  плейстоцен-голоценовых Курило-Камчатских вулканов примерно равны таким же толщинам для совокупности извержений планеты  $\Delta h_{nl}$ .

Второе значение  $\Delta h_{2kk}$  (12) хорошо соответствует высотам бортов кальдер, образовавшихся при извержениях Курило-Камчатских вулканов  $\Delta h_{kk} = 0.54 \pm 0.2$  км (табл. 2):  $\Delta h_{2kk} \approx h_{kk}$ , что позволяет принять: вторая совокупность данных  $\Delta h_{2kk}$  определяет толщины опустошенных магматических очагов. При этом обе совокупности значений  $\Delta h_{1kk}$  и  $\Delta h_{2kk}$  не противоречат друг другу. Действительно, при примерно одинаковых поперечных размерах кальдер, приводимых разными авторами, объемы выброшенных на поверхность вулканических продуктов  $V_1$  примерно в два раза превышают объемы первичных магматических камер  $V_2$  (табл. 2).

Анализ данных (табл. 5), показывает, что толщины магматических очагов представляют собой опять достаточно компактную группу значений:  $\Delta h_{3k} = 0.34 \pm 0.1$  км, (13) и близкую величине  $\Delta h_{2kk}$ , так как  $V_3$ , по сути (Леонов, Гриб, 2004), являются близкими  $V_2$  по И.В. Мелекесцеву (Новейший..., 2005).

Таким образом, все совокупности полученных нами данных для толщин магматических очагов – для планеты, в целом,  $\Delta h_{nl}$  (8), для Курило-Камчатского региона  $\Delta h_{1kk}$  (11) и  $\Delta h_{2kk}$  (12), только для Камчатки  $\Delta h_{3k}$  (13) являются непротиворечивыми. Будем полагать, что  $V$  из работы (Spera et al., 1981) и  $V_1$  из работы (Новейший..., 2005), а также  $V_2$  из работы (Новейший..., 2005) и  $V_3$  из работы (Леонов, Гриб, 2004) попарно близки друг другу:  $V \approx V_1$ ,  $V_2 \approx V_3$ , объемы  $V_1$  и  $V_2$  соотносятся как  $V1 \approx 2V_2$ , а условия равенств  $\Delta h_{2kk} \approx h_{kk}$ ,  $\Delta h_{nl} \approx h_{nl}$  (10) и  $h_{kk}$ ,  $h_{kk} \approx h_{nl}$  являются

**Таблица 5.** Параметры кальдерообразующих плейстоцен-голоценовых извержений Камчатки ( $\kappa$ ) с использованием данных из работы (Леонов, Гриб, 2004).

Название кальдеры	Диаметр, км	Объем выброшенного материала, км <sup>3</sup>	Толщина магматического очага $\Delta h_{\kappa}$ , км
Однобокий	4×6	10	0.51
Карымская	5	5	0.25
Соболиный	9	33	0.52
Стена	12	33	0.29
Малый Семячик	7	6	0.16
Большой Семячик	10	42	0.54
Узон-Гейзерная депр.	9×18	46	0.32
Крашенинникова	10	10	0.13
Среднее значение (среднее квадратичное)			0.34 ± 0.14

для кальдерообразующих извержений очевидным вулканологическим критерием. Тогда для толщины магматического очага получаем четыре независимые оценки:  $\Delta h_1 = 0.5\Delta h_{нл} \approx 0.45$  км,  $\Delta h_2 = 0.5\Delta h_{1кк} \approx 0.53$  км,  $\Delta h_3 = \Delta h_{2кк} \approx 0.51$  км,  $\Delta h_4 = \Delta h_{3к} \approx 0.34$  км (Викулин, Акманова, 2014), которые, по сути, являются близкими и в совокупности, определяют толщину магматического очага, которую можно принять равной:

$$\Delta h = 1/4(\Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 + \Delta h_4) = 0.46 \pm 0.1 \text{ км} \quad (14)$$

Соотношение (14) получено на основании анализа разных выборок, которые включали данные о:

- планете в целом и конкретных регионах (Курило-Камчатская дуга в целом, и Камчатка и Курильские острова по отдельности);
- разных временных интервалах: олигоцен – для извержений вулканов Земли и плейстоцен-голоценовых – для извержений Курило-Камчатских вулканов;
- разных по геотектоническим обстановкам регионов;
- разных по типам и вулканов и их извержениях: Африка, Исландия, окраина Тихого океана и другие (табл. 3).

