



УДК 550.34+551.24

А. В. Викулин

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

Кальдеры обрушения — магматические очаги — строение коры — флюид

Анализируются данные о кальдерообразующих извержениях Земли и сильных современных извержениях вулканов Курило-Камчатской дуги. Показывается, что толщины магматических очагов являются величиной постоянной около 1 км много меньшей их поперечных размеров (диаметров кальдер). В рамках концепции блоковой геосреды формулируется вывод, согласно которому магматические очаги являются независимыми от вулканического процесса образования, отражающими состояние земной коры и представляющими тонкие прослойки между слоями земной коры. В рамках таких представлений становятся ненужными (маловероятными) модели подъёма магм из глубин мантии и ядра и представления о флюиде как движущей силе процесса магмообразования. Обсуждается природа границ слоёв земной коры и верхней мантии.

О толщине магматических очагов

Кальдеры обрушения. Кальдера обрушения является следствием опустошения магматического очага в результате извержения [18, 20]. Поэтому, если известны площадь кальдеры S и объём изверженного материала V , то вертикальный размер (толщину) магматического очага Δh можно определить из выражения:

$$\Delta h = V/S. \quad (1)$$

Толщины магматических очагов вулканов Земли. В работе [26] приведены данные о 76 кальдерообразующих извержениях вулканов планеты за последние 27 млн лет с индексами эксплозивности $W = 4 - 8$, площадями кальдер $S = 1 - 4650 \text{ км}^2$, их протяженностями (диаметрами) $D = 3 - 90 \text{ км}$ и объёмами изверженных пород $V = 0,3 - 3000 \text{ км}^3$. Зависимости $S(V)$ и/или $V(S)$ не выявляются, что указывает на их достаточно равномерные распределения. Определённые по этим данным по формуле (1) толщины магматических очагов, питавших извержения, расположены в пределах $\Delta h = 0,004 - 6 \text{ км}$. Зависимости $\Delta h(S)$ и $\Delta h(V)$ также не выявляются, что указывает на отсутствие зависимостей толщины магматического очага от параметров извержения. При этом определенное по всем данным среднее значение толщины магматического очага оказалось равным:

$$\Delta h_{\text{ср}} = 1,4 \pm 1,0 \text{ км}. \quad (2)$$

Средний диаметр кальдер, определённый по этим данным, составляет $D_{\text{ср}} = 26 \text{ км}$. Как видим, для всего объёма данных выполняется следующее сильное неравенство:

$$D_{\text{ср}} \gg \Delta h_{\text{ср}}, \quad (3)$$

которое указывает на вполне определённую геометрию магматического очага, а именно: его объём, по сути, представляет собой достаточно тонкий слой (блин).

Рассмотренные выше данные относятся к *разному* типу вулканов и их извержениям, происходившим в *разных* регионах Земли с *разными* геотектоническими условиями (обстановками). Поэтому соотношения (2) и (3) позволяют высказать предположение о том, что тонкослойные с постоянной толщиной магматические очаги, питавшие кальдерообразующие извержения, никак не зависят от самого вулканического процесса.

Вулканические формы современных курило-камчатских вулканов

Закон повторяемости извержений. Составлен наиболее полный список извержений всех вулканов Земли за последние 12 тыс. лет [5, 27]. Для $N = 676$ извержений 70 вулканов Курило-Камчатской дуги из этого списка, извергавшихся за последние 9,5 тыс. лет, в интервале индексов эксплозивности $2 \leq W \leq 7$ был построен график повторяемости: $\text{Lg } N = 3,60 - (0,49 \pm 0,06)W$. С учётом взаимосвязи между W и объёмом изверженного материала V : $W = \text{Lg } V [\text{км}^3] + 5$, закон повторяемости извержений по величинам их объёмов переписывается в виде:

$$\text{Lg } N = 1,15 - (0,49 \pm 0,06)\text{Lg } V. \quad (4)$$

Распределение вулканических форм по их сечениям (площадям). Данные о 287 вулканических современных формах (вершинах конусов и кальдер) Камчатки (109) и Курильских островов (178) использовались из [16, 17]. С использованием этих данных методом средних квадратов было построено следующее распределение чисел вулканических форм N по их сечениям S :

