

ВУЛКАНИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС В БЛОКОВОЙ ГЕОСРЕДЕ

© 2015 г. А. В. Викулин*, А. Г. Иванчин**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
683006, г. Петропавловск-Камчатский, бульв. Пийпа, 9
E-mail: vik@kscnet.ru

**Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, Академический пр., 10/3
E-mail: ivanchin@tdm.su

Поступила в редакцию 31.10.2013 г.

Принята к печати 02.10.2014 г.

В рамках развиваемого авторами ротационного подхода приводится краткий обзор волновых свойств геодинамических движений блоковой вращающейся нелинейной геосреды, которые “состыковываются” с вулканическим процессом. Показано, что магматические очаги, питавшие сильные извержения планеты в течение последних миллионов лет, имеют постоянную около 0.5 км толщину, которая не зависит ни от времени и типа извержения вулкана, ни от места его расположения. Описана новая модель магматического очага. В основе модели заложены представления о пластическом течении “твердого” вещества вдоль границ блоков, его “перегреве” выше точки плавления и создании вокруг “твердотельного магматического” очага упругих напряжений с энергией 10^{15} Дж/км³ перегретой породы. В рамках ротационных представлений такие по величине упругие напряжения могут объяснить как миграцию самой вулканической активности, так и ее взаимодействие с сейсмичностью и тектоникой. Магматические очаги с такими свойствами никак не зависят от самого вулканического процесса и, по сути, являются отражением вполне определенного геодинамического состояния земной коры – ее блокового строения. Представления о тонких перегретых прослоях в виде вулканических очагов распространяются на всю земную кору. Формулируется гипотеза, согласно которой свойства границы Моххо определяются фазовым переходом от блокового строения коры к неблоковому строению верхней мантии.

Ключевые слова: *блоковая вращающаяся геосреда, магматический очаг, пластическое течение, граница Моххо.*

ВВЕДЕНИЕ

Достижением научной мысли последних десятилетий в науках о Земле стало обоснование гипотезы блокового строения геологической (Пейве, 1961) и геофизической (Садовский, 2004, с. 332–334; Проблемы..., 1987, с. 5–20) сред, что позволяет по-новому подходить к постановке и решению задач наук о Земле (Викулин, Иванчин, 2013а).

Моментная природа напряжений в блоковой геосреде. Земная кора находится в постоянном движении; слагающие ее блоки и плиты как целые перемещаются вдоль поверхности Земли (рис. 1). Вращение Земли и такие трансляционные движения блоков, по сути, и могут по-новому определять основные свойства земной коры (Викулин, 2008; Викулин, 2010; Викулин, Мелекесцев и др., 2012).

Угловая скорость Ω , с которой вращается в каждый данный момент времени жестко связанная с телом (в нашем случае – с Землей) система координат, совершенно не зависит от этой системы. Поэтому каждый блок характеризуется одинаковым

по своей природе моментом импульса $\mathbf{M}$, независимым от размера блока R_0 , направленным параллельно оси вращения тела (Земли): $\mathbf{M} = m \cdot \Omega$. Здесь m – момент инерции блока, который, считаем, имеет шаровую форму. Движение земной коры из положения ($\mathbf{M}_1$) в ($\mathbf{M}_2$) на рис. 1 приводит к изменению направления момента импульса $\mathbf{M}_1 \rightarrow \mathbf{M}_2$, поскольку этот блок жестко связан движущейся корой и потому углом $\alpha = \text{const}$, рис. 1а. Сохранение момента $\mathbf{M}$ приводит к появлению момента силы $\mathbf{K}$, прикладываемому к блоку со стороны *окружающей* его земной коры (Викулин, Иванчин, 2013а):

$$|\mathbf{K}| = 2P \sin \beta / 2. \quad (1)$$

“Внутренний” и/или собственный (Пейве, 1961) момент $\mathbf{M}$, по сути макроспин (Седов, 1973, с. 146–148), обладает специфическим свойством: его в силу закона сохранения момента нельзя “отнять” у геосреды, в том числе и за счет ее пластической деформации. Поэтому ротационные напряжения с моментом силы (1) в результате трансляционного движения блока (вследствие увеличения

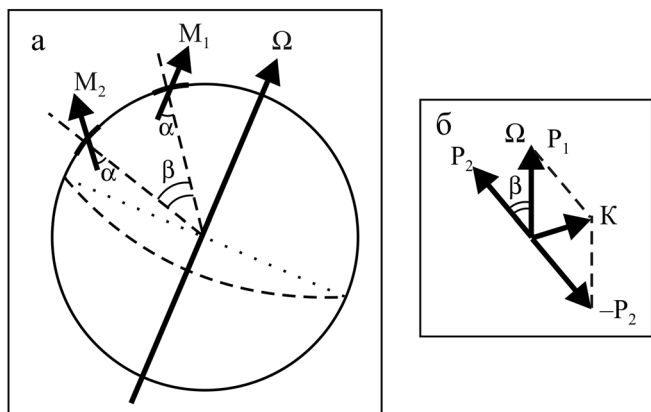


Рис. 1. Движение блока литосферы из положения с моментом импульса M_1 в положение M_2 (поворот блока на угол β) (а), сопровождаемое в литосфере генерацией напряжений с моментом силы K , прикладываемых к блоку со стороны окружающей его среды (б). α – угол между моментом M и вертикалью к поверхности Земли, $\alpha = \text{const}$.

Fig. 1. The movement of the lithosphere block from the position with angular momentum M_1 to the position M_2 (rotation of the block by an angle β) (a) is accompanied by a “generation” of stresses with force moment K (b) applied to the block by its environment. α – the angle between momentum M and the vertical line to Earth’s surface.