Это, в совокупности, позволяет малую толщину магматического очага, определенную для разных совокупностей вулканов: планеты, Курило-Камчатской дуги, Камчатки, считать, по сути, постоянной величиной, не зависящей от вулканического процесса.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные в работе исследования позволяют сделать вывод о существовании постоянной величины, определяемой отношением углов наклона двух самых общих распределений, определяющих особенности энергетики вулканического процесса – графика повторяемости извержений, и характерных пространственных размеров его источников – магматических очагов. Выявленный вулканический инвариант – толщина магматического очага, является

величиной постоянной и независимой от вулканического процесса. Анализ, проведенный на разных уровнях, планетарном и региональном (на примере Курило-Камчатской дуги), позволил определить толщину магматического очага, которая оказалась достаточно малой величиной, равной  $0.46 \pm 0.1$  км.

Вывод о постоянстве толщины магматического очага применим для достаточно сильных извержений, при которых объем выброшенного материала, составляет  $V \approx (\Delta h)^3 \approx 0.1$  км<sup>3</sup> и более, что соответствует индексу эксплозивности  $W = 4$  и более. К таким извержениям можно отнести, в том числе, и каждую из трех воронок на шлаковых конусах, образовавшихся в ходе Большого трещинного Толбачинского извержения в 1975 г. (БТТИ) (Большое..., 1984), что и объясняет сформулированный ранее вывод об отсутствии некоего особого класса кальдерообразующих извержений. Подтверждением такого вывода могут служить данные, полученные в работе (Викулин и др., 2012), согласно которым графики повторяемости извержений являются достаточно «гладкими», не содержащими «изломов», и углы их наклонов, независимо от вулканического региона, являются величиной постоянной –  $0.5 \pm 0.1$ . Этот вывод подтверждается и другими ранее полученными результатами, согласно которым большинство исследователей предлагали условно считать кальдерами образования с поперечником 2 км и более (Леонов, Гриб, 2004; Лучицкий, 1971; Макдональд, 1975; Рустамов, Тхостов, 1982). Графически это показано на рис. 1, на котором исходные данные (табл. 3–4) в окрестности точки  $S = 1$  км<sup>2</sup> определялись и как кальдеры и как крупные воронки на шлаковых конусах.

Согласно инструментальным геофизическим исследованиям, проведенным как в прошлом веке, так и в последнее десятилетие на Курило-Камчатских вулканах, их магматические очаги располагаются, как правило, на глубинах 5–30 км (Аносов и др., 1990; Балеста, 1981; Большое..., 1981; Действующие..., 1991а, 1991б; Ермаков, Штейнберг, 1999; Koulakov et al.,

2011), то есть в пределах земной коры, являющейся блоковой по своему строению. Поэтому толщина магматического очага, независимая от вулканического процесса, может определяться только геодинамическими движениями блоков земной коры.

Ранее в работах (Викулин, Иванчин, 2012; Иванчин и др., 2011; Ivanchin, Vikulin, 2012) была предложена модель магматического очага «тепловой взрыв», в которой пластическая деформация вдоль тонкослойных границ блоков достигает больших значений  $\varepsilon \approx 1$  и вне полос скольжения она близка к нулю  $\varepsilon \approx 0$ . В таких условиях в области, локализованной пластической деформации будет и максимальное тепловыделение. Термодинамический расчет такого очага показал, что в результате теплового расширения при локальных плавлениях, вокруг магматического очага создается дополнительное давление и за счет этого вокруг очага появляется поле упругих напряжений, энергия которого порядка  $10^{15}$  Дж/1 км<sup>3</sup> перегретой породы. Перегретые магматические очаги достаточно сильных ( $W \geq 4$ ) извержений по величине накопленной вокруг них упругой энергии оказываются близкими очагам наиболее крупных (протяженностью 100-200 км и более) землетрясений с магнитудами  $M = 8$  и более. «Энергетическая» близость магматических и сейсмических рядом расположенных очагов в рамках модели блоковой геосреды позволяет объяснить и взаимодействие вулканов между собой (миграцию вулканической активности) (Викулин и др., 2010; Vikulin et al., 2012) и взаимодействие вулканизма, сейсмичности и тектоники (Викулин, 2011; Викулин и др., 2012; Vikulin et al., 2013).

