

**Межфазовое распределение редких элементов при частичном плавлении алмазообразующей перидотит-карбонатитовой системы при 8.5 ГПа**

1.

А. В. Кузюра<sup>1</sup>, Ю. А. Литвин<sup>1</sup>, П. Г. Васильев<sup>2</sup>, Т. Джеффрис<sup>3</sup>, Ф. Волл<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup>Московский государственный университет им М.В.Ломоносова, геологический факультет, Москва

<sup>3</sup>Natural History Museum, UK

<sup>4</sup>Cornwall Campus of University of Exeter, UK

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

Данное экспериментальное исследование при 8.5 ГПа и до 1510°C направлено на изучение геохимического поведения редких элементов в модельной перидотит-карбонатитовой системе состава  $[(\text{Ol}_{36-60}\text{OPx}_{16}\text{CPx}_{12-24}\text{Grt}_{12-24})_{30}\text{Carb}_{70}]_{99}\text{RE}_1$ . Смесь редких 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, и Zn была добавлена к системе. На основе анализов LA-ICP-MS были рассчитаны коэффициенты межфазового распределения редких элементов. Основной характеристикой картины перераспределения является то, что легкие редкие элементы (La, Ce, Pr) распределяются в основном в расплавную фазу и оливин, в то время как средние и тяжелые элементы (Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) – в гранат. Такие элементы как Zr, Hf, Y, и Sc также накапливаются в гранате, а остальные элементы концентрируются в карбонатно-силикатном расплаве. Для оливина характерно интенсивное накопление легких редких элементов - Li, Rb, Cs, Ba, а также Th, U, Pb, и Zn. Следует отметить, что клинопироксен практически не принимает участия в перераспределении редких элементов. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют, что распределение редких элементов между фазами системы перидотит-карбонатит в условиях ее частичного плавления при 8.5 ГПа практически не зависит от состава расплава.

*Ключевые слова: редкие элементы, межфазовое распределение, система перидотит-карбонатит, эксперимент, высокие давления, алмазообразование*

**Ссылка:** Кузюра, А. В., Ю. А. Литвин, П. Г. Васильев, Т. Джеффрис, Ф. Волл (2012), Межфазовое распределение редких элементов при частичном плавлении алмазообразующей перидотит-карбонатитовой системы при 8.5 ГПа, Вестник ОНЗ РАН, 4, NZ9001, doi:10.2205/2012NZ\_ASEMPG.

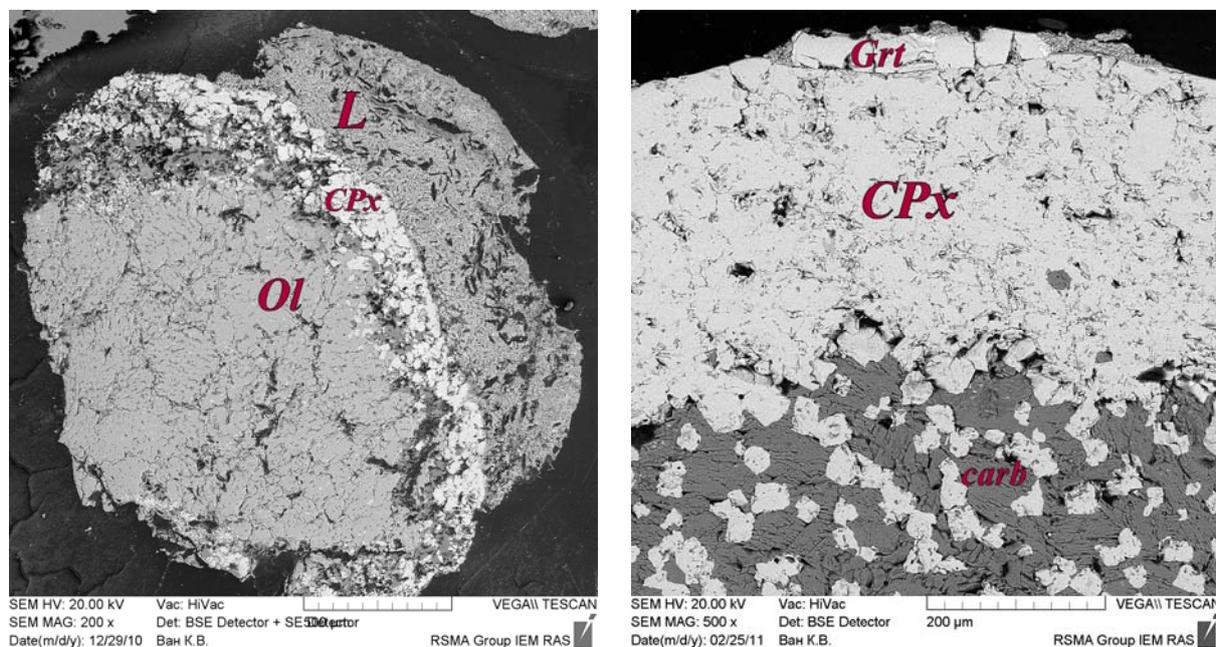
Закономерности межфазового распределения редких и рассеянных элементов типа кристалл-расплав и кристалл-флюид в магматических системах важны при моделировании процессов их плавления и кристаллизации, изучении физико-химической природы мантийного магматизма, происхождения включенных в алмазы минеральных фаз перидотитового и эклогитового парагенезисов [Griffin *et al.*, 1996; Sobolev, 1996; O'Reilly, Vannucci, 2004].