$$\text{Lg } N = (2,32 \pm 0,16) - (0,47 \pm 0,14)\text{Lg } S, \quad (5)$$

где $[S] = \text{км}^2$. Видим, что углы наклонов распределений по объёмам V (4) и площадям соответствующих им кальдер S (5) практически совпадают, что позволяет сформулировать следующий вывод: отношение объёма изверженного материала к площади образовавшейся вулканической формы (конуса и/или кальдеры) является величиной постоянной, не зависящей от типа извержения:

$$V/S \approx \text{const}. \quad (6)$$

Покажем справедливость соотношения (6) для достаточно сильных извержений камчатских и курильских вулканов, для каждого из которых известны и площадь образовавшейся кальдеры и объём выброшенного материала [7].

Камчатка. С помощью соотношения (1) были определены толщины для 18 ранее извергавшихся вулканов. Все значения оказались заключёнными в пределах одного порядка величины: от 0,1 км (Мало-Семячинская депрессия, $S = 19 \times 13 \text{ км}^2$, $V = 20 - 30 \text{ км}^3$) до 2,1 км (Горелый, $S = 10^5 \text{ км}^2$, $V = 200 - 250 \text{ км}^3$, составляя, в среднем:

$$\Delta h_{\text{Кам}} = 0,8 \pm 0,4 \text{ км}. \quad (7)$$

При этом для пяти извержений *одного вулкана* Ксудач (I-V), толщины очага изменялись в пределах 0,3–2,1 км, составляя, в среднем:

$$\Delta h_{\text{Кс}} = 1,0 \pm 0,7 \text{ км}. \quad (8)$$

Для всех рассмотренных 18 извержений камчатских вулканов сечения образовавшихся кальдер, в среднем, составили $S_{\text{ср}} = 62 \text{ км}^2$, при среднем поперечном её размере (диаметре) $D_{\text{ср}} = 8 \pm 4 \text{ км}$.

Курилы. Аналогичным образом рассчитывались толщины магматических очагов 11 извержений вулканов Курильских островов. Толщины очагов изменялись в пределах $\Delta h_{\text{min-max}} = (0,8(\text{Немо III}) - 3,3(\text{Львиная пасть})) \text{ км}$, составляя, в среднем:

$$\Delta h_{\text{Кур}} = 1,4 \pm 0,5 \text{ км}. \quad (9)$$

При этом для трёх извержений *одного вулкана* Немо (I-III) толщины очага изменялись в пределах 0,8–1,8 км, составляя, в среднем:

$$\Delta h_{\text{Немо}} = 1,2 \pm 0,3 \text{ км}. \quad (10)$$

Для 11 извержений вулканов Курильских островов сечения образовавшихся кальдер, в среднем, составили $S_{\text{ср}} = 49 \text{ км}^2$, при среднем поперечном размере (диаметре) $D_{\text{ср}} = 8 \pm 2 \text{ км}$, как и для Камчатки.

Данные для современных извержений курило-камчатских вулканов подтверждают вывод, сформулированный выше для извержений вулканов Земли: толщина магматического очага есть величина постоянная и по своей величине значительно меньше поперечных размеров (диаметров) образовавшихся кальдер.

Магматический очаг — состояние земной коры. Все приведенные выше данные (2), (6) — (10), в совокупности, показывают, что толщины магматических очагов, определённые по разным выборкам, изменяются весьма слабо и не зависят от вулканического процесса, равняясь, в среднем:

$$\Delta h = 1,2 \pm 0,6 \text{ км}. \quad (11)$$

В соответствии с имеющимися данными разной надёжности магматические очаги под вулканами Земли по геофизическим данным располагаются на глубинах 0–60 км в пределах земной коры и верхней мантии [18, 20]. Детальные геофизические наблюдения, проведённые на курило-камчатских вулканах, извергавшихся в последние десятилетия, показывают [1, 2, 13], что магматические очаги, как правило, располагаются в более узком диапазоне глубин в пределах коры на глубинах 5–20 км. Поэтому полученный в этой работе результат (11), по сути, определяет магматические очаги как вполне определенное состояние земной коры.