В соответствии с работой (Пейве, 1961): «... наиболее существенный вывод современной тектоники, который заставляет пересмотреть наши представления, заключается в том, что земная кора ... расчленена на блоки не только системой крутых или вертикальных тектонических поверхностей, но и поверхностей пологих или горизонтальных (стр. 37). ... Глубинные тангенциальные тектонические зоны, располагаясь в области больших давлений и температур, являются зонами «пластического течения»...и первичных магматических очагов (стр. 37). ... Главным источником этой энергии являются механические движения вещества земной коры» (стр. 50). Как видим, описанный ранее «тонкослойный» механизм пластического движения вдоль поверхностей блоков может быть применен и к тектоническим границам земной коры, вообще.

На возможность такого обобщения указывают и данные о трех рядом образовавшихся конусах Северного прорыва БТТИ (Камчатка), которые

мигрировали в ходе извержения в 1975 г. вдоль общей зоны конусов Толбачинского дола (Большое..., 1984), а также данные о мигрировавших вдоль долины Снейк Ривер (США) протяженностью около 500 км  $N = 8$  сильнейших ( $W \geq 6-7$ ) извержениях, в течение последних 16 млн. лет, с образованием кальдер с  $D \geq 10$  км (Короновский, 2012).

Из всех слоев в пределах верхней мантии только граница Мохоровичича достаточно уверенно выделяется для всех регионов Земли. Поэтому вывод о тонкослойной перегретой и постоянной по своей толщине природе переходного слоя, в первую очередь, может быть распространен именно на границу Мохоровичича.

Имеет ли верхняя мантия, расположенная ниже подошвы земной коры, блоковое строение, не известно. Вполне определенно можно судить лишь о блоковом строении земной коры. При  $p$ - $T$  условиях, которые реализуются на границе Мохоровичича, можно ожидать, что ниже границы земной коры геосреда может не являться блоковой. В том числе и потому, что вещество ниже границы Мохоровичича в значительной степени должно обладать свойством объемного (Леонов, 2008), а не сдвигового течения. Поэтому в свете ротационной механики блоковой геосреды (Викулин, 2011; Викулин, Иванчин, 2013б; Vikulin et al., 2013) и модели «теплого взрыва» (Викулин, Иванчин, 2012; Иванчин и др., 2011; Ivanchin, Vikulin, 2012) можно предположить, что подошва земной коры представляет собой фазовую поверхность, ниже которой геосреда не является блоковой, способной к сдвиговому течению, или является таковой, но в значительно меньшей степени, чем земная кора (Викулин, Иванчин, 2013а).

Таким образом, вывод о тонкослойном «блинообразном» магматическом очаге, толщина которого определяется свойствами земной коры, является, на наш взгляд, фундаментальным для вулканологии. Такой вывод позволяет в рамках ротационной модели (Викулин, 2011; Викулин, Иванчин, 2013б; Vikulin et al., 2013) вулканический процесс «состыковать» с представлениями о блоковой геосреде и волновом геодинамическом процессе.

Авторы признательны к.г.-м.н. В.Л. Леонову, к.г.-м.н. В.А. Ермакову и д.г.-м.н. И.В. Мелекесцеву, за многочисленные дискуссии и обсуждения затронутой в работе проблемы и за консультации по извержениям и природе магматических очагов и д.ф.-м.н. Н.И. Павленковой за обсуждение природы границы Мохоровичича.

#### Список литературы

Аносов Г.И., Аргентов В.В., Абдурахманов А.И. и др. Глубинное строение вулкана Уратман // Вул-