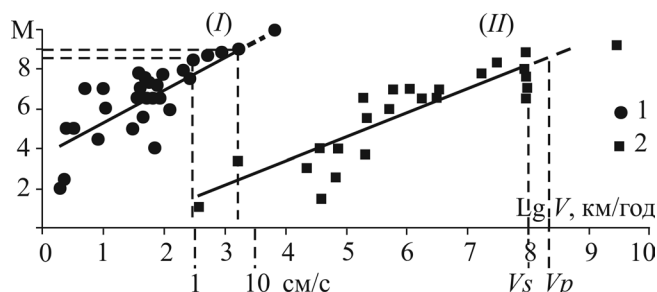


Рис. 2. Значения скоростей миграции тихоокеанских землетрясений и определенные по ним зависимости $M(\text{Lg}V)$ I и II в соответствии с (Викулин, 2009, с. 296; Викулин, Иванчин, 2013а).

1, 2 – данные о миграции очагов землетрясений вдоль окраины Тихого океана (глобальная миграция, I) и миграции форшоков и афтершоков в очагах сильных землетрясений (локальная миграция, II) соответственно.

Fig. 2. The velocities of migration of Pacific earthquakes and relations $M(\text{Lg}V)$ defined on them, I and II in accordance with (Викулин, 2009, с. 296; Викулин, Иванчин, 2013а).

1, 2 – migration of earthquakes foci along the edge of the Pacific Ocean (global migration, I) and migration of foreshocks and aftershocks in the foci of strong earthquakes (local migration, II) respectively.

угла β и $\alpha = \text{const}$, рис. 1а) будут в земной коре накапливаться, что, очевидно, и может объяснить (Ви-

кулин, Иванчин, 2013а) такое ее свойство как энергонасыщенность (Пономарев, 2008).

В рамках ротационного подхода (Викулин, 2008; 2009; 2010; 2011; Викулин и др., 2000; 2010; Vikulin et al., 2013) движение элемента геосреды на рис. 1 в невращающейся (инерционной) системе координат механически эквивалентно движению блока под действием *собственного момента импульса* M , который в окружающей блок среде создает упругое поле с моментом силы (1). Генерируемое при таком ротационном движении поле упругих напряжений с моментом силы в блоковой геосреде является следствием закона сохранения момента (Викулин, Иванчин, 2013а).

Близкодействие и дальноедействие ротационного упругого поля. Для блока шаровой формы радиуса R_0 с собственным моментом (1) в сферической системе координат (r, φ, θ) с началом в центре блока в рамках ротационного подхода (Викулин, 2008) была поставлена соответствующая краевая задача и аналитически определено (Викулин, 2011; Викулин и др., 2000) поле напряжений в геосреде:

$$\sigma_{r\varphi} = \sigma_{\varphi r} = 4\Omega R_0^4 r^{-3} \sqrt{\frac{\rho G}{5\pi}} \sin \theta \sin \beta / 2 \quad (2)$$

(остальные компоненты равны нулю). Поле напряжений, создаваемое поворачивающимся под действием собственного момента, как видим, оказалось симметричным, что позволяет в рамках ротационного подхода не прибегать к моделям среды типа Коссера и ей подобным (Викулин, Иванчин, 2013а).

В модели двух блоков, расположенных на некотором расстоянии друг от друга, аналитически определены энергия и момент силы их взаимодействия. Показан близко- и дальноедействующий характер такого ротационного взаимодействия блоков (Викулин, 2009; 2010; 2011; Vikulin et al., 2013). Первый (дальноедействие) тип взаимодействия определяет процесс миграции очагов землетрясений, наблюдаемый вдоль тектонических поясов на протяжении многих десятков тысяч километров (рис. 2, I). Второй (близкоедействие) тип отчетливо проявляется как миграция форшоков и афтершоков в очагах сильнейших (с магнитудами (M) около 8 и более) землетрясений (рис. 2, II).

Корпускулярно-волновые свойства сейсмотектонического процесса. Уравнением, описывающим движение цепочки блоков с собственными моментами, служит уравнение синус-Гордона (Викулин, 2010; 2011, с. 85–95, 237–243). Характерными скоростями таких движений (для окраины Тихого океана) являются (Викулин, Иванчин, 2013а) “медленная” скорость:

$$c_0 = \gamma \sqrt{V_R V_S};$$

$$c_0 = 1\text{--}10 \text{ см/с} (\approx 100\text{--}1000 \text{ км/год}), \quad (3)$$

ограничивающая сверху “малые” скорости $V_1 \leq c_0$ “глобальной” миграции землетрясений вдоль сейсмического пояса $M_1 \approx 2LgV_1$ (или энергией $E_1 \approx V_1^4$), т. е. миграцию сейсмической активности на большие расстояния или дальное действие (рис. 2, I), и сейсмическая скорость V^s :

$$V^s: \{V_P \text{ и/или } V_S\} = 1-10 \text{ км/с}, \quad (4)$$

ограничивающая сверху “большие” скорости $c_0 < V_2 \leq V^s$ “локальной” миграции форшоков и афтершоков в очагах землетрясений $M_2 \approx LgV_2$ (или энергией $E_2 \approx V_2^4$), т. е. локальные моментные взаимодействия или близкое действие (рис. 2, II). Здесь $\gamma = K^{-1}$ – нелинейный параметр, характеризующий реальную геосреду; $K \approx 10^4$ – коэффициент нелинейности геосреды, равный отношению модулей упругости третьего порядка к модулям упругости второго порядка (линейным модулям упругости) (Проблемы..., 1987); V_P и V_S – продольная и поперечная сейсмические скорости, $V_R = \Omega R_0$. Такие же, по сути, “медленные” и “быстрые” деформационные (О.А. Хачай, О.Ю. Хачай, 2012; Хачай и др., 2013) и маятниковые (Опарин, Востриков, 2010) волны экспериментально зарегистрированы в шахтах.