Магматический очаг как тонкий прослой земной коры

Вулканические комплексы. В соответствии с данными [16, 17] современный (до 200 тыс. лет) вулканический пояс Восточной Камчатки представлен крупными вулканическими центрами, с которыми связаны комплексы кальдер, обширные поля пемз и игнимбригов и высокотемпературные гидротермальные системы. Например, часть этого пояса общей протяжённостью 100–150 км представлена четырьмя следующими друг за другом Карымской, Большесемячинский, Узон-Гейзерной и Крашенинникова практически сливающимися между собой вулканическими системами, в каждой из которых отмечено 7–10 и более кальдер при её среднем диаметре около $D_{\text{ср}} \approx 8 \text{ км}$ [17]. Такие данные при тонкослойном магматическом очаге позволяют принять, что все три вулканических комплекса, скорее всего, имеет единый магматический очаг, протяжённость которого вдоль дуги составляет не менее 150 км. По сути, к близкому выводу пришли и авторы работы [17]: «причины кальдерообразующих процессов имеют не локальный, а региональный характер».

Близкие, по сути, комплексы вулканов выделены И. В. Мелекесцевым и для Курильских островов [16]: вулканы Заварицкого — Пик Прево — кальдера Броутона на о. Симушир и вулканы Менделеева — Головнина на о. Кунашир. Комплексы вулканов выделены и в пределах других регионов, например: совокупность кальдер в долине Снейк Ривер и её продолжении на юго-запад общей протяжённостью около 500 км [14], цепочка вулканов Гавайских островов, протягивающаяся вдоль центральной части Тихого океана на 800–1000 км [20] и др. [18]. Поэтому сформулированный выше вывод о едином магматическом очаге для всего вулканического комплекса является достаточно общим и его

можно считать справедливым, в целом, для многих, возможно всех, вулканически активных регионов Земли.

Курило-Камчатская дуга. Вывод о едином магматическом очаге для всего вулканического комплекса можно распространить на всю Курило-Камчатскую дугу, в целом. Действительно, диаметры кальдер достигают значительных размеров $D = 20 - 25$ км (Курильское озеро — Ильинская и Стены Соболиного на Камчатке; Севергина и Простор на Курилах) [16, 17] и даже $D = 50 - 60$ км (Карымско-Семячинская депрессия) [17, с. 13] при средних расстояниях между центрами отдельно взятых вулканов около 20 км [23].

Таким образом, в соответствии с приведёнными данными, под всеми курило-камчатскими вулканами может существовать единый тонкослойный с постоянной толщиной около 1 км магматический очаг.

Движения окраины Тихого океана. Вращение тихоокеанской плиты в течение последних 40 млн лет сопровождалось пятью перестройками регионального поля напряжений, которые характеризовались большими изменениями его величины и ориентации: плита совершала знакопеременные вращения с амплитудой до 10 градусов и величиной перемещения вдоль границы до нескольких сотен километров [21]. Используя известные данные о локализации сдвиговых напряжений вблизи границ мезоструктур и экспоненциальной зависимости скорости пластической деформации от напряжений и температуры, были смоделированы такие интенсивные движения блоковой геосреды в районе окраины Тихого океана [6, 7]. Проведённые нами оценки показали, что такое интенсивное движение, которое в окрестности тихоокеанской плиты реализуется в течение продолжительной геологической эпохи, могло привести к образованию достаточно протяжённых областей перегретого в результате пластической деформации вещества литосферы — «зародышей» вулканических островных дуг [12].

