

**Использование Fe-Mg зональности в оливинах для расчетов скоростей подъема и времени эволюции магмы до извержения (первые результаты российско-немецкого проекта по изучению оливинов в камчатских базальтах)**

**Б.Н. Гордейчик<sup>1</sup>, Т.Г. Чурикова<sup>2</sup>, О.В. Бергаль-Кувикас<sup>2</sup>, А. Кронц<sup>3</sup>, А.Г. Симакин<sup>1</sup>, Г. Вернер<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка,  
e-mail: gordei@mail.ru*

<sup>2</sup>*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский*

<sup>3</sup>*Отделение геохимии Центра геологических наук Геттингенского университета,  
Гёттинген, Германия*

Химическая зональность в оливиновых фенокристаллах и моделирование процессов диффузии использовались последние 10 лет для оценки скорости подъема и времени эволюции магмы до извержения. Фундаментальное предположение заключается в том, что смешение магм в магматическом резервуаре приводит к диффузионному обмену между кристаллами оливина и окружающим расплавом. Если глубина зоны смешения известна, то можно оценить скорость подъема магмы к поверхности. Мы будем использовать этот подход для разнообразных базальтовых лав Камчатки с целью оценки скорости подъема и времени эволюции магм до извержения в одной из наиболее активных зон субдукции в мире, которая обладает большим количеством примитивных магм. Здесь представлены цели, задачи и первые результаты российско-немецкого проекта по изучению зональности оливинов в породах камчатских вулканов.

### **Введение**

В геохимии и петрологии существует фундаментальное понимание основных магматических процессов, которые вызывают дифференциацию и смешение магм до извержения. Последнее десятилетие явилось периодом интенсивных исследований, направленных на понимание скоростей протекания таких процессов, как дифференциация, ассимиляция, смешение и извержение. Но в то же время остаются вопросы, на которые до сих пор нет ответов: как быстро мантийные расплавы могут достигать поверхности Земли и пополнять коровые магматические резервуары под вулканами; каково время нахождения расплава в промежуточном очаге перед извержением; как эти процессы выражены в поступающих геофизических сигналах, регистрируемых на поверхности? Поскольку оливин является, как правило, первой кристаллизующейся фазой в силикатном расплаве и содержит важную информацию о составах первичных расплавов, зональность в оливинах изучалась наиболее интенсивно [4]. Большинство исследований фокусируется на приповерхностных частях магматических питающих систем, и вопрос о том, как быстро мантийные расплавы проходят через всю кору от глубинного мантийного источника до поверхности, до сих пор остается не решенным, поскольку связь между мантийным расплавом и лавой, которая появляется на поверхности, обычно в значительной мере стирается процессами охлаждения, кристаллизации и смешения с другими расплавами внутри земной коры.

### **Цели, задачи проекта**

Главной целью проекта является изучение химической эволюции магматических расплавов в течение их подъема к поверхности. Задачи проекта следующие: 1. Оценки временных интервалов подъема магмы от мантийного источника до поверхности, с помощью диффузионных геохронометров, 2. Изучение режимов кристаллизации в магматической системе, документированных в зональности оливинов.

### **Методика и обработка данных измерений**

Существует фундаментальное понимание того факта, что поступление в магматический очаг новых порций лавы иного состава может являться спусковым крючком извержения. При этом может возникнуть диффузионный обмен между уже имеющимися в очаге оливинами и новыми порциями лавы. Таким образом, в зональности оливинов может быть записана информация о процессах, предшествующих извержению. В последнее десятилетие благодаря увеличению точности измерений микроэлементов стало возможным изучать содержания с точностью до нескольких десятых ppm с диаметром анализирующего пучка 5  $\mu\text{m}$ . Один из примеров использования высокоточных измерений – изучение диффузии как «природных часов», отражающих скорости поднятия магмы к земной поверхности. Изучение концентраций элементов в оливинах и определение P-T условий, от которых зависят коэффициенты диффузии, дает возможность рассчитать время и длительность процесса [4].

### **Апробация методики измерений**

Метод расчетов скоростей подъема и времени нахождения магмы в коре на основе диффузии был удачно использован при изучении вулканов Фуего и Иразу в Центральной Америке [7, 10], гавайских вулканов [8, 9]. К тому же на основе принципа «естественных часов» были описаны и изучены процессы, происходящие не только в коре, но и в верхней мантии [4, 5].

### **Объекты исследований на Камчатке**

Камчатская зона субдукции является исключительно интересным примером островодужной системы для исследования подъема магмы от зоны плавления источника до поверхности, поскольку этот регион (1) богат основными лавами с высоко-Mg оливиновыми фенокристаллами, (2) обладает высокой скоростью магмообразования (например, Ключевской вулкан [2]), (3) содержит обширное разнообразие вулканических образований, что отражает существование принципиально разных питающих систем с различными скоростями подъема магмы (в т.ч. щитовые и стратовулканы, моногенные конуса, лавовые купола, маары), (4) район геохимически исследован, особенно изучены активные вулканы и наиболее примитивные породы.

