

**Экспериментальное исследование распределения редких элементов между натрийсодержащим мэйджоритовым гранатом и расплавом при 8.5 ГПа**

А. В. Бобров<sup>1</sup>, Ю. А. Литвин<sup>2</sup>, А. В. Кузюра<sup>2</sup>, А. М. Дымшиц<sup>3</sup>, Т. Джеффрис<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

<sup>2</sup>Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка

<sup>3</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва

<sup>4</sup>Музей естественной истории, Лондон, Великобритания

[archi@geol.msu.ru](mailto:archi@geol.msu.ru)

В работе представлены первые результаты экспериментального изучения межфазового распределения редких и редкоземельных элементов в системе с участием натрийсодержащего (до 1 мас. % Na<sub>2</sub>O) мэйджоритового граната при 8.5 ГПа и 1500–1800°C. В исследованных образцах выявлено значительное обогащение расплавов относительно гранатов редкоземельными элементами. Для всех гранатов установлено увеличение содержаний тяжелых редких земель и иттрия, а также некоторое выполаживание кривых распределения при увеличении содержания Na-мэйджоритового компонента. Для пироксенов характерно гораздо более однородное распределение редких элементов между минералом и расплавом.

*Ключевые слова:* эксперимент при высоких температурах и давлениях, натрийсодержащий мэйджоритовый гранат, межфазовое распределение редких и редкоземельных элементов.

**Ссылка:** Бобров А. В., Ю. А. Литвин, А. В. Кузюра, А. М. Дымшиц, Т. Джеффрис (2012), Экспериментальное исследование распределения редких и редкоземельных элементов между натрийсодержащим мэйджоритовым гранатом и расплавом при 8.5 ГПа, *Вестник ОНЗ РАН*, 4, NZ9001, doi:10.2205/2012NZ\_ASEMPG

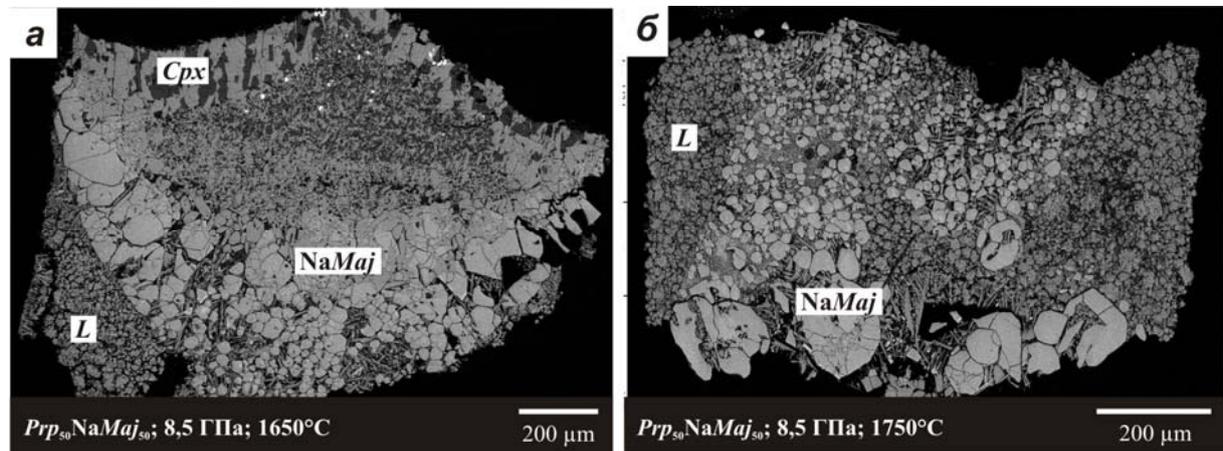
Изучение межфазового распределения редких и редкоземельных элементов в многокомпонентном и многофазовом мантийном веществе в последнее время вызывает значительный интерес исследователей в связи с возможностью получения надежной информации о процессах геохимической эволюции глубинных зон Земли. Особое место среди этих работ занимают экспериментальные исследования при высоких *PT*-параметрах, проведенные как для алюмосиликатных [Klemme et al., 2002; Pertermann et al., 2004], так и для карбонатно-силикатных алмазообразующих [Kuzyura et al., 2010] систем с природным химизмом. Исследования межфазового распределения редких и редкоземельных элементов в мантийных магматических системах с участием мэйджоритового граната крайне ограничены [Draper et al., 2003], что и определило наш интерес к экспериментальному изучению этих элементов в системе с участием Na-содержащего мэйджоритового граната.