- канология и сейсмология. 1990. № 4. С. 85-91.
- Апродов В.А.* Вулканы. М.: Мысль, 1982. 367 стр.
- Арискин А.А., Бармина Г.С.* Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм. М.: Наука, 2000. 363 с.
- Балеста С.Т.* Земная кора и магматические очаги областей современного вулканизма. М.: Наука, 1981. 135 с.
- Болт Б.А., Хорн У.Л., Макдоналд Г.А., Скотт Р.Ф.* Геологические стихии. Землетрясения, цунами, извержения вулканом лавины, оползни, наводнения. М.: Мир, 1978. 440 с.
- Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка 1975-1976 гг. / Ред. С.А. Федотов. М.: Наука, 1984. 638 с.
- Бондаренко В.И.* Строение подводных кальдер по данным сейсмоакустического профилирования (на примере Курильской островной дуги). Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. М., 1990. 24 с.
- Бондаренко В.И., Рашидов В.А.* О возможной подводной вулканической активности в районе островов Черные Братья (Курильские острова) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2003. № 2. С. 80-88.
- Ванек Й., Кондорская Н.В., Христосков Л.* Магнитуда землетрясений в сейсмологической практике. Волны PV и PVs. София: Изд-во Болгарской Академии наук, 1980. 264 с.
- Викулин А.В.* Сейсмичность. Вулканизм. Геодинамика. Сборник трудов. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2011. 407 с.
- Викулин А.В., Акманова Д.Р.* Параметры интенсивных вулканических извержений и модель питающих их магматических очагов // Материалы конференции, посвящено Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 152-156. [http://www.kscnet.ru/ivs/publication/volc\\_day/2014/index.php](http://www.kscnet.ru/ivs/publication/volc_day/2014/index.php).
- Викулин А.В., Акманова Д.Р., Осипова Н.А.* Вулканизм как индикатор геодинамических процессов // Литосфера. 2010. № 3. С. 5-11.
- Викулин А.В., Иванчин А.Г.* Фазовый переход твердое тело – жидкость в блоковой геосреде как механизм извержения // Материалы конференции, посвящено Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2012. С. 107-111.
- Викулин А.В., Иванчин А.Г.* О природе Мохо как фазовой границе раздела между блоковой земной корой и неблоковой верхней мантией // Материалы 45 Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2013а. С. 38-42.
- Викулин А.В., Иванчин А.Г.* О современной концепции блочно-иерархического строения геосреды и некоторых ее следствиях в области наук о Земле // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых (ФТПРПИ). 2013б. № 3. С. 67-84.
- Викулин А.В., Мелекесцев И.В., Гусяков В.К. и др.* Комплексная (катастрофические вулканические + сильнейшие сейсмические события) электронная база данных как основа для модифицированной геодинамической парадигмы (на примере Пацифики) // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Вторая региональная научно-техническая конференция, 11-17 октября 2009 г. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 16-19.
- Викулин А.В., Мелекесцев И.В., Акманова Д.Р. и др.* Информационно-вычислительная система моделирования сейсмического и вулканического процессов как основа изучения волновых геодинамических явлений // Вычислительные технологии. 2012. Т. 17. № 3. С. 34-54.
- Викулин А.В., Мелекесцев И.В., Акманова Д.Р. и др.* Каталог сейсмических и вулканических событий // База данных. № гос. рег. 2014620569 от 17.04.2014.
- Влодавец В.И.* Вулканы Земли. М.: Наука, 1973. 168 с.
- Влодавец В.И.* Справочник по вулканологии. М.: Наука, 1984. 340 с.
- Геологический словарь в 2-х т. Т. 1. М.: Недра, 1978. 456 с.
- Геологический словарь в 3-х т. Т. 2. СПб: ВСЕГЕИ, 2011. 480 с.
- Горшков Г. С.* Каталог действующих вулканов Курильских островов // Бюллетень вулканологических станций. 1957. № 25. С. 96-178.
- Горшков Г. С.* Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 288 с.
- Гриб Е.Н., Леонов В.Л.* Кальдера Карымская: строение и состав пирокластический потоков // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 1. Вып. 17. С. 61-76.
- Гущенко И.И.* Извержения вулканов мира. М.: Наука, 1979. 676 с.
- Действующие вулканы Камчатки. В 2-х Т. / Ред. С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков. М.: Наука, 1991а. Т. 1. 320 с.
- Действующие вулканы Камчатки. В 2-х Т. / Ред. С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков. М.: Наука, 1991б. Т. 2. 415 с.
- Ермаков В.А.* Формационное расчленение четвертичных вулканических пород. М.: Недра, 1977. 223 с.
- Ермаков В.А., Штейнберг Г.С.* Вулкан Кудрявый и эволюция кальдеры Медвежья (о-в Итуруп, Курильские о-ва) // Вулканология и сейсмология. 1999. № 3. С. 19-40.
- Иванчин А.Г., Викулин А.В., Фадин В.В.* Ротаци-