Модель магматического очага. Предложена модель магматического очага с пластическим течением [6, 12]. Суть модели сводится к следующему. В результате теплового расширения при локальных плавнениях, вокруг магматического очага создаётся поле упругих напряжений и за счёт этого появляется дополнительное давление. Под действием такого давления «твёрдое» вещество очага оказывается в перегретом (нагретом выше точки плавления) состоянии и, следовательно, способно и отражать и пропускать сквозь себя объёмные сейсмические волны. Расчёты показывают, что созданная дополнительным давлением энергия упругого поля вокруг такого «твердотельного» очага порядка 10^{15} Дж на 1 км^3 перегретой породы. Как видим, по величине упругой энергии перегретые «твердотельные» магматические очаги близки очагам наиболее сильных землетрясений с магнитудами $M = 8$ и более,

что, в принципе, позволяет в рамках модели блоковой геосреды объяснить и взаимодействие вулканов между собой (миграцию вулканической активности [5]) и взаимодействие вулканизма и сейсмичности [4].

Обсуждение результатов

1. Полученные данные позволяют предложить такую модель магматического очага, которая отражает вполне определенное состояние земной коры. В рамках модели блоковой геосреды такое состояние определяется существованием тонких по толщине, порядка 1 км, прослоев «твёрдого» перегретого вещества, расположенных между слоями земной коры и протягивающихся вдоль всех островных дуг и континентальных окраин Тихого океана. Например, вдоль границы между кристаллическим фундаментом и осадочным слоем, которая на Камчатке располагается на глубине 5–7 км [1, 2]. Такая тонкая твёрдая перегретая прослойка при локальном снятии давления может выступить в качестве магматического очага, питающего либо вновь образованный в месте снятия давления вулкан (например, Анюйский на Чукотке [17, с. 75], трещинный Толбачинский в 1975–1976 гг. [1, 2] и в 2012 г. на Камчатке), либо уже существующий.

В рамках такой модели достаточно просто объясняется миграция вулканической активности как вдоль отдельно взятого вулканического комплекса на Камчатке [16], вдоль Гавайских островов [20] и равнины Снейк Ривер [14], так и вдоль отдельно взятых вулканических дуг и, в целом, тектонических регионов [27]. Миграция вулканической активности в рамках такого подхода не есть перетекание магматического вещества, как полагают в настоящее время, а, как и миграция сейсмической активности, по сути, является миграцией упругих напряжений, осуществляемой посредством медленных ротационных волн [4, с. 124–136].

Именно в трении вдоль поверхностей блоков и плит и, как результат, в переходе энергии упругой деформации в теплоту плавления (в нашем случае — перегрева), видел основной источник горообразования П. Н. Кропоткин [15].

Проведённые оценки показали [5], что при ротационном блоковом подходе к задачам вулканологии и геодинамики не требуется привлекать широко распространённые в настоящее время модели подъёма магм с глубин мантии и ядра. Частичное плавление, повышение давления, перегрев твёрдого вещества в прослойках за счёт пластической деформации, происходящей вдоль границ блоков и слоёв земной коры при достаточно интенсивном его движении, может приводить к появлению значительных полей упругих деформаций и, как следствие, к миграции вулканической активности и её взаимодействию с сейсмичностью.

В рамках развиваемых автором с коллегами [3–7, 27] блоковых представлений о геосреде и полученных выше данных о магматическом очаге как

тонком прослое земной коры достаточно просто объясняются так называемые палингенные магматические очаги [11] и извержения внутриплитных вулканов, например, Анюйского на Чукотке [18, с. 75]. Г. Макдональд [19, с. 370] считал маловероятным вывод о том, что магматический очаг является продолжением крупного тела жидкой магмы. Веские соображения в пользу образования жидких силикатных расплавов в пределах коры приведены В. И. Луцицким [17, с. 188–189].

2. В рамках блоковых представлений о геосреде отпадает и необходимость привлечения понятия флюида как движущей силы процесса магмообразования.