В работе [Bobrov et al., 2008] нами было показано, что вхождение натрия в мэйджоритовый гранат осуществляется в виде компонента Na<sub>2</sub>MgSi<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (так называемый натриевый мэйджорит, *NaMaj*) и контролируется тремя главными факторами: давлением, температурой и щелочностью расплава. На основе полученных ранее результатов, кристаллизация гранатов с существенными содержаниями натрия (до 1 мас.% Na<sub>2</sub>O) прогнозировалась нами для богатых натрием стартовых составов (~40–60 мол.% *NaMaj*) при давлении 8.5 ГПа вблизи солидуса системы пироп (*Prp*)–*NaMaj*.

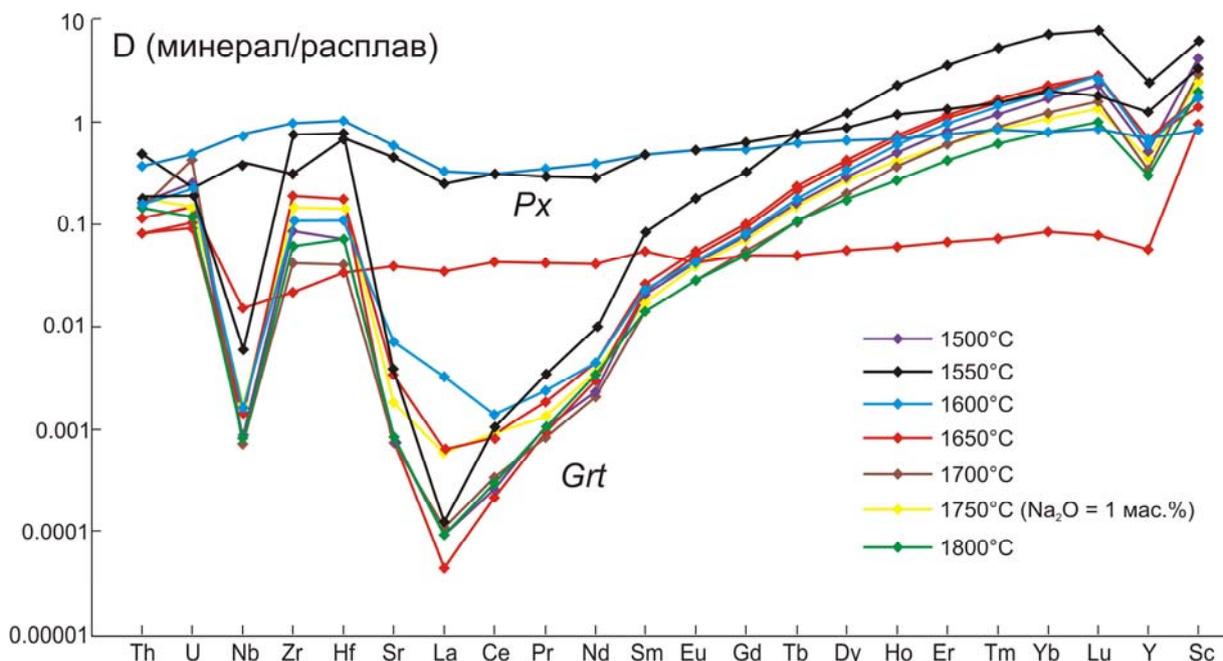
Исследования проводились в ИЭМ РАН на высокобарной тороидальной установке типа «наковальня с лункой» с использованием специальных ячеек с графитовыми нагревателями [Bobrov et al., 2008] при стандартизированном давлении 8.5 ГПа, в диапазоне температур 1500–1800°C. К стартовому составу *Prp*<sub>50</sub>*NaMaj*<sub>50</sub> (мол.%) добавлялись малые (2 мас.%) контролируемые количества редких и редкоземельных элементов (Li, Rb, Cs, Ba, Th, U, Ta, Nb, La, Ce, Pb, Pr, Sr, Nd, Zr, Hf, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Y, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Sc, Zn), в основном в виде оксидов. Длительность экспериментов зависела от температуры и составляла от 30 до 90 мин.