Таким образом, ротационные волны миграции землетрясений с граничными скоростями $\{c_0, V^s\}$ – (3) и (4), отвечающие за взаимодействие очагов землетрясений в цепочке блоков земной коры, слагающих сейсмический пояс, обладают корпускулярно-волновыми свойствами и являются такими же характерными геодинамическими движениями для блоковой вращающейся земной коры, как и “обычные” сейсмические волны V_P и V_S (Викулин, 2008; 2010; Викулин, Иванчин, 2013а).

БЛОКОВАЯ ГЕОСРЕДА И ВУЛКАНИЗМ

Описанные выше волновые представления протекающего в блоковой геосреде сеймотектонического процесса могут быть перенесены и на вулканический процесс. Действительно, вулканические пояса Земли, как и сейсмически активные зоны, являются крупнейшими линейными структурами планеты; их образование началось в раннем мезо и происходило достаточно синхронно (Планета Земля, 2004, с. 460). Для трех из таких наиболее активных вулканических поясов – Тихоокеанского, Альпийско-Гималайского и Срединно-Атлантического – показано, что миграция вулканической активности, как и миграции сейсмической и тектонической активности, есть проявление волнового геодинамического процесса (Викулин и др., 2010; Vikulin et al., 2012). Данные, приведенные на рис. 3, демонстрируют и сам процесс миграции вулканической активности (рис. 3а, б) и его геодинамическое содержание – зависимость скорости миграции от индекса эксплозивности извержения (Siebert et al., 2010) или объема выброшенных при извержении продуктов (рис. 3в) (Викулин, 2010).

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 можно судить по кальдере – округлой по форме значительной по площади (в поперечнике до 10–15 км и более) вулканической депрессии с наклонными стенами (высотой до нескольких сот ме-

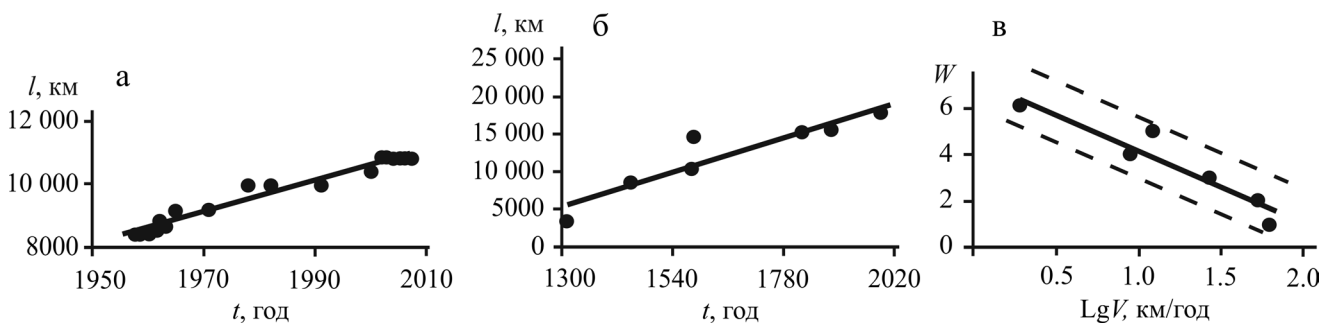


Рис. 3. Миграция вулканической активности в пределах тихоокеанского огненного кольца.

а, б – примеры цепочек миграции вулканических извержений с индексами эксплозивности W и скоростями V : $W \geq 2$, $V = 50$ км/год, район Новых Гибрид и $W \geq 5$, $V = 19$ км/год, район Новая Зеландия–о-в Тайвань соответственно; l – расстояние вдоль окраины Тихого океана; в – зависимость скорости миграции от индекса эксплозивности: $W \approx -2,3 \lg V$ (Викулин и др., 2012), определенная по всей совокупности данных за последние 12 тыс. лет (Vikulin et al., 2012).

Fig. 3. The migration of volcanic activity within the Pacific Ring.

а, б – examples of migration chains of volcanic eruptions with explosivity indexes W and velocity V : $W \geq 2$, $V = 50$ km/year, the New Hebrides area and $W \geq 5$, $V = 19$ km/year, the New Zealand area–Taiwan, respectively; l – distance along the edge of the Pacific Ocean; в – dependence between migration velocity and explosivity index $W \approx -2,3 \lg V$ (Викулин и др., 2012), determined by all data for the last 12 thousand years (Vikulin et al., 2012).

тров и более), образовавшейся в результате извержения (Влодавец, 1984, с. 123; Геологический словарь, 1978).

В настоящей работе на основании анализа данных о достаточно сильных извержениях вулканов и образующихся при них кальдерах показано, что соответствующие таким извержениям магматические очаги имеют малые вертикальные размеры, являются своеобразными генераторами упругих напряжений, которые отражают не вулканический процесс, а, по сути, вполне определенное геодинамическое состояние земной коры – ее блоковое строение.