Согласно геологическому словарю 1971 г. термин флюид не имеет строго определённого значения. Действительно, из определений терминов «флюид рудоносный», «флюидалный» и «флюидизация» можно видеть, что понятие флюида включает в себя все агрегатные состояния (твёрдое, жидкое, газообразное), изотропию и анизотропию, может оказаться связанным с любым движением любого компонента геосреды или сам может инициировать движение любого компонента среды. Как видим, понятие флюида поистине всеобъемлющее. И в научных статьях и в докладах на различных мероприятиях авторы часто употребляют этот термин. Дискуссии по употреблению этого термина, как правило, не возникают. Это и понятно, у каждого свои представления о флюиде и спорить здесь бессмысленно. Часто авторы прячут за этот термин и то, что они и сами не понимают, и иногда делают они это вполне сознательно.

И абсолютно закреплено такое всеобъемлющее значение флюида для геологических процессов в последнем третьем трехтомном Геологическом словаре, изданном в 2010–2011 гг. [9]: «флюид — термин свободного пользования, обозначающий любые текучие вещества» (выделено — А.В.).

Близкий по своей неопределённости термин есть и в физике — эфир. Обзор развития концепции эфира см., например, в [3]. Впервые достаточно определено понятие эфира как «апейрон» — вечная неопределённая материя, порождающая бесконечное многообразие сущего, было сформулировано Анаксимандром в VI в. до н. э. Для обоснования делимости вещества Бруно ввел представление о существовании между атомами эфира (XV в.). Бойль пустое пространство назвал вакуумом (1654 г.) и пытался выяснить остаётся ли в вакууме эфир при откачивании из сосуда воздух (1669 г.). Гипотезу эфира — абсолютного пространства, впервые высказал Ньютон (1672 г.). У Гюйгенса световые волны распространяются в чрезвычайно тонкой материи — эфире (1690 г.). У Эйлера эфир уже менее плотный, чем материя, но более упругий. В 19 и 20 вв. все исследователи, так или иначе, вынуждены были привлекать к рассмотрению представления об эфире. Эфир по Френелю — сплошная

упругая среда, по Фарадею — совокупность силовых линий, по Максвеллу — переносчик близкодействия, по Стоксу — увлекается Землёй, по Герцу — полностью захватывается материей, в то время как по Френелю — абсолютно неподвижен. И Ньютон и Эйнштейн самым кардинальным образом неоднократно меняли свои позиции в отношении эфира, то признавали его, то полностью отвергали. В настоящее время вопрос об эфире и/или вакууме полностью так и не решен. Имеется мнение, что «согласно теории Эйнштейна физический вакуум — это пустое (без материи) пространство-время, обладающее упругими свойствами. Эти свойства проявляются тогда, когда в пустое пространство помещается некая масса» [24, с. 22]. И, тем не менее, представления об эфире на протяжении всех 28 веков оказались исключительно плодотворными для развития представлений в разных разделах физики.

Проведенная аналогия показывает наличие у флюида, по сути, таких же важных не зависящих от свойств геосреды пространственно-временных свойств, как и у эфира-вакуума. Будем надеяться, что с развитием представлений о геосреде, как о блоковой субстанции, и в геологическое понятие флюида, введенного в науку не так давно, в XVII в. [9], со временем, как и в понятия эфир → вакуум в физике, будут вноситься более определённые геофизические свойства.

Представляется, что в рамках блоковой геосреды и описанной выше модели магматического очага как тонкого твёрдого перегретого прослоя земной коры, надобность в представлении о флюиде как движущей силе процесса магмообразования, отпадает: гипотетический флюид можно заменить вполне конкретными упругими напряжениями, переносимыми посредством медленных ротационных волн.

3. Полученные выше данные о природе магматического очага как тонкого порядка 1 км прослоя перегретого твёрдого (пропускающего объёмные волны) вещества между слоями коры под отдельными вулканами, их комплексами (объединениями в группы), вулканическими дугами и, в целом, тектоническими поясами, очевидно, могут быть распространены на земную кору и верхнюю мантию всей Земли [7]. И такой подход к природе границы Мохо оказался близким модели [22].

