

## Экспериментальное исследование температурной зависимости диффузии воды в расплавах дацита

П. Г. Бухтияров<sup>1</sup>, Э. С. Персигов<sup>1</sup>, S. Newman<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка

<sup>2</sup>Калифорнийский технологический институт, Пасадена, США

[pavel@iem.ac.ru](mailto:pavel@iem.ac.ru)

Экспериментально изучена температурная зависимость коэффициента диффузии H<sub>2</sub>O в модельных расплавах дацита при P<sub>H<sub>2</sub>O</sub> = 20 МПа в температурном диапазоне 1000°–1200°С. Экспериментально установлено, что температурная зависимость коэффициента диффузии воды в указанных расплавах, при средней концентрации C(H<sub>2</sub>O) = 0.67 масс. %, подчиняется экспоненциальному закону Аррениуса–Френкеля:

$D = D_0 \cdot \exp(-E/RT)$ , с энергией активации процесса диффузии воды -  $E = 65 \pm 15$  кДж / моль.

*Ключевые слова:* диффузия, температура, давление, дацит, модель, ИК спектроскопия, вода, расплав

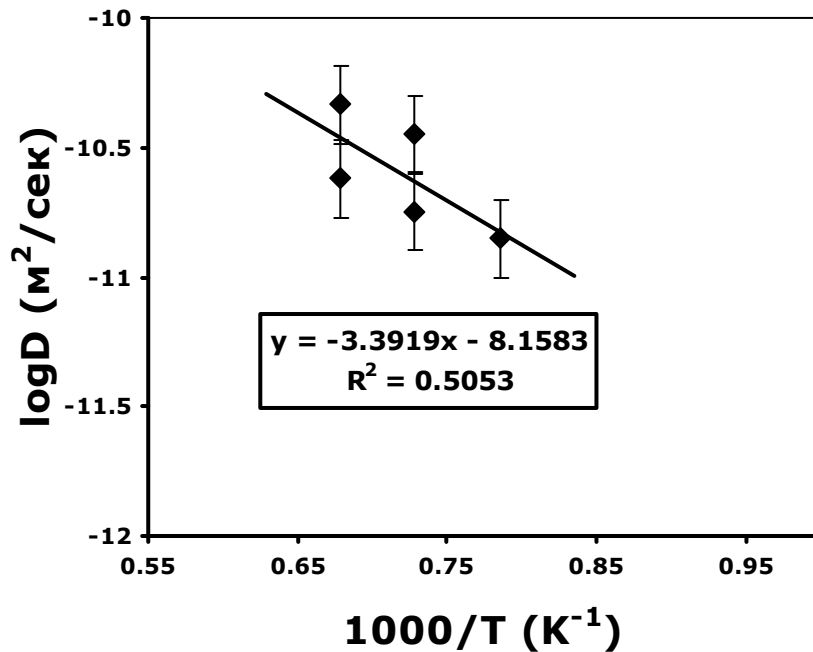
**Ссылка:** Бухтияров, П.Г., Э.С. Персигов, S. Newman (2012), Экспериментальное исследование температурной зависимости диффузии воды в расплавах дацита. *Вестник ОНЗ РАН, 4,*

Изучение температурной зависимости диффузии воды в магматических расплавах важно для понимания многих особенностей магматических процессов, таких как: дегазация магмы в процессе вулканических извержений, взаимодействие флюида и магмы, зарождение и рост кристаллов и пузырей и многих других. Так как растворимость воды значительно выше растворимости других компонентов флюида, то диффузия воды является во многом лимитирующей составляющей этих процессов. Нами было экспериментально изучена температурная зависимость диффузии H<sub>2</sub>O в модельных расплавах дацита (Ab<sub>90</sub>Di<sub>8</sub>Wo<sub>2</sub>, мол. %) при P(H<sub>2</sub>O) = 20МПа в температурном диапазоне 1000°–1200°С (рис. 1). Эксперименты проводили на установке высокого газового давления с использованием оригинального уравнителя-разделителя, который позволял проводить опыты при высоких давлениях паров воды в открытых ампулах, что не приводило к изменению первоначальной геометрии ампулы. Диффузию воды изучали методом гидратации гомогенного безводного модельного расплава дацита, который получали путем плавления стехиометрических смесей порошков природных минералов (альбит + диопсид + волластонит) при температуре 1500°С в течение 4 часов в высокотемпературной печи в воздушной атмосфере. Образцы под давлением воды в установке высокого газового давления нагревали со скоростью 1500°С/час до температуры ниже необходимой на 200–300°С. Далее, образец нагревался до температуры диффузионного опыта со скоростью 300°С/мин, выдерживался необходимое для диффузии воды время, и затем, проводилась изобарическая закалка расплава со скоростью 300–500°С/мин. Концентрацию воды вдоль диффузионных профилей в образцах (закаленных расплавах) определяли с помощью количественной микро ИК спектроскопии с использованием уравнения Beer-Lambert, а значения коэффициентов диффузии воды определяли путем аналитического [Crank, 1975] и численного решений второго диффузионного закона Фика.