О ПАРАМЕТРАХ МАГМАТИЧЕСКИХ ОЧАГОВ

Распределение чисел извержений и размеров вулканических форм современных курило-камчатских вулканов. Наиболее полные и однородные в пределах всего региона данные о числах извержений и размерах вулканических форм собраны для современных (в течение последних 200 тыс. лет) извержений Курило-Камчатской дуги (Викулин, Акманова, 2014). Для 70 вулканов Курило-Камчатской дуги, извергавшихся $N = 676$ раз за последние 9.5 тыс. лет (Vikulin et al., 2012), в интервале индексов эксплозивности W (Siebert et al., 2010) $2 \leq W \leq 7$ построен график повторяемости извержений (Викулин и др., 2012):

$$\text{Lg}N = 3.60 - (0.48 \pm 0.06)W. \quad (5)$$

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

$$\text{Lg}N = 1.15 - (0.48 \pm 0.06)\text{Lg}V, [V] = \text{км}^3. \quad (6)$$

С использованием данных о $N = 287$ вулканических современных формах (кальдерах, крупных воронках на конусах и плоских вершинах подводных вулканов), представленных в коллективной монографии (Новейший и современный вулканизм..., 2005), методом средних квадратов было построено следующее распределение чисел вулканических форм N по их площадям S :

$$\text{Lg}N = (2.32 \pm 0.16) - (0.47 \pm 0.14)\text{Lg}S, [S] = \text{км}^2. \quad (7)$$

Как можно видеть из полученных соотношений, “угол наклона” энергетического W (5) и/или “объемного” V (6) распределения: 0.48 ± 0.06 , практически совпадает с “углом наклона” распределения чисел вулканических форм по их площадям S (7): 0.47 ± 0.14 . Числа используемых при вычислениях извержений вулканов ($N = 676$) и размерах вулканических форм ($N = 278$) достаточно большие и статистически значимые. Энергетический диапазон и размеры кальдер, характеризующие распре-

деления (5) – (7), охватывают весь спектр вулканических извержений, включая и максимальные значения $W_{\text{max}} = 7$, $V_{\text{max}} \approx 100 \text{ км}^3$ и $S_{\text{max}} = 20 \cdot 25 \text{ км}^2$.

По своему смыслу распределения (5) – (7) являются достаточно общими статистическими распределениями, характерными для вулканического процесса, протекающего в пределах протяженного региона в течение продолжительного отрезка времени. Близость наклонов энергетического (5) и/или объемного (6) и площадного (7) распределений позволяет сформулировать гипотезу: отношение объема изверженного материала V к площади достаточно большой по размерам образовавшейся вулканической формы S есть величина постоянная:

$$V/S = \Delta h = \text{const}. \quad (8)$$

Гипотеза (8), по сути инвариант наиболее общих статистических распределений, является для вулканографии фундаментальной (Викулин, Акманова, 2014).

Извержения вулканов планеты. Угол наклона графика повторяемости извержений вулканов планеты (Викулин и др., 2012):

$$\text{Lg}N \approx - (0.52 \pm 0.05)W, \quad (9)$$

примерно равен такому же наклону для извержений курило-камчатских вулканов (5). Для извержений вулканов планеты (Викулин, Иванчин, 2015) проанализируем распределения чисел извержений вулканов как функции площадей образовавшихся кальдер и объемов выброшенного материала.

На рис. 4 отражено распределение чисел N кальдер по их площадям S , $\text{Lg}N = f(\text{Lg}S)$, $N = 373$. На рис. 5 показано распределение чисел извержений N по величинам изверженных объемов V , $\text{Lg}N = f(\text{Lg}V)$, $N = 125$. Аналитическое выражение зависимостей, представленных на рис. 4 и 5, проводилось методом средних квадратов и дается формулами (10) и (11); коэффициенты корреляции 0.9 и 0.7 соответственно.

$$\text{Lg}N = (1.86 \pm 0.11) - (0.49 \pm 0.05)\text{Lg}S, [S] = \text{км}^2; \quad (10)$$

$$\text{Lg}N = (1.41 \pm 0.19) - (0.42 \pm 0.09)\text{Lg}V, [V] = \text{км}^3. \quad (11)$$

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.

Параметры кальдер, их диаметры D , площади S и величины объемов выброшенного материала V при их образовании изменялись в пределах многих порядков величины: $D = 2\text{--}150 \text{ км}$, $S = 2\text{--}4648 \text{ км}^2$, $V = 0.3\text{--}3000 \text{ км}^3$, тем не менее, как видно из соотношений (10) и (11), углы наклонов распределений площадей S (10) и объемов изверженного материала V (11) с высокой (не менее 0.7) статисти-

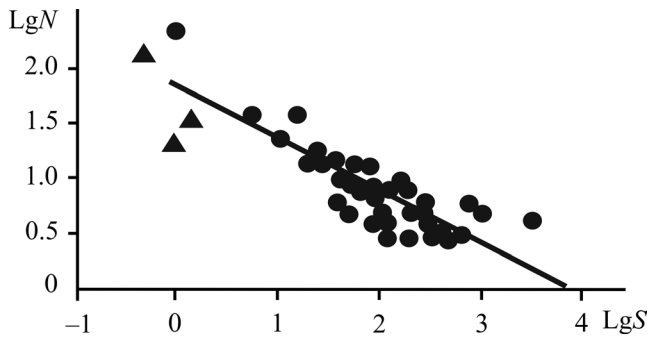


Рис. 4. Распределение чисел $N = 373$ кальдер (точки) и крупных воронок $N = 175$ на конусах (треугольники) по величинам их площадей S (км²), образованных на вулканах планеты.

Fig. 4. The distribution of numbers of calderas $N = 373$ (points) and large craters on the cones $N = 175$ (triangles) of volcanoes by values of their areas S (km²).

чески значимой достоверностью близки между собой, что равносильно выводу о постоянстве величины их отношения в большом диапазоне масштабов V и S .

Таким образом, данные об извержениях вулканов планеты в течение последних 33 млн лет подтверждают справедливость гипотезы (8) о независимости величины Δh от параметров вулканического процесса ($\Delta h = \text{const}$).

