

## Алмазообразующая эффективность хлорид-силикат-карбонатных расплавов

А. В. Бобров<sup>1</sup>, Ю. А. Литвин<sup>2</sup>, Л. С. Исмаилова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова, Москва

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

[archi3@yandex.ru](mailto:archi3@yandex.ru)

*Ключевые слова:* синтез алмаза, карбонатит, хлорид, эклогит

**Ссылка:** Бобров, А. В., Ю. А. Литвин, Л. С. Исмаилова (2011), Алмазообразующая эффективность хлорид-силикат-карбонатных расплавов, *Вестник ОНЗ РАН*, 3, NZ6014, doi:10.2205/2011NZ000144.

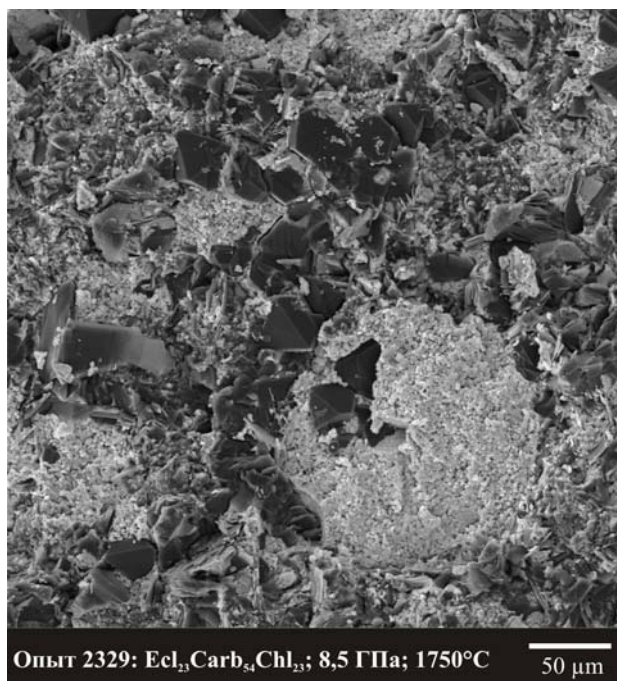
Согласно карбонатитовой модели алмазообразования [Litvin, 2007], основанной на анализе большого объема минералогической и физико-химической экспериментальной информации, в качестве природных ростовых сред для основной массы мантийных алмазов и включений в них выступают углерод-силикат-карбонатные (карбонатитовые) расплавы с сильно изменчивыми составами. В таких расплавах наряду с главными, полностью смесимыми карбонатными и силикатными (минералы перидотитового и эклогитового парагенезисов) компонентами, содержатся как примесные растворимые компоненты (оксиды, фосфаты, хлориды, соединения С-О-Н-Н флюидной системы и др.), так и примесные, полностью несмесимые и нерастворимые твердые и расплавные фазы (сульфиды, металлы). Алмазообразующая эффективность силикатно-карбонатных расплавов четко соответствует важному критерию сингенезиса алмаза и его силикатных и карбонатных включений. Экспериментальные ассоциации высокого давления не только содержат весь набор минералов, характерных для включений в алмазах перидотитового (оливин, гранат, клино- и ортопироксены) и эклогитового (гранат, клинопироксен) типа, но также и демонстрируют признаки, типичные для минералов алмазного парагенезиса. К числу этих признаков относятся существенные примеси Na в гранатах и K в клинопироксенах, которые являются надежными индикаторами кристаллизации этих минералов из щелочных силикатно-карбонатных расплавов.

Экспериментальные исследования многокомпонентных перидотит-карбонатитовых и эклогит-карбонатитовых систем при стандартизованном давлении 8,5 ГПа в узком температурном интервале 1760–1820°C показали [Бобров, Литвин, 2009], что алмазообразующая эффективность их углеродсодержащих расплавов имеет концентрационные ограничения. Эффективные для алмазообразования составы приурочены исключительно к существенно карбонатитовым частям систем и ограничены концентрационными барьерами нуклеации алмаза (КБНА) для случаев K-Na-Ca-Mg-Fe-карбонатитового, Ca-Mg- и K-карбонатных составов (при концентрациях 30, 25 и 30 мас.% перидотитовой составляющей и 35, 30 и 45 мас.% эклогитовой составляющей соответственно). Это означает, что ингибиторное влияние перидотитовых и эклогитовых составляющих, растворенных в углеродсодержащих карбонатитовых расплавах, на нуклеацию алмаза проявляется при относительно низких их содержаниях.