Анализ экспериментальных данных показал, что температурная зависимость диффузии воды в модельных расплавах дацита при средней концентрации C(H<sub>2</sub>O) = 0.67 масс. % подчиняется экспоненциальному закону Аррениуса–Френкеля (рис. 1):

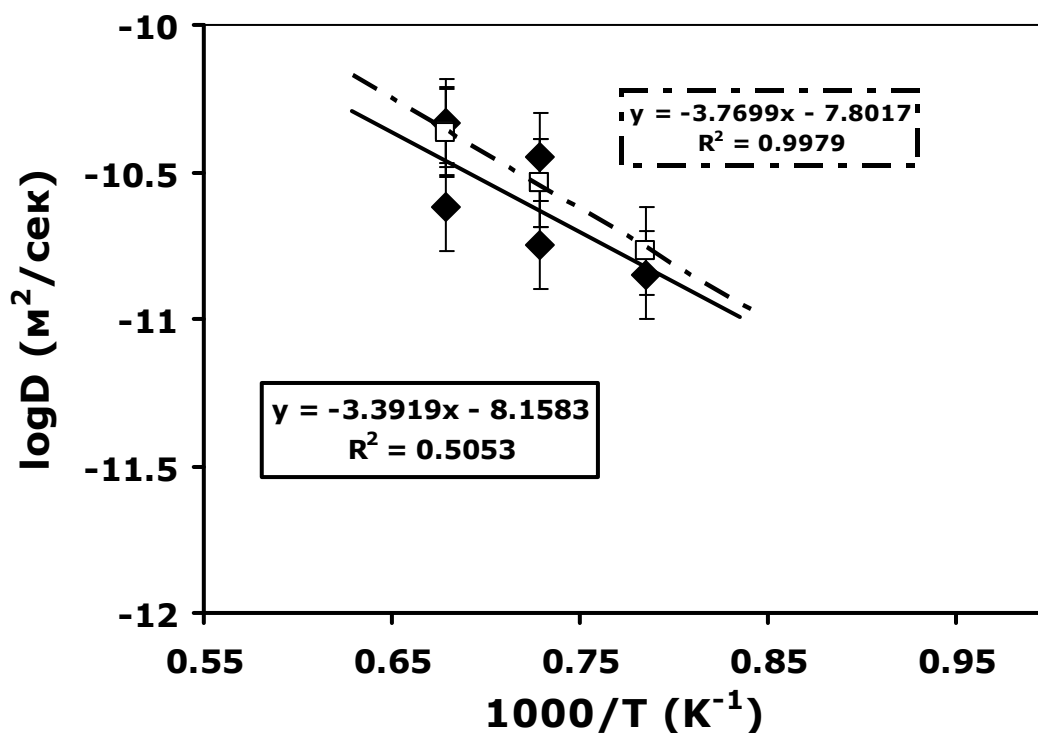
$$D = D_0 \cdot \exp(-E/RT),$$

где D<sub>0</sub> – м<sup>2</sup>/сек, предэкспоненциальная константа, R = 8.314 дж/моль·°К – универсальная газовая постоянная, E – дж/моль, энергия активации процесса диффузии воды, T – температура в °К.



**Рис. 1.** Температурная зависимость диффузии воды в водосодержащем модельном расплаве дацита ( $C_{H_2O} = 0.67$  масс. %,  $P_{H_2O} = 20$  МПа):  $\blacklozenge$  - экспериментальные значения коэффициента диффузии воды с погрешностью  $\pm 0.15$  логарифмической величины