Толщина магматического очага. Приведенные выше данные позволяют количественно оценить толщину магматического очага по параметрам извержений вулканов. С этой целью в формулу (8) подставлялись данные об извержениях вулканов, для которых известны диаметры кальдер S и объемы выброшенного материала V , $N = 125$. Методом, предложенным И.В. Мелекесцевым, учитывающим разные плотности магмы на глубине очага и продуктов извержения на поверхности земли (Новейший и современный вулканизм..., 2005), были пересчитаны все указанные выше данные об объемах изверженных вулканов планеты и показана (Викулин, Акманова, 2014) справедливость равенства (8)

$$\Delta h = 0.5 \pm 0.1 \text{ км.} \quad (12)$$

Минимальные и максимальные значения толщин магматических очагов, определенные по $N = 125$ извержениям вулканов, для каждого из которых известны диаметры (S) образовавшихся кальдер и объемы (V) выброшенного при извержениях материала, составляют от первых метров до первых километров. Эти значения не противоречат мощностям расплавленных гранитоидных прослоев, образовавшихся при необратимом деформировании горных пород в процессе складкообразования земной коры на Памире (Магницкий и др., 1998).

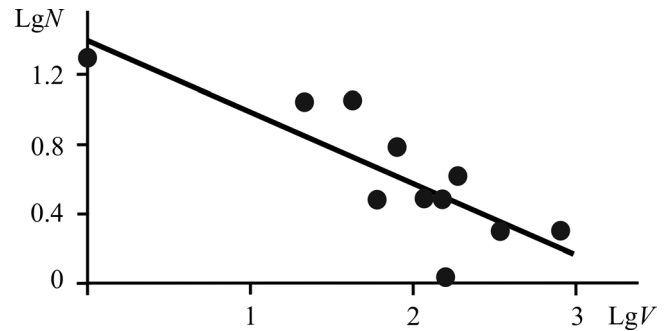


Рис. 5. Распределение чисел извержений как функция объемов выброшенного материала V (км³), $N = 125$, при извержениях вулканов планеты.

Fig. 5. The distribution of numbers of eruptions as a function of the volume of material V (km³) ejected during volcanic eruptions, $N = 125$.

При среднем диаметре кальдеры $D = 10\text{--}15$ км форма магматического очага мощностью (12) соответствует тонкому слою – “блину”: $D \gg \Delta h$.

Обращают на себя внимание следующие “совпадения”. Во-первых, толщины магматических очагов Δh оказались близкими высотам бортов кальдер h и в среднем и в минимаксных значениях: $\Delta h \approx h$, что также можно рассматривать как подтверждение гипотезы о тонкослойном с постоянной толщиной магматическом очаге. Во-вторых, как можно видеть из рис. 4, крупные воронки на шлаковых конусах (отмечены треугольниками), число которых в общей сложности составляет $N = 175$, т.е. примерно половину числа всех кальдер $N = 373$, не могут существенным образом изменить аналитическое выражение зависимости (10). Следовательно, представления о тонкослойном магматическом очаге (8)–(12), по сути, стирают различия между крупными воронками на шлаковых конусах и кальдерами. Другими словами, и само понятие о кальдерообразующем извержении как некотором “особом” классе извержений теряет смысл.

Соотношение (12) получено на основании анализа разных выборок, которые включали следующие данные: 1) о планете в целом, и отдельно взятых регионах: Курило-Камчатской дуге, Камчатке, Курилах, и отдельных вулканах Камчатки и Курил; 2) о разных временных интервалах: 33 млн лет – для извержений вулканов Земли и современных – для извержений курило-камчатских вулканов; 3) о разных по геотектоническим обстановкам регионах и 4) о разных по типам и вулканов, и их извержений, что в совокупности позволяет малую толщину магматического очага (12) считать, по сути, постоянной величиной, *не зависящей от вулканического процесса* (Викулин, Акманова, 2014).

МАГМАТИЧЕСКИЙ ОЧАГ КАК СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Модель “блинообразного” (тонкого) магматического очага в земной коре. Согласно инструментальным геофизическим исследованиям, проведенным в последние десятилетия на курило-камчатских вулканах, их магматические очаги располагаются, как правило, на глубинах 5–30 км (Аносов и др., 1990; Балеста, 1981; Большое..., 1984; Действующие вулканы..., 1991; Ермаков, Штейнберг, 1999), т. е. 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.

Предпосылками для такой постановки задачи могут являться следующие данные. С самых общих позиций обоснование выделения тепла в земной коре за счет механического движения слагающих ее блоков дано П.Н. Кропоткиным (1948). На возможность расплавления вещества в зонах разломов вследствие диссипативного разогрева при сдвигах блоков земной коры указывалось во многих работах по геодинамическому моделированию (см., например: Теркот, Шуберт, 1985, с. 308–310). Количественная же модель образования гранитоидных расплавов в земной коре в результате ее интенсивного деформирования при складкообразовании на примере Памира, по-видимому, впервые представлена в работе (Магницкий и др., 1998). Следует особо подчеркнуть, что для образования расплава в рамках такого подхода не требуется привлекать концепцию флюида. Возможность существования в земной коре палингенных магматических очагов обоснована в работе (Ермаков, 1977) и подтверждена инструментальными геофизическими наблюдениями (Балеста, 1981).

Модель, которая являлась основой для наших представлений о тонкослойном блинообразном магматическом очаге, разработана в материаловедении для твердых тел с интенсивными пластическими деформациями, которые при условии малого теплоотвода из области интенсивной деформации могут приводить к существенному нагреву зоны пластической деформации вплоть до разрушения тела (Иванчин, 1982).