- онная модель теплового разогрева и проблема вулканических очагов // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2011. С. 302-306.
- Зубин М.И., Иванов Б.В., Штейнберг Г.С.* Глубинное строение Карымского вулкана на Камчатке и некоторые вопросы генезиса кальдер // Геология и геофизика. 1971. № 1. С. 73-81.
- Каталог действующих вулканов СССР // Бюллетень вулканологической станции. 1957. № 25. 179 с.
- Кирьянов В.Ю.* Современный вулканизм. Учебное пособие. СПб: «LITERA SCRIPTA», 2009. 332 с.
- Козлов Д.Н.* Новые данные о внутрикальдерном озере Черное (о. Онекотан) // Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов Восточной Азии: Всероссийская научная конференция. Благовещенск: ИГиП ДВО РАН, 2010. С. 161-166.
- Козлов Д.Н., Рашидов В.А., Коротеев И.Г.* Мофрология бухты Броутона (о. Симушир, Курильские острова) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2. Вып. 20. С. 71-77.
- Кольская сверхглубокая. Исследования глубинного строения континентальной коры с помощью бурения Кольской сверхглубокой скважины / Ред. Козловский Е.А. М.: Недра, 1984. 490 с.
- Короновский Н.* Йеллоустонский супервулкан // Наука и жизнь. 2012. № 5. С. 110-113.
- Леонов М.Г.* Тектоника консолидированной коры. М.: Наука, 2008. 457 с.
- Леонов В.Л., Биндеман И.Н., Rogozin A.H.* Новые данные о вулканизме, предварявшем суперизвержение и формирование кальдеры Карымшина (Южная Камчатка) // Материалы конференции, посвященной Дню Вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2012. С. 56-63.
- Леонов В.Л., Гриб Е.Н.* Структурные позиции и вулканизм четвертичных кальдер Камчатки. Владивосток: Дальнаука, 2004. 189 с.
- Леонов В.Л., Rogozin A.H.* Геологическое строение южного борта кальдеры Половинка и история ее развития (Карымский вулканический центр, Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2005. № 5. С. 103-112.
- Луцицкий И.В.* Основы палеовулканологии. Т. 1. М.: Наука, 1971. 480 с.
- Макдональд Г.* Вулканы. М.: Мир, 1975. 432 с.
- Мархинин Е.К. Роль вулканизма в формировании земной коры на примере Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. С. 77-79.
- Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В. и др.* «Век» вулканических катастроф в раннем голоцене Курило-Камчатской области // Глобальные изменения природной среды / Ред. Л.Н. Добрецов, В.И. Коваленко. Новосибирск: СО РАН НИЦ ОИГГМ, 1998. С. 146-152.
- Новейший и современный вулканизм на территории России / Под ред. Н.П. Лаврова. М.: Наука, 2005. 604 с.
- Опарин В.Н., Танайно А.С., Юшкин В.Ф.* О дискретных свойствах объектов геосреды и их каноническом представлении // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2007. № 3. С. 6-24.
- Пейве А.В.* Тектоника и магматизм // Изв. АН СССР. Серия геол. 1961. № 3. С. 36-54.
- Планета Земля. Энциклопедический справочник. Том «Тектоника и геодинамика» / Ред. Л.И. Красный, О.В. Петров, Б.А. Блюман. СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. 652 с.
- Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги / Отв. ред. Пушаровский Ю.М. М.: Наука, 1992. 528 с.
- Рустамов М.И., Тхостов Т.М.* О происхождении и классификации кальдер // Вулканология и сейсмология. 1982. № 5. С. 95-100.
- Рэдулеску Д.П.* Вулканы. Сегодня и в геологическом прошлом. М.: Недра, 1979. 255 с.
- Садовский М.А.* Избранные труды: геофизика и физика взрыва. М.: Наука, 2004. 440 с.
- Соболев А.В.* Проблемы образования и эволюции мантийных магм. Автореф. дисс. док-ра геол.-мин. наук. М., 1997. 50 с.
- Федотов С.А.* Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов. М.: Наука, 2006. 455 с.
- Федотов С.А., Жаринов Н.А., Гонтовая Л.И.* Магматическая питающая система Ключевской группы вулканов (Камчатка) по данным об ее извержениях, землетрясениях деформациях и глубинном строении // Вулканология и сейсмология. 2010. № 1. С. 3-35.
- Френкель М.Я., Ярошевский А.А., Арискин А.А. и др.* Динамика внутрикамерной дифференциации базальтовых магм. М.: Наука, 1988. 216 с.
- Хубуная С.А., Гонтовая Л.И., Соболев А.В. и др.* Магматические очаги под Ключевской группой вулканов (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2007. № 2. С. 32-54.
- Эрлих Э.Н.* Новые данные о вулкано-тектонических структурах Камчатки и вопросы развития четвертичного вулканизма // Геотектоника. 1966. № 6. С. 48-63.
- Annen C., Blundy J.D., Sparks R.S.* The Genesis of Intermediate and Silicic Magmas in Deep Crustal Hot Zones // Journal of Petrology Advance Access published. 2005. P. 1-35. ???
- CCDB: Collapse Caldera Database (<http://www.gvbcsc.es/CCDB/>)