В настоящем экспериментальном исследовании изучается геохимическое поведение редких элементов в процессе алмазообразования в гетерогенной перидотит-карбонатитовой системе, определяющей ультрабазитовую специализацию состава изменчивой материнской среды природных алмазов. Подобные исследования были проведены ранее при частичном плавлении многокомпонентной системы эклогит-карбонатит и природного меланократового карбонатита Чагатайского комплекса [Kuzyura *et al.*, 2008; Кузюра *и др.*, 2011].

Экспериментальные исследования равновесного распределения редких элементов типа минерал-расплав и минерал-минерал в системе перидотит-карбонатит выполнены на установке типа «наковальня-с-лункой» (ИЭМ РАН) при 8.5 ГПа. В экспериментах использован представительный набор редких элементов (RE), в основном, в виде оксидов: 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, and Zn. Стартовые соотношения компонентов соответствовали формуле  $[(\text{Ol}_{36-60}\text{OPx}_{16}\text{CPx}_{12-24}\text{Grt}_{12-24})_{30}\text{Carb}_{70}]_{99}\text{RE}_1$ . Электронно-микроскопические и микрорентгеноспектральные исследования

выполняли на полированных поверхностях экспериментальных образцов (после закалки) с углеродным напылением в ИЭМ РАН. Содержания редких элементов на тех же образцах после удаления углеродного напыления определяли методом LA-ICP-MS в минералогическом отделении Музея Естественной Истории в Лондоне. Анализировали участки закалочной фазы расплава и изометрические зерна минералов – граната, клинопироксена и оливина.

В экспериментах при 8.5 ГПа и 1510°C в карбонатно-силикатном расплаве формировались достаточно крупные (более 100 мкм) кристаллы граната, клинопироксена и оливина (рис. 1).



**Рис. 1.** Образованные при частичном плавлении перидотит-карбонатитовой системы минеральные фазы (гранат Grt, оливин Ol, клинопироксен Cpx, карбонат carb) и раскристаллизованная мелкозернистая фаза после закалки расплав L.

Образование ортопироксена не установлено. После закалки расплав представляет собой мелкокристаллический агрегат, в связи с чем выбирались наиболее мелкозернистые участки, анализ проводился по площадям  $10 \times 10$ – $100 \times 100$  мкм с использованием микрозонда и метода LA-ICP-MS.

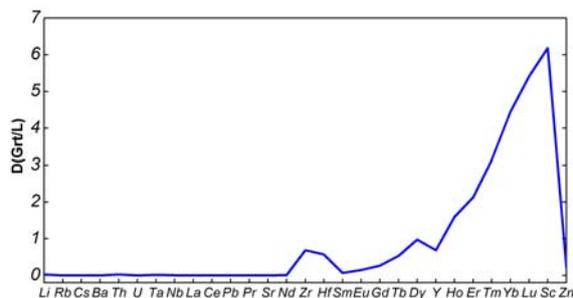
На основе анализов LA-ICP-MS были рассчитаны коэффициенты межфазового распределения редких элементов для пар оливин-расплав, клинопироксен-расплав, гранат-расплав, а также оливин-гранат. Построены спайдерграммы (рис.2), наглядно демонстрирующие распределение редких элементов.