Основные положения модели сводятся к следующему (Викулин, Иванчин, 2015). Величина локализованной пластической деформации ε может достигать больших значений ($\varepsilon \approx 1$) в полосе скольжения, вне полос она становится малой ($\varepsilon \approx 0$). При скорости деформации, экспоненциальным образом зависящей от напряжения и температуры, величина пластической деформации может привести к повышению температуры в области ее локализации за счет тепловыделения. В случае малого значения коэффициента температуропровод-

ности, когда компенсации нагрева не происходит, температура в зоне интенсивной пластической деформации будет постоянно повышаться вплоть до выхода в режим теплового самоускорения, приводящего, как правило, к разрушению деформируемой части тела, часто в результате ее расплавления.

Для образования прогретой полосы требуется выполнение следующих физически прозрачных условий: деформирование должно происходить, с одной стороны, достаточно быстро, чтобы образующееся тепло не успевало отводиться за счет теплопроводности, с другой – достаточно медленно, чтобы в результате релаксации напряжений “успевала” уменьшаться скорость пластической деформации и удельная мощность тепловыделения.

В условиях малой теплопроводности земной коры были проведены термодинамические расчеты твердотельного перегретого выше точки плавления магматического очага, расположенного на глубине залегания границы кристаллического фундамента $H = 5\text{--}6$ км (Камчатка) и состоящего из алюминия, имеющего тепловые свойства, близкие свойствам магмы. (Для алюминия известны все термодинамические параметры и их зависимости от температуры и давления.) Термодинамический расчет показал, что при локальных плавлениях и увеличении объема очага вокруг него создается дополнительное давление и появляется поле упругих напряжений, энергия которого порядка 10^{15} Дж/км³ перегретой породы. Перегретые магматические очаги достаточно сильных ($W > 4$, $V > 0.1$ км³) извержений по величине накопленной вокруг них упругой энергии оказываются близкими очагам наиболее крупных (протяженностью 100–200 км и более) землетрясений с магнитудами около $M = 8$ 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; 2012; *Vikulin et al., 2012*)) и **взаимодействие вулканизма, сейсмичности и тектоники** (Викулин, 2011; *Vikulin et al., 2013*).

Возможность такого обобщения подтверждают:

- три крупных рядом расположенных конуса Северного прорыва Толбачинского извержения (Камчатка), которые образовывались друг за другом в ходе извержения в 1975 г., “мигрируя” вдоль всей Толбачинской зоны (Большое..., 1984);

- мигрующие вдоль долины Снейк Ривер протяженностью около 500 км (США) кальдеры с $D = 10$ км и более, образовавшиеся при 8 сильнейших ($W \geq 6\text{--}7$, $V \geq 10\text{--}100$ км³) извержениях, происшедших в течение последних 16 млн лет (Короновский, 2012);

- данными о вулканах, мигрировавших вдоль центральной части Тихого океана на протяжении

800–1000 км, образовавших цепочку Гавайских островов (Макдональд, 1975);

– другими такого рода данными по миграции вулканической активности вдоль поверхности Земли (Луцицкий, 1971).

Таким образом, вывод о тонкослойном магматическом очаге, толщина которого определяется свойствами земной коры, является фундаментальным выводом не только для вулканологии, но и для геодинамики. Такой вывод позволяет в рамках ротационной модели (Викулин, 2011; Викулин, Иванчин, 2013б; Vikulin et al., 2013) “состыковать” вулканический процесс (Викулин, Акманова, 2014; Викулин, Иванчин, 2015) с представлениями как о блоковой геосреде, так и о волновом геодинамическом процессе.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе описана ротационная концепция, в рамках которой оказывается возможным преодолеть трудности, связанные как с учетом блокового строения геологической среды, так и с описанием протекающего в ее пределах волнового геодинамического процесса. Показано, что в геосреде, являющейся вращающимся блоковым телом, генерируются напряжения, которые имеют момент силы. Именно такие напряжения, возникшие как следствие закона сохранения импульса, и определяют энергонасыщенное (в смысле, придаваемом этому термину В.С. Пономаревым (2008)) состояние геосреды. Для блоковой вращающейся геосреды характерно существование нового типа ротационных волн – медленных и быстрых волн деформации (и/или тектонических (Быков, 2005), и/или маятниковых (Опарин, Востриков, 2010), и/или деформационных (О.А. Хачай, О.Ю. Хачай, 2012; Хачай и др., 2013) волн), являющихся, по сути, следствием корпускулярно-волнового дуализма.

Отражением “блокового характера” вулканического процесса служат питающие извержения вулканов магматические очаги. Анализ данных по сильным извержениям вулканов планеты (около 800), сопровождавшихся образованием кальдер и выносом на поверхность Земли большого объема вулканического материала, показывает, что магматические очаги таких извержений расположены на глубине 5–7 км и имеют постоянную “толщину”, величина которой (≈ 0.5 км) не зависит от вулканического процесса и определяется свойствами земной коры. Данные по сверхглубоким скважинам свидетельствуют о существовании на глубинах 5–7 км сейсмической границы в пределах России и сопредельных регионов, при этом отмечается “их сходство с вулканическими сериями тихоокеанских островных дуг, в частности, Курильской” (Сверхглубокие скважины..., 1995, с. 187–190). Эти данные могут рассматриваться как под-

тверждающие приведенные в работе количественные оценки параметров магматического очага.