- Ivanchin A.G., Vikulin A.V.* Solid-liquid phase transition as a mechanism of volcano eruption // Cornell University. Library Physics. 2012. 8 p. <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1206.5992.pdf>
- Koulakov I., Gordeev E.I., Dobretsov N.L. et al.* Feeding paths of the Kluchevskoy volcano group (Kamchatka) from the results local earthquake tomography // Geophysical research letters. 2011. V. 1. 38. LXXXXX. P. 1-6.
- Newhall Ch.G., Dzurisin D.* Historical unrest at large calderas of the world // U.S. Geological Survey Bulletin 1855. V. 1, V. 2. 1988. 1108 p.
- Sapper K.* Der Katalog Geschichtlichen Vulcanausbruche. Strassburg, 1917. 358 p.
- Siebert L., Simkin T., Kimberly P.* Volcanoes of the World. Third edition. Smithsonian Institution. Washington DC. University of California Press., 2010. 568 p.
- Spera F.J., Crips J.A.* Eruption volume, periodicity, and caldera area: relationships and inferences on development of compositional zonation in silicic magma chambers // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1981. V. 11. № 1-2. P. 169-187.
- Vikulin A.V., Akmanova D.R., Vikulina S.A. et al.* Migration of seismic and volcanic activity as display of wave geodynamic process // Geodynamics&Tectonophysics. 2012. V. 3. № 1. P. 1-18.
- Vikulin A.V., Tveritinova T.Yu., Ivanchin A.G.* Wave moment geodynamics // Acta Geophysica. 2013. V. 61. № 2. P. 245-263.
- Williams H.* Calderas and Their origin // Bulletin of the Department of Geological Sciences. University of California Publications. 1941. V. 25. № 6. P. 239-346.

## MAGMA CHAMBER AS A PROPERTY OF THE EARTH CRUST

**A.V. Vikulin, D.R. Akmanova**

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006*

This paper proves the hypothesis of a constant and independent of the volcanic process thickness of the magma chamber as a property of the Earth crust. This idea is based on the most common distributions describing volcanic eruptions (recurrence curves, the squares, volumes of erupted material). The hypothesis is discussed in relation with the concept of block geomedium and its wave geodynamic movements.

*Keywords: magma chamber, Earth crust, block, caldera, Moho.*

## О СТАТЬЕ А.В. ВИКУЛИНА, Д.Р. АКМАНОВОЙ «МАГМАТИЧЕСКИЙ ОЧАГ КАК СВОЙСТВО ЗЕМНОЙ КОРЫ»

Будучи одним из рецензентов статьи А.В. Викулина и Д.Р. Акмановой «Магматический очаг как свойство земной коры» я раньше других читателей смог с ней внимательно ознакомиться.

Статья посвящена очень важной для вулканологии и однозначно пока не решенной проблеме магматических очагов: происхождению их магмы, параметрам, неоднозначности «магматической» терминологии.

Действительно, такая проблема не только давно «созрела», но и «перезрела». Поэтому появление статьи на подобную тематику весьма актуально. Вместе с тем, при прочтении статьи у меня возник ряд вопросов, вызванных спорными моментами, на которые хочется обратить внимание читателей журнала.

По сути дела, главным «доказательными» элементами в статье являются не прошедшие специальный отбор и ревизию материалы по кальдерам и воронкам на шлаковых конусах. Основной аргумент в пользу подобного решения – следующий: «что имеем, то и имеем».