Из анализа спайдерграмм видно, что гранат и оливин являются главными участниками межфазового распределения для алмазообразующей перидотит-карбонатитовой системы. Основной характеристикой картины перераспределения является то, что легкие редкие элементы (La, Ce, Pr) распределяются в основном в расплавную фазу и оливин, в то время как средние и тяжелые элементы (Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) – в гранат ( $K_d = 1$ – $6$ ). Такие элементы как Zr, Hf, Y, и Sc также накапливаются в гранате ( $K_d = 1$ – $5$ ), для оливина характерно интенсивное накопление легких редких элементов - Li, Rb, Cs, Ba ( $K_d = 2.5$ – $5$ ), а также Th, U, Pb, и Zn ( $K_d = 1.5$ – $4.5$ ). Максимальные  $K_d = 5$ – $6$  в паре гранат-расплав зафиксированы для Sc и Lu. Следует отметить, что клинопироксен практически не принимает участия в перераспределении редких элементов в случае перидотит-карбонатитовой системы.

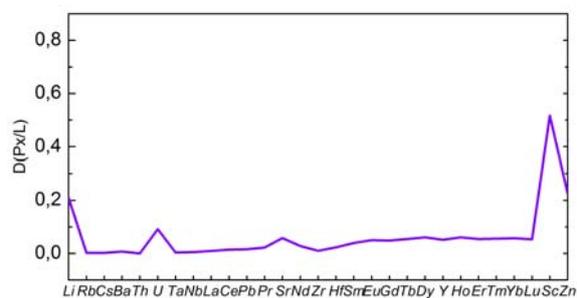
Новые экспериментальные данные приложены к интерпретации особенностей содержания редких элементов в парагенных включениях перидотитового парагенезиса в природных алмазах. Для этого полученные картины распределения сравнивались с данными других исследователей.

Ранее распределение редких элементов между гранатом и карбонатитовым расплавом, оливином и карбонатитовым расплавом, а также клинопироксеном и карбонатитовым расплавом (а также иными химически различными расплавами) экспериментально

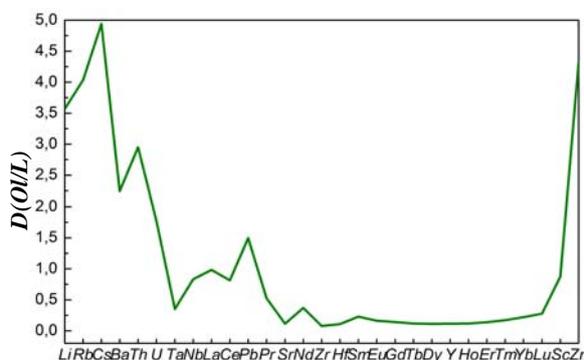
исследовалось для ограниченного набора редких элементов при 1.8–3.3 ГПа и 1000–1400°C [Sweeney *et al.*, 1992, 1995; van Westrenen *et al.*, 1994, Walter *et al.*, 2008]. Хотя физические условия данных экспериментов ниже РТ-параметров области стабильности алмаза, обнаруживаются общие черты в контрастном поведении легких и тяжелых REE и других редких элементов.



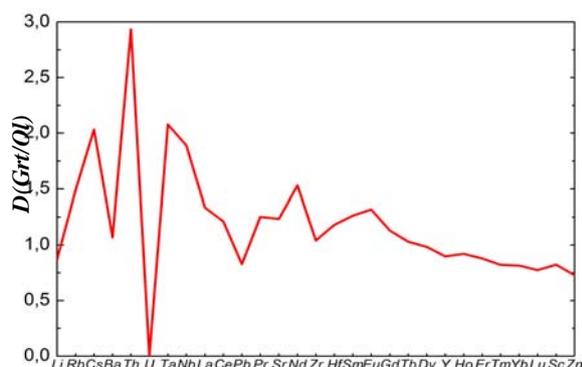
а) Распределение редких элементов в паре гранат/карбонатно-силикатный расплав