Описана новая, дополняющая и развивающая известные представления о возможности генерации тепла в пределах земной коры (Ермаков, 1977; Кропоткин, 1948; Магницкий, 1998; Теркот, Шуберт, 1985), модель магматического очага, в основе которой заложены представления о “тепловом взрыве” или “тепловом самоускорении”. Модель реализуется интенсивными пластическими движениями вдоль границ блоков при условии малой теплопроводности геосреды. За счет перегрева твердого вещества магматического очага выше точки плавления в окружающей такой очаг области могут накапливаться упругие напряжения с энергией до 10^{15} Дж/км³ перегретой породы. Такие напряжения соизмеримы с напряжениями в очагах сильнейших землетрясений, что позволяет в рамках блоковой концепции геосреды объяснить как взаимодействие вулканов между собой (миграцию вулканической активности вдоль вулканической дуги), так и взаимодействие вулканического и сейсмического процессов, протекающих вдоль рядом расположенных и параллельных друг другу поясов.

В рамках таких представлений магматические очаги являются, по сути, “обычными” блоками земной коры, обладающим такими же ротационными свойствами, как и блоки – очаги землетрясений.

Представления о тонких прослоях в виде магматических очагов, параметры которых определяются свойствами земной коры, можно распространить на всю земную кору, включая и ее подошву – границу Мохо.

В соответствии с (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. ... Глубинные тангенциальные тектонические зоны, располагаясь в области больших давлений и температур, являются зонами “пластического течения”... и первичных магматических очагов. ... Главным источником этой энергии являются механические движения вещества земной коры”. Как видим, описанные в этой статье и в работе (Теркот, Шуберт, 1985) тонкослойные механизмы пластического движения вдоль поверхностей блоков являются вполне реальными и могут быть применены к другим тектоническим границам земной коры, включая и границу Мохо.

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 Мохо, можно ожидать, что ниже границы земной коры геосреда

может не являться блоковой. В том числе и потому, что вещество ниже Мохо в значительной степени должно обладать свойством объемного (Леонов, 2008), а не сдвигового течения. В свете ротационной механики блоковой геосреды (Викулин, 2011; *Vikulin et al*, 2013) и модели “теплового самоускорения” (Викулин, Акманова, 2014; Викулин, Иванчин, 2015; Иванчин, 1982) можно предположить: подошва земной коры может представлять собой фазовую поверхность, ниже которой литосфера и верхняя мантия, возможно, не являются блоковыми или являются таковыми, но в значительно меньшей степени, чем земная кора (Викулин, Иванчин, 2013б). Предлагаемый нами подход к описанию свойств границы Мохо является близким модели Н.И. Павленковой (2013).

Отмеченные выше в работе данные по сверхглубоким скважинам и, в частности, данные, полученные на Кольской скважине, показали наше недостаточное знание строения земной коры (Сверхглубокие скважины..., 1995). Поэтому обсуждать на данном этапе исследований возможный “нулевой” (Маслов, 2004; Нелинейность..., 2013), известные из физики I, II, или какой-то иной род фазового перехода, преждевременно.

Авторы выражают признательность рецензенту за конструктивное сотрудничество, которое способствовало значительному улучшению статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аносов Г.И., Аргентов В.В., Абдурахманов А.И. и др. (1990) Глубинное строение вулкана Уратман. *Вулканология и сейсмология*. (4), 85-91.
- Балеста С.Т. (1981) Земная кора и магматические очаги областей современного вулканизма. М.: Наука, 135 с.
- Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка 1975–1976 гг. (1984) (Под ред. С.А. Федотова). М.: Наука, 638 с.
- Быков В.Г. (2005) Деформационные волны Земли: концепции, наблюдения и модели. *Геология и геофизика*. 46(11), 1179-1190.
- Викулин А.В. (2008) Энергия и момент силы упругого ротационного поля геофизической среды. *Геология и геофизика*. 49(6), 559-570.
- Викулин А.В. (2009) Физика Земли и геодинамика. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 463 с. www.kscnet.ru
- Викулин А.В. (2010) Новый тип упругих ротационных волн в геосреде и вихревая геодинамика. *Геодинамика и тектонофизика*. 1(2), 119-141.
- Викулин А.В. (2011) Сейсмичность. Вулканизм. Геодинамика. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 463 с. www.kscnet.ru
- Викулин А.В., Акманова Д.Р. (2014) Магматический очаг как свойство земной коры. *Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле*. 23(1), 213-230.
- Викулин А.В., Акманова Д.Р., Осипова Н.А. (2010) Вулканизм как индикатор геодинамических процессов. *Литосфера*. (3), 5-11.
- Викулин А.В., Быков В.Н., Лунева М.Н. (2000) Нелинейные волны деформации в ротационной модели сейсмического процесса. *Вычислит. технологии*. 5(1), 31-39.
- Викулин А.В., Иванчин А.Г. (2013а) О современной концепции блочно-иерархического строения геосреды и некоторых ее следствиях в области наук о Земле. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. (3), 67-84.
- Викулин А.В., Иванчин А.Г. (2013б) О границе Мохо как фазовой границе раздела между блоковой земной корой и неблоковой верхней мантией. *Мат-лы 45-го тект. совещ.* М.: GEOS, 38-42.
- Викулин А.В., Иванчин А.Г. (2015) Новый взгляд на природу магматического очага. Система “Планета Земля”: 200 лет Священному союзу (1815–2015). М.: ЛЕНАРД, 293-321.
- Викулин А.В., Мелекесцев И.В., Акманова Д.Р. и др. (2012) Информационно-вычислительная система моделирования сейсмического и вулканического процессов как основа изучения волновых геодинамических явлений. *Вычислит. технологии*. 17(3), 34-54.
- Влодавец В.И. (1984) Справочник по вулканологии. М.: Наука, 340 с.
- Геологический словарь. (1978) М.: Недра, 456 с.
- Действующие вулканы Камчатки. (1991) (Под ред. С.А. Федотова, Ю.П. Масуренкова). М.: Наука, Т. 1, 320 с. Т. 2, 415 с.
- Ермаков В.А. (1977) Формационное расчленение четвертичных вулканических пород. М.: Недра, 223 с.
- Ермаков В.А., Штейнберг Г.С. (1999) Вулкан Кудрявый и эволюция кальдеры Медвежья (о-в Итуруп, Курильские о-ва). *Вулканология и сейсмология*. (3), 19-40.
- Иванчин А.Г. (1982) Роль кооперативных эффектов при движении дислокаций в диссипации энергии. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: ИОА СО АН СССР, 131 с.
- Короновский Н. (2012) Йеллоустонский супервулкан. *Наука и жизнь*. (5), 110-113.
- Кропоткин П.Н. (1948) Основные проблемы энергетики тектонических процессов. *Изв. АН СССР, сер. геол.* (5), 89-104.
- Леонов М.Г. (2008) Тектоника консолидированной коры. М.: Наука, 457 с.
- Лучицкий И.В. (1971) Основы палеовулканологии. Т. 1. М.: Наука, 480 с.
- Магницкий В.А., Мухамедиев Ш.А., Хасанов Р.Х. (1998) О возможности плавления пород земной коры при интенсивном складкообразовании (на примере Памира). *Докл. АН СССР*. 363(5), 682-686.
- Макдональд Г. (1975) Вулканы. М.: Мир, 432 с.
- Маслов В.П. (2004) Фазовые переходы “нулевого рода”. *Мат. заметки*. 76(5), 748-761.
- Нелинейность в современном естествознании. (2013) М.: ЛКИ, 424 с.
- Новейший и современный вулканизм на территории России. (2005) (Под ред. Н.П. Лаверова). М.: Наука, 604 с.
- Опарин В.Н., Востриков В.Н. (2010) Энергетический критерий объемного разрушения очаговых зон и волны маятникового типа. Новосибирск: СО РАН, 261 с.
- Павленкова Н.И. (2013) Природа границы М по геофизическим данным. *Мат-лы 45-го тект. совещ.* М.: GEOS, 138-141.