Установленное значение энергии активации  $E = 65 \pm 15$  кДж / моль для диффузии воды в водосодержащих расплавах модельного дацита ( $C_{H_2O} = 0.67$  масс %), неплохо согласуется с ранее полученными данными для водосодержащих ( $C_{H_2O} = 0.5$  масс %) модельных гранитных расплавов -  $E = 64 \pm 10$  кДж / моль (Nowak & Behrens, 1997) и для водосодержащих ( $C_{H_2O} = 0.5$  масс %) расплавов обсидиана -  $E = 67 \pm 21$  кДж / моль [Shaw, 1973]. Вместе с тем, приведенные данные значительно меньше значений энергий активации диффузии воды в водосодержащих ( $C_{H_2O} = 0.5$  масс %) расплавах трахита -  $E = 147 \pm 42$  кДж / моль [Freda et al., 2003] и базальта ( $C_{H_2O} = 0.2$  масс %) -  $E = 126 \pm 32$  кДж / моль [Zhang & Stolper, 1991]. В этой связи необходимо отметить следующую важную и не решенную проблему по температурной зависимости диффузии воды в силикатных и магматических расплавах. Дело в том, что приведенное сопоставление энергий активации диффузии воды с одной стороны является традиционным, а с другой, строго говоря, неправомерным. Согласно уравнению (1), сопоставимые значения энергий активации диффузии воды могут быть получены только при постоянстве предэкспоненциальной константы  $D_0$ , т.е. независимости  $D_0$  от состава расплава, включая концентрацию воды, температуру и давление, что было доказано применительно к температурной зависимости вязкости силикатных и магматических расплавов [Персиков, 1991, 1998]. Однако, применительно к диффузии воды в таких расплавах, имеющиеся на сегодня экспериментальные данные не позволяют доказать постоянство  $D_0$ . Поэтому, нами предложен следующий метод решения этой проблемы. На основе установленной количественной взаимосвязи диффузии воды в силикатных и магматических расплавах в ряду обсидиан (риолит)–базальт и их вязкости, была предложена структурно-химическая модель расчета и прогноза диффузионной подвижности воды в таких расплавах при  $C_{H_2O}$  в расплавах до 3-х масс % [Персиков и Бухтияров, 2009; Persikov et al., 2010]. Результаты прогнозных расчетов температурной зависимости диффузии воды в модельных расплавах дацита по этой модели представлены на рис. 2. Как видно, экспериментальные и прогнозные зависимости имеют очень хорошую сходимость в пределах погрешности  $\pm 0.15 \log D(H_2O)$ , а установленное при этом значение энергии активации диффузии воды  $E = 64 \pm 5$  кДж / моль, практически совпало с экспериментально установленной величиной.



**Рис. 2.** Температурная зависимость диффузии воды в модельных расплавах дацита (залитые значки – экспериментальные данные, открытые значки – прогноз по модели [Persikov et al., 2010]).

**Выводы:**

1. Экспериментально установлено, что температурная зависимость коэффициента диффузии воды в модельных расплавах дацита при средней концентрации  $C(H_2O) = 0.67$  масс. % и в температурном диапазоне 1000–1200°C подчиняется экспоненциальному закону Аррениуса–Френкеля с энергией активации процесса диффузии воды  $E = 65 \pm 15$  кДж / моль.

2. Показано, что использование новой прогнозной модели расчетов  $D(H_2O)$  [Persikov et al., 2010] позволяет получать достаточно достоверные температурные зависимости коэффициентов диффузии воды в магматических расплавах.

Авторы признательны Е.М. Stolper (Калифорнийский Технологический Институт, США) за ценные дискуссии.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 12-05-00164 и ОНЗ РАН, программа № 9

**Литература**

Crank, J. (1975). The mathematics of diffusion. Clarendon Press, Oxford, 414 p.  
 Nowak, M., H. Behrens (1997). An experimental investigation on diffusion of water in haplogranitic melts, *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 126, pp. 365–376.  
 Shaw, H. R. (1997). Diffusion of H<sub>2</sub>O in granitic liquids; Part I. Experimental data; Part II. Mass transfer in magma chambers, In: “Geochemical Transport and Kinetics” A. W. Hofmann et al., Eds. Carnegie Institute Washington Publ., Washington, v. 634, pp. 139–170.  
 Freda, C., D. R. Baker., C. Romano, P. Scarlato (2003). Water diffusion in natural potassic melts, In: *Oppenheimer, C., Pyle, D.M., Barclay, J. (Eds.), Volcanic Degassing. Geol.Soc. London Special Publication*, 213, London Geological Society, pp. 52–62.  
 Zhang, Y., E. M. Stolper (1991). Water diffusion in a basaltic melt, *Nature*, v. 351. pp. 306–309.  
 Персиков, Э.С., П.Г. Бухтияров (2009). Структурно-химическая модель прогноза и расчетов вязкости магм и диффузии H<sub>2</sub>O в них в широком диапазоне составов и T,P-параметров земной коры и верхней мантии, *Геология и Геофизика*, t. 50, № 12, сс. 1393–1408

## БУХТИЯРОВ И ДР.: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Persikov, E. S., S. Newman, P. G. Bukhtiyarov, A. N. Nekrasov, E. M. Stolper (2010). Experimental study of water diffusion in haplobasaltic and haploandesitic melts, *Chemical Geology*, v. 276, pp. 241–256.

Persikov, E. S. (1991). The viscosity of magmatic liquids: experiment, generalized patterns. A model for calculation and prediction, Applications, *In: Physical chemistry of magmas, Advances in Physical Geochemistry*, L.L. Perchuk & I. Kushiro Eds., Springer-Verlag, New York, v. 9, pp. 1–40.

Persikov, E. S. (1998). The viscosity of model and magmatic melts under  $P, T$ -parameters of the Earth's crust and upper mantle, *Russian Geology and Geophysics*, v. 39, pp. 1780–1792.