На Камчатке можно изучать множество видов магматизма: от различных вулканических комплексов (в т.ч. стратовулканы, дайки, вершинные извержения и моногенные конуса), различных возрастов (от плейстоценового до голоценового и исторических извержений), сформированных в различных магматических режимах (долгоживущие вулканы - моногенные конуса) и различного макросостава (от базальтов до андезибазальтов с разными геохимическими характеристиками, включая обогащенные по LILE). Для столь разнообразных режимов извержений мы предполагаем увидеть различную историю зональности в оливинах, которые помогут определить хронологию процессов их образования и поступления на поверхность.

### **Первые результаты проекта**

В течение первого года проекта было проанализировано пять объектов с трех активных вулканов Камчатки – Ключевской, Шивелуч и Толбачик (рис. 1, 2). Результаты исследований представлялись на российских и международных конференциях [1, 6] и могут быть изложены следующим образом:

1) Измеренные профили зональности в оливинах различных Камчатских вулканов меняются от простых до необычно сложных, включая прямую, обратную и

повторяющуюся зональности, что указывает на значительные изменения в составе магм.

2) События смешения могут наблюдаться как на мантийном уровне (извержение 1941 г. на вулкане Толбачик и высокомагнезиальные базальты вулкана Шивелуч), так и в коровых очагах (извержение 2013 г. вулкана Ключевской и извержение Толбачика 2012-2013 гг.).

3) Время нахождения кристаллов оливинов в очагах до извержения после событий смешения меняется от 6 до 225 дней для извержений из коровых магматических очагов и от 39 до 621 дня для смешения на мантийном уровне. Скорости подъема магмы при этом имеют единый диапазон – от 1 до 62 м/ч.

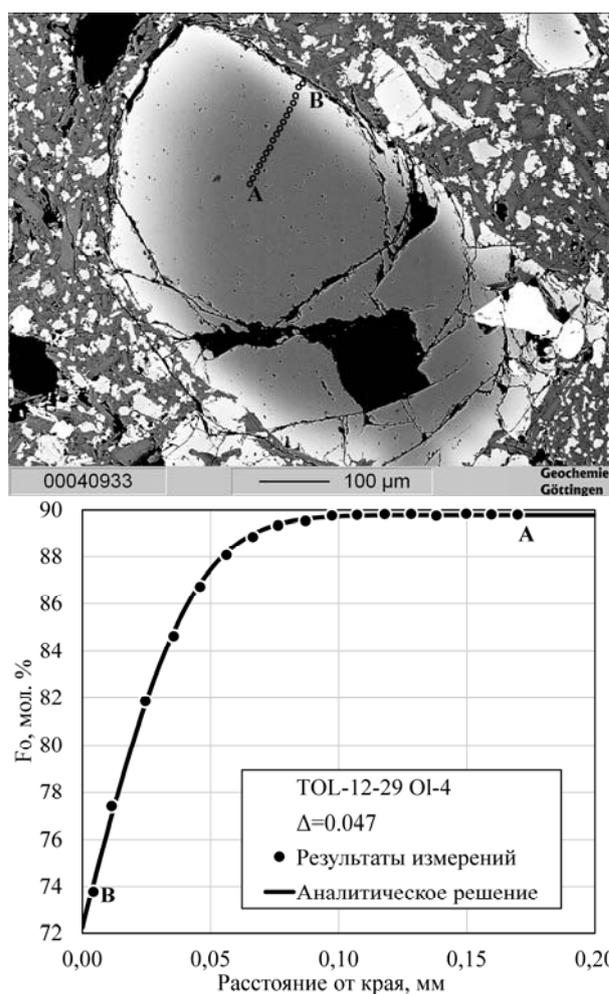


Рис. 1. Профиль состава оливина из высоко-Mg высоко-K базальта побочного извержения 1941 года на вулкане Толбачик. Точка “А” соответствует центру кристалла, “В” – краю кристалла. Кружки – измеренные значения форстерита, линия – аналитическое решение уравнения диффузии, подобранное методом наименьших квадратов.