Сначала о воронках (кратерах). По современным представлениям (и никто в этом не сомневается), подавляющее количество кратеров приурочено к вулканическим постройкам (наземным и подводным) и прямого отношения к параметрам и типам магматических очагов в земной коре не имеет. Тем более что многие кратеры возникли в результате фреатических взрывов, вообще не связанных с магматическими очагами.

В меньшей степени это касается кальдер и ассоциирующейся с ними пироклаستيки. Но и здесь есть серьезные претензии. Во-первых, высота выраженных в уступе рельефе уступов кальдер – параметр чисто случайный, никак не связанный с характеристиками магматических очагов. Она зависит от степени заполненности (погребенности) полостей кальдер, их возраста, стойкости к процессам денудации слагающих эти уступы пород, климатических условий и многих иных причин, непосредственного отношения к магматическим очагам не имеющих. Во-вторых, нельзя напрямую использовать диаметры кальдер. Как правило, в работах приводятся размеры кальдер как геоморфологического признака, по бровке кальдерного уступа, позволяющего оценить параметры подвергшихся разрушению участков земной поверхности. Для определения размеров и конфигурации магмати-

ческого очага в плане правильнее брать диаметр и площадь обрушенного участка земной коры по диаметру кольцевого разлома на дне кальдеры у подножия уступа, а для оценки объема магмы – первичный объем полости кальдеры, который чаще всего неизвестен.

Объем изверженной пироклаستيки кальдерообразующего извержения надо обязательно привести к объему магмы с объемным весом, соответствующим ее составу. Как правило, объемный вес магмы разного состава ( $2.3-2.5 \text{ г/см}^3$ ) в 2-5 раз меньше объемного веса свежей изверженной пироклаستيки ( $0.5-1.3 \text{ г/см}^3$ ) кальдерообразующих извержений.

Нельзя одновременно использовать для корректного решения поставленной проблемы кальдеры разных типов и происхождения: гавайский тип, тип Кракотау и др.

Кроме того, при образовании кальдер происходит выброс только подготовленного к извержению ювенильного вещества, большая часть которого остается на глубине и после извержения. Свидетельство тому – длительно существующие кальдерные комплексы с кальдерами разного размера и возраста, а также вскрытые большеобъемные магматические очаги денудированных палеозойских и более древних кальдер. Оставшиеся крупные (многие сотни  $\text{км}^3$  и более) магматические очаги обнаружены геологическими (бурение) и комплексными геофизическими методами при исследовании выраженных в рельефе кальдер кайнозойского возраста в Северной Америке, Японии, Италии, Новой Зеландии. И мощности пород таких очагов далеко неодинаковы.

В статье не обсуждается колоссальная разница (0.004 и 4.9 км) в рассчитанной авторами толщине магматических очагов. Следует отметить, что само выражение «толщина магматического очага» является некорректным. Наверное, более логичным, с геологической точки зрения, было бы выражение «мощность магматического очага».

Не совсем адекватной для однозначного решения поставленной задачи о природе магматических очагов представляется и использованная авторами методика. В предельно утрированном и упрощенном виде эту задачу и, преимущественно, статистический способ ее решения можно сформулировать в следующем виде. Надо по объему излившейся воды определить статистическим методом местонахождение,

тип и размер водоема (озеро, река, подрусловый сток и т.д.), который служит источником питания водопроводной сети, открывая на разное время, через разные промежутки времени, и закрывая краны — аналоги действующих вулканических аппаратов. Однако даже в этом случае можно в лучшем определить объем воды в источнике, если она перестала течь из крана, а во всех остальных случаях объем вытекшей воды всегда меньше, чем в водоеме. С магматическими очагами задача несравнимо труднее.

Хочется посоветовать авторам при своих дальнейших исследованиях не ограничиваться только готовой информацией из опубликованных работ, которая уже была использована

для решения самых разнообразных задач, но трансформировать эту информацию в качестве доказательной базы для успешного решения проблемы, разрабатываемой самими авторами.

Вместе с тем, считаю, что рассматриваемая статья может стать отправной точкой для развертывания широкой дискуссии о проблеме изучения магматических очагов.

*И.В. Мелекесцев  
зав. лабораторией динамической  
вулканологии ИВиС ДВО РАН,  
доктор геол.-мин. наук*