- Пейве А.В. (1961) Тектоника и магматизм. *Изв. АН СССР, сер. геол.* (3), 36-54.
- Планета Земля. (2004) Энциклопедический справочник. Том "Тектоника и геодинамика". (Ред. Л.И. Красный, О.В. Петров, Б.А. Блюман). СПб: ВСЕГЕИ, 652 с.
- Пономарев В.С. (2008) Энергонасыщенность геологической среды. М.: Наука, 379 с.
- Проблемы нелинейной сейсмологии. (1987) (Под ред. А.В. Николаева). М.: Наука, 288 с.
- Садовский М.А. (2004) Избранные труды. Геофизика и физика взрыва. М.: Наука, 440 с.
- Сверхглубокие скважины России и сопредельных регионов. (1995) СПб.: ВСЕГЕИ, 247 с.
- Седов Л.И. (1973) Механика сплошной среды. Т. 1. М.: Наука, 536 с.
- Теркот Д., Шуберт Дж. (1985) Геодинамика: Геологические приложения физики сплошных сред. Ч. 1. М.: Мир, 376 с.
- Хачай О.А., Хачай О.Ю. (2012) О построении нелинейной динамической модели отклика гетерогенной среды на сильные взрывные воздействия. *Тектоно-физика и актуальные вопросы наук о Земле: мат-лы третьей тектонофиз. конф.* Т. 2. М.: ИФЗ РАН, 415-418.
- Хачай О.А., Хачай О.Ю., Климко В.К., Шипев О.В. (2013) Кинематические и динамические характеристики медленных деформационных волн в породном массиве как отклик на взрывные воздействия. *Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: мат-лы XX Всерос. науч. конф.* Новосибирск: ИГД СО РАН, 38-42.
- Siebert L., Simkin T., Kimberly P. (2010) *Volcanoes of the World. Smithsonian Institution. Washington DC. University of California Press.* 551 p.
- Vikulin A.V., Akmanova D.R., Vikulina S.A., Dolgaya A.A. (2012) Migration of seismic and volcanic activity as display of wave geodynamic process. *Geodynam. Tectonophys.* **3**(1), 1-18. DOI:10.5800/GT-2012-3-1-0058.
- Vikulin A.V., Tveritinova T.Yu., Ivanchin A.G. (2013) Wave moment geodynamics. *Acta Geophys.* **61**(2), 245-263. DOI: 10.2478/s11600-012-0079-8.

Рецензент Ю.В. Хачай

Volcanic process in block's crust

A. V. Vikulin*, A. G. Ivanchin**

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS

** Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS

Within the author's rotational concept a brief review of geodynamic movements of the block rotating nonlinear geomedium is done. Such geodynamic movements appear to be consistent with the volcanic process. It is shown that the magma chambers that fed the strong eruption of the planet over the last million years, have a constant thickness of about 0.5 km, which does not depend on the time and type of volcanic eruption, or on its location. The new model of the magma chamber is described. The model is based on the concepts of plastic flow of "solid" substance along the block boundaries, its "overheating" above the melting point and the elastic strain with energy of 10^{15} J/km³ of superheated rock formed around "solid magma" chamber. Within the rotational concepts such elastic stresses can explained the migration of volcanic activity itself and its interaction with seismicity and tectonics. Magma chambers with such properties don't depend on the volcanic process and, in fact, are a reflection of a well-defined geodynamic condition of the Earth's crust. Since the set of magma chambers beneath the volcanic belt forms a unified thin layer, properties of these chambers can be extended to the entire Earth's crust. Within such ideas the hypothesis which explains the Moho properties by the phase transition from a state of "block crust with shear flows of substance along the block boundaries" to the state of "non-block upper mantle with volume substance flow" is proved.

Keywords: *block rotate geomedium, magma chamber, caldera, plastic flow, M border.*