

Краткие сообщения

01;12

Модель течения магмы в процессе Большого трещинного Толбачинского извержения (Камчатка)

© В.К. Балханов,¹ Ю.Б. Башкуев,¹ Н.С. Жатнуев²¹ Отдел физических проблем Бурятского НЦ СО РАН,
670047 Улан-Удэ, Россия

e-mail: ballar@yandex.ru

² Геологический институт СО РАН,

Улан-Удэ, Россия

e-mail: zhat@gin.bsnet.ru

(Поступило в Редакцию 29 июня 2010 г. В окончательной редакции 29 декабря 2010 г.)

Представлена модель подъема магмы через сеть трещинных каналов в процессе Большого трещинного Толбачинского извержения, произошедшего на полуострове Камчатка в 1975 г. Модель основана на предположении, что магматическая жидкость при течении по трещинным каналам в литосфере испытывает гидродинамическое сопротивление Бринкмана. Установлены соотношения, связывающие между собой глубину магматического очага, время подъема магмы к поверхности Земли и скорость вытекания магмы из трещинных каналов на поверхность Земли.

Введение

В настоящее время нет удовлетворительной теории, описывающей всю динамику магматических и вулканических процессов. В большой степени это связано с невозможностью непосредственного наблюдения за этими явлениями в глубинах Земли. Большое трещинное Толбачинское извержение (БТИ) одно из немногих вулканических извержений, которое было предсказано камчатскими вулканологами и которое наблюдалось с самого его начала [1]. К сожалению, сегодня никто не может уверенно прогнозировать вулканотектонические процессы ни по одному из трех главных признаков: когда? где? какой силы? Поэтому необходимо максимально внимательно относиться к достоверным фактам, полученным в ходе натуральных наблюдений. В настоящей работе используем данные, полученные в ходе наблюдения БТИ в 1975 г. [1,2]. Как следует из [1], на глубине H около 20 km образовалась система трещин с поперечными размерами 0.5–10 m, по которым спустя 10 дней на поверхность Земли излилась базальтовая магма. Приток ее Q на поверхность составляла $20 \cdot 10^6$ (тысяч тонн в год), или $Q = 630$ kg/s. Этот приток магмы можно вычислить следующим образом. Поскольку раскрытие трещины составляло 0.5–10 m, то средний линейный размер трещины будет $(0.5 + 10)/2 = 5.25$ m. Отсюда проницаемость (способность горных пород пропускать магму) трещины $k = (2 \times 5.2)/12 = 9$ m² [3]. Поскольку $H = 20$ km и время подъема $t = 10$ дней или $8.64 \cdot 10^5$ s, то скорость извержения магмы на земную поверхность будет

$$V = \frac{H}{t} = 0.023 \text{ m/s.} \quad (1)$$

Плотность базальтовой магмы $\rho = 2300$ kg/m³ [4]. Теперь можно найти приток магмы

$$Q = \rho k V = 476 \text{ kg/s.}$$

Эта величина удовлетворительно согласуется с натурными наблюдениями.

Было использовано выражение (1) для оценки скорости, которая верна для свободного движения. Течение магмы происходит по системе трещинных каналов, поэтому выражение (1) требует уточнения. Для этого предположим двухпараметрическую модель, которая позволит также связать между собой время подъема, глубину магматического очага и скорость вытекания магмы из трещинных каналов на земную поверхность.

Параметры модели

Горные породы представляют собой сплошные тела, пронизанные разветвленной сетью трещин и поровых каналов. Такие тела называют пористыми средами, которые в данном случае могут служить каналами миграции магмы к поверхности Земли. Под действием внешних сил магма приходит в движение, законы которого в пористых средах существенно отличаются от движения в свободном пространстве. При движении в пористой среде магма испытывает эффективное сопротивление, которое связано с тем, что на стенках твердого материала скорость течения магмы обращается в нуль. В пористой среде разветвленная сеть трещин образует достаточно большую внутреннюю поверхность, на которой значительное количество магмы покоится и это в целом приводит к значительному уменьшению скорости направленного течения. При условии медленности

течения, которому удовлетворяет движение магмы, сопротивление можно принять пропорциональным самой скорости течения. Такое гидродинамическое сопротивление ввел Бринкман [5]. Если V — скорость течения, то гидродинамическое сопротивление на единицу объема будет равно V/τ . Параметр τ имеет размерность времени и смысл пропускной способности пористой среды — насколько легко может течь в такой среде магма. Можно дать и другое определение — τ это время, в течение которого магма течет не замечая наличия трещинных каналов. Отсутствию пористой среды отвечает предельный переход $\tau \rightarrow \infty$.