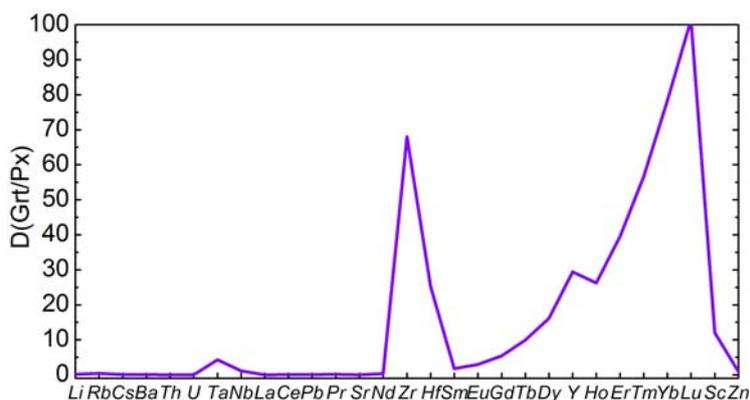
б) Распределение редких элементов в паре клинопироксен/карбонатно-силикатный расплав



в) Распределение редких элементов в паре оливин/карбонатно-силикатный расплав



г) Распределение редких элементов в паре гранат/оливин



д) Распределение редких элементов в паре гранат/клинопироксен

**Рис. 2.** Спайдер-диаграммы распределения редких элементов для разных пар фаз

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют, что распределение редких элементов между фазами системы перидотит-карбонатит в условиях ее частичного плавления при 8.5 ГПа практически не зависит от состава расплава. Тяжелые РЕ концентрируются в гранате, а легкие – в оливине. Поведение алмазообразующих карбонатно-силикатных, карбонатных или силикатных расплавов, равновесных с силикатными минералами в отношении распределения редких элементов, судя по полученным в настоящей работе и ранее результатам, является аналогичным.

Исследования геохимии сингенетических включений с ростовыми карбонатно-силикатными расплавами и минералами, которые в них кристаллизовались вместе с алмазом, не просты, и данные о коэффициентах распределения редких элементов между минеральными и расплавленными фазами алмазообразующих систем мантии Земли не были известны до настоящей работы. Изучение закономерностей межфазового распределения редких элементов для мантийных алмазообразующих процессов становится возможным в связи с развитием методов физико-химического эксперимента в сочетании с высокочувствительными аналитическими методами. Эти исследования имеют и более общее геохимическое значение, поскольку формирование ростовых сред для основной массы природных алмазов и сингенетически включенных в них минералов являются частью общего процесса магматической эволюции мантийного вещества и сопряжено с ним физико-химически и пространственно.

*Работа поддержана грантами РФФИ 10-05-00654, 11-05-0040, грантом Президента РФ № МК- 913.2011.5.*

### **Литература**

Griffin, W. L., D. Smith, C. G. Ryan et al. (1996). Trace element zoning in mantle minerals: Metasomatism and thermal events in the upper mantle, *Canadian Mineralogist*, v. 34, pp. 1179–1193.

Sobolev, A.V. (1996). Melt inclusions in minerals as a source of principal petrologic information, *Petrology*, v. 4, pp. 209–220.

O'Reilly, S. Y., R. Vannucci (2004). Trace element fingerprinting: laboratory studies and petrogenetic processes, *Lithos*, v. 75, P. ix–xi.

Kuzyura, A. V., T. Jeffries, F. Wall, Yu. A. Litvin (2008). Partitioning of trace elements between garnet, clinopyroxene and diamond-forming carbonate-silicate melt at 7 GPa, *Mineralogical Magazine*, v. 74, № 2, pp. 227–239.

Кузюра, А. В., Ю. А. Литвин, В. Ю. Окоемова, П. Г. Васильев, Ф. Волл, Т. Джеффрис (2011). Экспериментальные исследования распределения редких элементов в алмазообразующих эклогит-карбонатитовой и перидотит-карбонатитовой системах, В кн. «Тезисы докладов Ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (ЕСЭМПГ-2011)», с. 48–49.

Sweeney, R. J., D. H. Green, S. H. Sie (1992). Trace and minor element partitioning between garnet and amphibole and carbonatitic melt, *Earth and Planetary Science Letters*, v. 114, № 1-2, pp. 1–14.

Sweeney, R. J., V. Prozesky, W. Przybylowich (1995). Selected trace and minor element partitioning between peridotite minerals and carbonatite melts at 18-46 kb pressure, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 59, pp. 3671–3683.

van Westrenen, W., J. Blundy, B. Wood (1999). Crystal-chemical controls of trace element partitioning between garnet and anhydrous silicate melt, *American Mineralogist*, v. 84, pp. 838–847.

Walter, M. J., G. P. Bulanova, L. S. Armstrong, et al (2008). Primary carbonatite melt from deeply subducted oceanic crust, *Nature*, v. 454, pp. 622–626.