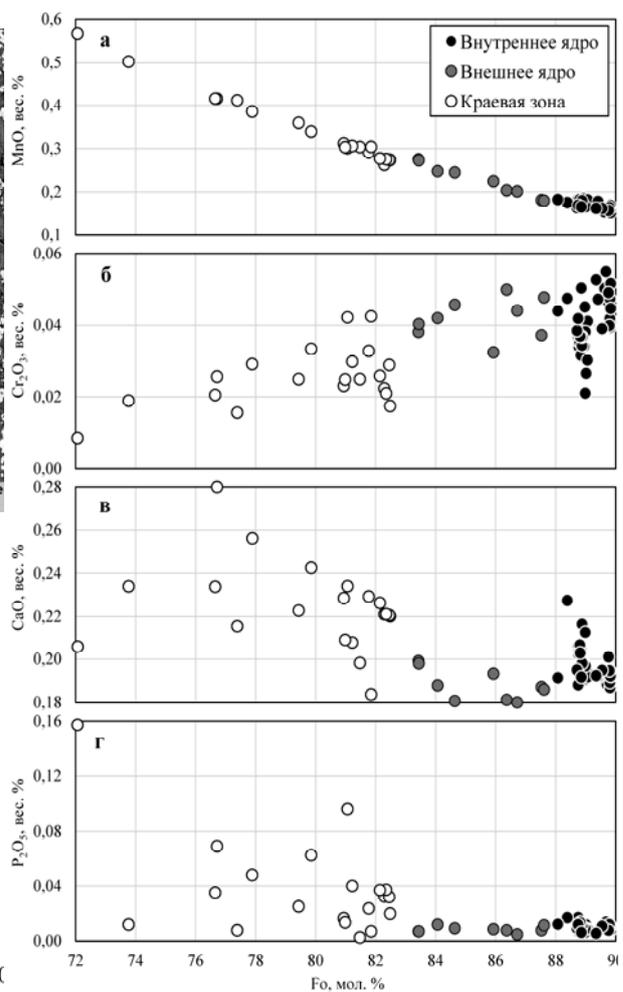


Рис. 2. Зависимость концентрации микроэлементов от содержания форстерита в оливинах из высоко-Mg высоко-K базальта побочного извержения 1941 года на вулкане Толбачик. Черные кружки – внутреннее ядро кристалла, серые кружки – внешнее ядро, и белые кружки – краевая зона.

### Заключение

Появление высокоточных методов исследований позволяет использовать процесс диффузии как индикатор времени нахождения магмы в коре и оценивать скорости подъема магм. Камчатский регион предоставляет чрезвычайно разнообразные

объекты (в том числе основного состава) для таких исследований. Таким образом, исследования могут дать полноценную картину условий эволюции магм с границ верхней мантии до земной поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ-DFG № 16-55-12040.

### Список литературы

1. Гордейчик Б. Н., Чурикова Т. Г., Кронц А. и др. (2016). Fe-Mg и микроэлементная зональность в камчатских оливинах // Восьмая международная научная конференция. Вулканизм, биосфера и экологические проблемы. г. Майкоп-Туапсе: Адыгейский государственный университет. 2016. С. 27-29.
2. Bergal-Kuvikas O.V. Geochemical studies of volcanic rocks from the northern part of Kuril-Kamchatka arc: Tectonic and structural constraints on the origin and evolution of arc magma. Ph.D. thesis. Hokkaido University. 2015. P. 190.
3. Cost F., Chakraborty, S. The effect of water on Si and O diffusion rates in olivine and implications for transport properties and processes in the upper mantle // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2008. 166(1-2). P.11-29.
4. Chakraborty S.. Diffusion coefficients in olivine, wadsleyite and ringwoodite // Reviews in mineralogy and geochemistry. 2010. 72 (1), P. 603-639.
5. Dohmen R., Chakraborty S., & Becker H.-W. Si and O diffusion in olivine and implications for characterizing plastic flow in the mantle // Geophysical Research Letters. 2002. 29(21). p. 4-26.
6. Gordeychik B., Churikova T., Kronz A. et al. First data on magma ascent and residence times retrieved from Fe-Mg and trace element zonation in olivine phenocrysts from Kamchatka basalts // Geophysical Research Abstracts, 18. EGU General Assembly, Vienna, Austria, 16-22 April 2016.
7. Lloyd A. S., Plank T., Ruprecht P. et al. Volatile loss from melt inclusions in pyroclasts of differing sizes // Contributions to Mineralogy and Petrology, 2013. 165(1). P. 129-153.
8. Padrón-Navarta J. A., Hermann J., O'Neill H. S.. Site-specific hydrogen diffusion rates in forsterite // Earth and Planetary Science Letters, 2014. 392. P. 100-112.
9. Peslier A. H., Bizimis, M., & Matney M.. Water disequilibrium in olivines from Hawaiian peridotites: Recent metasomatism, H diffusion and magma ascent rates // Geochimica et Cosmochimica Acta, 2015. 154. P. 98-117.
10. Ruprecht P., Plank T. Feeding andesitic eruptions with a high-speed connection from the mantle // Nature. 2013. 500 (7460). P. 68-72.