Во всем температурном диапазоне *T* = 1500–1700°C в экспериментальных образцах представлена фазовая ассоциация клинопироксен + гранат + расплав (рис. 1а), которая с повышением температуры сменяется двухфазовой ассоциацией гранат + расплав (рис. 1б). Все

гранаты имеют однородный состав и характеризуются избыточным содержанием кремния (относительно 3 ф.е.) и примесью натрия. Максимальное содержания  $\text{Na}_2\text{O}$  (1.05 мас.%) было установлено в гранате, полученном при  $1750^\circ\text{C}$  (опыт 2327). Клинопироксен по составу отвечает жадеиту с незначительной примесью энстатитового компонента (до 4 мас.%MgO). Расплав представлен тонкозернистым закаленным агрегатом пироксена и коэсита с небольшим количеством граната. Размеры зерен в этом агрегате несколько варьировали в пределах отдельных образцов, и для анализа были выбраны наиболее мелкозернистые участки.



**Рис. 1.** Структурные особенности экспериментальных образцов, полученных в системе  $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{-Na}_2\text{MgSi}_5\text{O}_{12}$  при 8.5 ГПа. Изображения в отраженных электронах



**Рис. 2.** Коэффициенты распределения редких и редкоземельных элементов между гранатом (*Grt*) и расплавом и пироксеном (*Px*) и расплавом в экспериментальных образцах в зависимости от температуры

Образцы исследовались аппаратом LA модели New Wave UP193FX с ICP-MS модели Agilent 7500cs в Лаборатории Аналитической Химии отделения Минералогии в Музее Естественных Наук (Лондон, Великобритания). Стандартами для калибровки анализов по редкоземельным элементам являлись синтетические стекла NIST 612 и BCR-2g.

На рис. 2 показаны изменения коэффициентов распределения редких и редкоземельных элементов в зависимости от температуры, которая, в свою очередь, контролирует содержание натрия в мейджоритовом гранате. В исследованных образцах выявлено значительное обогащение расплавов относительно гранатов редкоземельными элементами. Для всех гранатов установлено увеличение содержаний тяжелых редких земель и иттрия, а также некоторое

## БОБРОВ И ДР.: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

выползание кривых распределения при увеличении содержания Na-мэйджоритового компонента, что соответствует снижению температуры. Обращает на себя внимание более высокое значение коэффициентов распределения циркония по сравнению с гафнием почти для всех гранатов, за исключением наиболее высокотемпературных (1800°C), в которых содержания  $\text{Na}_2\text{O}$  не превышают 0.3–0.4 мас.%. Коэффициенты распределения для легких редких земель остаются сопоставимы с менее глубинными разностями гранатов. Для пироксенов (рис. 2) характерно гораздо более однородное распределение редких элементов между минералом и расплавом.

*Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты 10-05-00654 и 12-05-00426) и Советом при Президенте РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – докторов наук и ведущих научных школ (гранты МД-534.2011.5 и НШ-5877.2012.5).*

### Литература

Bobrov, A. V., Yu. A. Litvin, L. Bindi, A. M. Dymshits (2008). Phase relations and formation of sodium-rich majoritic garnet in the system  $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ – $\text{Na}_2\text{MgSi}_5\text{O}_{12}$  at 7.0 and 8.5 GPa, *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 156, p. 243–257.

Draper, D. S., D. Xirouchakis, C. B. Agee (2003). Trace element partitioning between garnet and chondritic melt from 5 to 9 GPa: implications for the onset of the majorite transition in the martian mantle, *Phys. Earth Planet. Inter.*, v. 139, p. 149–169.

Klemme, S., J. D. Blundy, B. J. Wood (2002). Experimental constraints on major and trace element partitioning during partial melting of eclogite, *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 66, p. 3109–3123.

Kuzyura, A. V., F. Wall, T. Jeffries, Yu. A. Litvin (2010). Partitioning of trace elements between garnet, clinopyroxene and diamond-forming carbonate-silicate melt at 7 GPa, *Mineral. Mag.*, v. 74, p. 227–239.

Pertermann, M., M. M. Hirschmann, K. Hametner, D. Gunther, M. W. Schmidt (2004). Experimental determination of trace element partitioning between garnet and silica-rich liquid during anhydrous partial melting of MORB-like eclogite, *Geochem. Geophys. Geosystems*, v. 5, No. 5.