4. К проблемам термики земли и «горячих точек» [19] возможен подход с принципиально новых позиций [5]. Во-первых, такие «тепловые» объекты можно моделировать с помощью достаточно универсального механизма, в безразмерном виде не содержащего никаких параметров рассматриваемой задачи. Во-вторых, горячие точки (они же «мигрирующие») и вулканы Гавайских островов [20] и кальдеры долины Снейк Ривер [14]) могут быть не результатом выхода на поверхность земной коры глубинного тепла, как принято считать, а зонами повышенной геодинамической активности, мигрирующие вдоль прослоев коры и окружающих их

упругих полей со скоростями медленных ротационных волн. В пределах таких прослоев кинетическая энергия вращения отдельных блоков и плит земной коры и всей Земли в целом выделяется не только при землетрясениях, извержениях вулканов и движениях тектонических плит. Такая энергия выделяется и при генерации тепла, перераспределяемого внутри Земли и выносимого на её поверхность, в том числе и с помощью описанного выше механизма ротационных волн.

Список литературы

1. Аносов Г. И., Балеста С. Т., Утнасин В. К. Особенности сейсмических моделей земной коры под вулканами // Вулканизм и геодинамика. М.: Наука, 1977. С. 115-122.
2. Балеста С. Т. Земная кора и магматические очаги областей современного вулканизма. М.: Наука, 1981. 135 с.
3. Викулин А. В. Мир вихревых движений. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2008. 230 с.
4. Викулин А. В. Сейсмичность. Вулканизм. Геодинамика. Сборник трудов. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2011. 463 с.
5. 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. Том. 17. № 3. С. 34-54.
6. Викулин А. В., Иванчин А. Г. Фазовый переход твёрдое 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.
7. 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, 2013. С. 38-42.
8. Геологический словарь. Том. 2. М.: Недра, 1978. 456 с.
9. Геологический словарь. В 3-х Т. СПб: ВСЕГЕИ, 2010-2011.
10. Ермаков В. А. Формационное расчленение четвертичных вулканических пород. М.: Недра, 1977. 223 с.
11. Иванчин А. Г., Викулин А. В., Фадин В. В. Ротационная модель теплового разогрева и проблема вулканических очагов // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2011. С. 302-306.
12. 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.
13. Короновский Н. Йеллоустонский супервулкан // Наука и жизнь. 2012. № 5. С. 110-113.
14. Кропоткин П. Н. основные проблемы энергетики тектонических процессов // Изв. АН СССР. 1948. № 5. С. 89-104.
15. Лаверов Н. П. (ред.) Новейший и современный вулканизм на территории России. М.: Наука, 2005. 604 с.
16. Леонов В. Л., Гриб Е. Н. Структурные позиции и вулканизм четвертичных кальдер Камчатки. Владивосток: Дальнаука, 2004. 189 с.
17. Лучицкий И. В. Основы палеовулканологии. Т. 1. М.: Наука, 1971. 480 с.
18. Любимова Е. А. Термика Земли и Луны. М.: Наука, 1968. 280 с.
19. Макдональд Г. Вулканы. М.: Мир, 1975. 432 с.
20. Маслов Л. А. Геодинамика литосферы тихоокеанского подвижного пояса. Хабаровск-Владивосток: Дальнаука, 1996. 200 с.
21. Павленкова Н. И. Природа границы М по геофизическим данным // Материалы 45 Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2013. С. 138-141.
22. Токарев П. И. О связи вулканической и сейсмической активности в Курило-Камчатской зоне // Тр. лаборатории вулканологии АН СССР. 1959. Вып. 17. С. 156-182.
23. Шипов Г. И. Теория физического вакуума. М.: Кириллица-1, 2002. 128 с.
24. Spera F. J., Crips J. A. Eruption volume, periodicity, and caldera area: relationships and inferences on development of compositional zonation in silicic magma chambers // J. of Volcanology and Geothermal Research. 1981. Vol. 11. No. 1-2. P. 169-187.
25. 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&Tectonophysics. 2012. Vol. 3. No. 1. P 1-18. DOI:10,5800/GT-2012-3-1-0058