Экспериментально установлена способность к алмазообразованию хлоридных [Литвин, 2003] и хлоридно-карбонатных [Tomlinson et al., 2004] расплавов с растворенным углеродом. Содержание хлоридных компонентов в составе некоторых флюидных включений в алмазах оказывается весьма значительным [Israeli et al., 2001; Klein-BenDavid et al., 2004]. При этом их влияние на алмазообразование (и в первую очередь, положение КБНА) в многокомпонентных силикатно-карбонатных расплавах остается неясным и требует экспериментального исследования. В рамках настоящей работы произведено тестирование алмазообразующей эффективности хлоридно-силикатно-карбонатных расплавов с растворенным углеродом, компоненты которых широко представлены в виде кристаллических и флюидных включений в природных алмазах. Силикатная составляющая задается модельными составами биминерального эклогита, карбонатная – многокомпонентным K-Mg-Ca-карбонатитом, а хлоридная – смесью KCl и NaCl, взятых в равных весовых пропорциях. К подготовленным хлоридно-силикатно-карбонатным смесям добавлялось 40 мас.% графита марки МГОСЧ.

Исследования проводились на высокобарной тороидальной установке типа «наковальня с лункой» с использованием специальных ячеек с трубчатыми графитовыми нагревателями [Бобров, Литвин, 2009] при стандартизированных РТ-параметрах (8,5 ГПа, 1800°C) в ИЭМ РАН. Было проведено две серии опытов: первая серия – в карбонатно-силикатной системе, ее целью было определить диапазон составов по соотношению силикатных и карбонатных компонентов (КБНА), при которых спонтанная нуклеация (зародышеобразование) происходит в течение первых минут после начала опыта, продолжительность экспериментов не превышала 10 минут. Во второй серии экспериментов изучалось влияние хлоридных компонентов на кристаллизацию алмаза в многокомпонентных расплавах.

В результате экспериментов (первая серия) в зависимости от соотношений силикатов и карбонатов было установлено образование графита (область метастабильных пересыщений) или алмаза (область лабильных растворов). В первом случае наблюдались мелкие выделения графита в виде чешуек или округлых глобулей. При этом четко фиксировался рост алмаза на гранях затравки (100) и (111). Во втором случае был получен алмаз в виде октаэдров, двойников по шпинелевому закону. Была рассчитана плотность нуклеации алмазов, которая характеризует число зародышей на единицу объема в экспериментальных образцах, и, соответственно, может служить количественной характеристикой алмазообразующей эффективности. Полученные значения (от  $4,1 \cdot 10^4$  до  $6,7 \cdot 10^4$  зерен/мм<sup>3</sup>) достаточно высоки и типичны для синтеза алмаза в карбонатных расплавах. Спонтанная нуклеация алмаза была получена для составов:  $(\text{Ecl}_{20}\text{Carb}_{80})_{60}\text{C}_{40}$ ,  $(\text{Ecl}_{30}\text{Carb}_{70})_{60}\text{C}_{40}$ . Последний состав принят нами за положение концентрационного барьера нуклеации алмаза, а потому он был использован для проведения второй серии экспериментов.



**Рис. 1.** Эффект несмесимости хлоридного и силикатно-карбонатного расплавов в экспериментальном образце после закалки. Кристаллы алмаза находятся в тонкозернистой силикатно-карбонатной массе. Изображение во вторичных электронах.