Для оценки численного значения параметра τ примем, что она зависит только от проницаемости пород, плотности и вязкости магмы. Согласно [6], вязкость η базальтовой магмы на глубине 20 km равна 500 Pa·s. Из трех величин — проницаемости, вязкости и плотности можно составить единственную величину с размерностью времени

$$\tau = \frac{k\rho}{\eta}. \quad (2)$$

Подставляя вышеприведенные значения для используемых величин, находим $\tau = 41$ s.

Введем следующие обозначения: ∇ — оператор набла, P — давление. Тогда сила на единицу массы, вызывающая течение лавы, равна $-\nabla P/\rho$. В пористой среде давление P будет складываться из гидростатического давления, а также различных напряжений как в самой жидкости, так и на границе жидкость–твердый скелет породы. Сюда надо добавить и тепловые процессы. Эффективно всю сложную динамику механических и тепловых процессов можно учесть, заменив выражение $-\nabla P/\rho$ параметром a . Таким образом, течение магмы по системе трещинных каналов будет описываться следующим модифицированным уравнением Навье–Стокса:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = \mathbf{a} - \frac{\mathbf{V}}{\tau}.$$

Этим самым сложную динамику подъема магмы по разветвленной сети трещин предлагается моделировать двумя параметрами τ и a .

Динамика подъема магмы

Направим ось z от поверхности Земли вглубь литосферы. Рассмотрим стационарное направленное течение магмы от магматического очага на глубине H к поверхности. В этом случае модифицированное уравнение Навье–Стокса принимает следующий вид:

$$V \frac{dV}{dz} = -a + \frac{V}{\tau}. \quad (3)$$

Это уравнение элементарно интегрируется. С учетом начального условия $V(z = H) = 0$ получаем:

$$\ln \frac{1}{1 - \frac{V(z)}{a\tau}} - \frac{V(z)}{a\tau} = \frac{H - z}{a\tau^2}. \quad (4)$$

Теперь можно найти время подъема от глубины H до значения z

$$t(z) = - \int_H^z \frac{dz}{V(z)}.$$

Заменив $dz = (dz/dV)dV$ и используя (3), получаем

$$\ln \frac{1}{1 - \frac{V(z)}{a\tau}} = \frac{t(z)}{\tau}. \quad (5)$$

С помощью формул (4) и (5) динамика подъема магмы по трещинным каналам полностью решена.

Оценим численное значение параметра a . Сначала из (4) и (5) найдем

$$a = \frac{H}{\tau^2} \left[\frac{t}{\tau} + e^{-t/\tau} - 1 \right]^{-1}.$$

Поскольку $t \gg \tau$, то приближенно

$$a = \frac{H}{\tau t}. \quad (6)$$

Используя известные значения, находим

$$a = 5.6 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}^2.$$

Небольшое значение параметра a означает, что все напряжения в текущей по системе трещин магме почти полностью компенсируют друг друга.

Используя (5), находим $V = a\tau(1 - e^{-t/\tau})$ или приближенно

$$V = a\tau.$$

Подставляя известные величины, находим скорость, с которой магма изливается из трещин на поверхность Земли:

$$V = 0.023 \text{ m/s}.$$

Это значение согласуется с оценкой (1).

Заключение

В 1975 г. на полуострове Камчатка на глубине 20 km наблюдались вулканические землетрясения, инициированные активизацией на глубине магматического очага. Спустя 10 дней через образовавшуюся сеть трещин на поверхность Земли излилась базальтовая магма с притоком в 630 kg/s. Это событие получило название Большого трещинного Толбачинского извержения. Чтобы описать динамику подъема магмы по сети трещин, в уравнение Навье–Стокса введено гидродинамическое сопротивление Бринкмана. Предложенная модель позволила связать между собой глубину очага землетрясения, время подъема магмы к поверхности Земли и скорость ее течения по сети трещин. Вычислен приток жидкости, удовлетворительно согласующийся с натурными наблюдениями.

Работа частично поддержана грантами РФФИ № 08-01-98006, 08-02-98007 и интеграционными проектами СО РАН № 56 и СО РАН ДВО № 117.

Список литературы

- [1] Федотов С.А. Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка 1975–1976. М.: Наука, 1984. 638 с.
- [2] Федотов С.А. // Вулканология и сейсмология. 1993. № 3. С. 23–45.
- [3] Артемьев Е.Л., Санчес К. // Сб. тр. „Инженерно-физические условия гидроразрыва горных пород“. Л. 1987. С. 12–22.
- [4] Лебедев Е.Б., Хитаров Н.И. Физические свойства магматических расплавов. М.: Наука, 1979. 200 с.
- [5] Шейдеггер А.Э. Физика течения жидкостей через пористые среды. М.: Гостоптехиздат, 1960. 250 с.
- [6] Персиков Э.С. Вязкость магматических расплавов. М.: Наука, 1984. 160 с.