Во второй серии опытов, проведенной с участием хлоридных компонентов, образование алмаза было зафиксировано только при двух стартовых составах ( $[\text{Ecl}_{21}\text{Carb}_{49}\text{Chl}_{30}]_{60}\text{C}_{40}$  и  $[(\text{Ecl}_{15}\text{Carb}_{62})\text{Chl}_{23}]_{60}\text{C}_{40}$ ), плотность нуклеации уменьшилась ( $2,2 \cdot 10^4$  зерен/мкм<sup>3</sup>), но увеличились средние размеры кристаллов. Заметим, что первый состав по соотношению карбонатных и силикатных компонентов соответствует выявленному в первой серии опытов положению КБНА для карбонатно-силикатных расплавов без хлоридных компонентов. Увеличение концентрации хлоридов относительно этого состава  $[(\text{Ecl}_{20}\text{Carb}_{47})\text{Chl}_{33}]_{60}\text{C}_{40}$  приводит к прекращению спонтанной нуклеации алмаза. В некоторых опытах, проведенных при длительных выдержках были получены образцы с явными признаками жидкостной

несмесимости [Safonov et al., 2007]: глобулы существенно хлоридного состава ( $\text{SiO}_2$  1,13;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0,43;  $\text{FeO}$  1,87;  $\text{MgO}$  7,58;  $\text{CaO}$  9,64;  $\text{Na}_2\text{O}$  13,58;  $\text{K}_2\text{O}$  30,36;  $\text{Cl}$  32,98 мас. %) находятся в силикатно-карбонатной массе ( $\text{SiO}_2$  4,31;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0,77;  $\text{FeO}$  0,85;  $\text{MgO}$  41,69;  $\text{CaO}$  18,84;  $\text{Na}_2\text{O}$  2,46;  $\text{K}_2\text{O}$  2,23;  $\text{Cl}$  2,57 мас. %). При этом было установлено, что алмазообразование реализуется исключительно в силикатно-карбонатном (карбонатитовом) расплаве. Данное наблюдение, как и прекращение спонтанной нуклеации алмаза с увеличением содержания хлоридных компонентов, на наш взгляд, свидетельствует об отрицательном влиянии хлоридных компонентов на алмазообразование, по крайней мере, в случаях их высокого содержания.

*Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (гранты 09-05-00027 и 11-05-00401), а также грантов Президента Российской Федерации по государственной поддержке молодых российских ученых-докторов наук (МД-534.2011.5) и ведущих научных школ (НШ-3634.2010.5).*

### **Литература**

Бобров, А. В., Ю. А. Литвин (2009) Перидотит-эклогит-карбонатитовые системы при 7.0-8.5 ГПа: концентрационный барьер нуклеации алмаза и сингенезис его силикатных и карбонатных включений, *Геология и геофизика. Т. 50*, сс. 1571–1587.

Литвин, Ю. А. (2003) Щелочно-хлоридные компоненты в процессах роста алмаза в условиях мантии и высокобарного эксперимента, *Докл. РАН. Т. 389 (3)*, сс. 382–386.

Izraeli, E. S., J. W. Harris, O. Navon (2001) Brine inclusions in diamonds: a new upper mantle fluid, *Earth Planet. Sci. Lett. Vol. 187*, pp. 323–332.

Klein-BenDavid, O., E. S. Izraeli, E. Hauri, O. Navon (2004) Mantle fluid evolution – a tale of one diamond, *Lithos. Vol. 77*, pp. 243–253.

Litvin, Yu. A. (2007) High-pressure mineralogy of diamond genesis / In: Advances in high-pressure mineralogy (ed. Ohtani E.), Geol. Soc. Amer. Spec. Pap. Vol. 421, pp. 83–103.

Safonov, O. G., L. L. Perchuk, Yu. A. Litvin (2007) Melting relations in the chloride-carbonate-silicate systems at high-pressure and the model for formation of alkalic diamond-forming liquids in the upper mantle, *Earth Planet. Sci. Lett. Vol. 253*, pp. 112–128.

Tomlinson, E., A. Jones, J. Milledge (2004) High-pressure experimental growth of diamond using  $\text{C-K}_2\text{CO}_3\text{-KCl}$  as an analogue for Cl-bearing carbonate fluid, *Lithos. Vol. 77*, pp. 287–294.