

УДК 548.58:549.211

DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-6-945-952

## Начальные стадии переогранения округлых природных алмазов при растворении в расплаве Fe-S при высоком давлении

В. М. Сонин<sup>1</sup>, Е. И. Жимулев<sup>1</sup>, А. А. Чепуров<sup>1</sup>, Б. С. Помазанский<sup>2</sup>,  
В. П. Афанасьев<sup>1</sup>, А. И. Чепуров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр-т Академ. Коптюга, 3, e-mail: sonin@igm.nsc.ru  
<sup>2</sup>Научно-исследовательское геологоразведочное предприятие АК “АЛРОСА”, 678170, г. Мирный, Чернышевское шоссе, 7

Поступила в редакцию 23.11.2018 г., принята к печати 16.04.2019 г.

**Объект исследований.** В статье представлены результаты микроскопического и фотогониометрического изучения природных округлых алмазов тетрагексаэдрического габитуса из кимберлитовой трубки Интернациональная (Якутия), частично растворенных в серосодержащем расплаве железа (содержание серы 15–30 мас. %) при 4.5 ГПа и 1450°C. **Методы.** Эксперименты проводили на беспрессовом многопуансонном аппарате типа “разрезная сфера” в твердофазной ячейке высокого давления, изготовленной из прессованных порошков тугоплавких оксидов ZrO<sub>2</sub>, CaO, MgO, с цилиндрическим графитовым нагревателем. Кристаллы изучали с помощью оптического микроскопа МБС-10 с фотоприставкой и сканирующего электронного микроскопа JeolJSM-6510LV. Гониометрическое изучение кристаллов алмаза проводили фотометодом в цилиндрической камере. **Результаты.** Установлено, что при содержании серы 15 мас. % кристаллы алмаза тетрагексаэдрического габитуса преобразуются в кристаллы октаэдрической формы с морфологическими характеристиками, подобными природным алмазам из кимберлитов. При содержании серы 23–30 мас. % скорость растворения алмазов в Fe-S расплаве резко снижается, при этом поверхность алмазов на микроуровне покрывается многочисленными бугорками травления, ограниченными поверхностями, близкими к плоскогранной форме {111}. Растворение округлых алмазов в расплаве Fe-S при высоком давлении происходит по “нормальному” (перпендикулярно поверхности растворяющегося кристалла) механизму при подчиненном значении тангенциально-послойного механизма посредством тригональных слоев растворения. **Заключение.** Кристаллы природного алмаза могли подвергаться растворению в мантии еще до попадания в кимберлитовую магму. Можно выделить два принципиально различных комплекса гомоморфных и типоморфных особенностей форм растворения природных алмазов, а именно: связанные с мантийными условиями до попадания кристаллов в кимберлитовую магму и собственно с кимберлитовым процессом. Присутствие в месторождениях кимберлитового типа октаэдрических алмазов с параллельной (тригональной) штриховкой может свидетельствовать о повышенной сохранности алмазов вследствие относительно незначительного воздействия кимберлитовой магмы. Это, несомненно, должно способствовать выяснению генезиса алмазов и, возможно, совершенствованию минералогических критериев поиска алмазов.

**Ключевые слова:** алмаз, серосодержащий расплав железа, растворение, высокие давления и температуры, мантия Земли

### Благодарность

Авторы благодарны анонимному рецензенту за ценные замечания.

Исследование выполнено по Государственному заданию ИГМ СО РАН при поддержке АК “АЛРОСА”.

## Incipient stages of transformation of round natural diamonds under dissolution in Fe-S melt at high pressure

Valerii M. Sonin<sup>1</sup>, Egor I. Zhimulev<sup>1</sup>, Aleksei A. Chepurov<sup>1</sup>, Bogdan S. Pomazanskiy<sup>2</sup>,  
Valentin P. Afanasiev<sup>1</sup>, Anatolii I. Chepurov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS, 3 Akademik Koptyug av., Novosibirsk 630090, Russia, e-mail: sonin@igm.nsc.ru

<sup>2</sup>Alrosa PJSC, 7 Chernyshevskoe highway, Mirny, Sakha Republic 678170, Russia

Received 23.11.2018, accepted 16.04.2019

**Для цитирования:** Сонин В.М., Жимулев Е.И., Чепуров А.А., Помазанский Б.С., Афанасьев В.П., Чепуров А.И. (2019) Начальные стадии переогранения округлых природных алмазов при растворении в расплаве Fe-S при высоком давлении. *Литосфера*, **19**(6), 945–952. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-6-945-952

**For citation:** Sonin V.M., Zhimulev E.I., Chepurov A.A., Pomazanskiy B.S., Afanasiev V.P., Chepurov A.I. (2019) Incipient stages of transformation of round natural diamonds under dissolution in Fe-S melt at high pressure. *Lithosphere*, **19**(6), 945–952. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-6-945-952

© В.М. Сонин, Е.И. Жимулев, А.А. Чепуров, Б.С. Помазанский, В.П. Афанасьев, А.И. Чепуров, 2019

*Research subject.* The article presents the results of a microscopic and photogoniometric study of natural rounded diamonds of tetragonal habit from the kimberlite pipe “Internationalnaya” (Yakutia). The diamonds were partially dissolved in a sulphur-containing iron melt (sulphur content of 15–30 wt %) at 4.5 GPa and 1450°C. *Methods.* The experiments were carried out on a multi-punch apparatus of a “split-sphere” type in high-pressure solid-phase cells made of refractory oxides ZrO<sub>2</sub>, CaO, MgO using a cylindrical shape graphite heater. The crystals were studied using an MBS-10 optical microscope with a photo camera, and a Jeol JSM-6510LV scanning electron microscope. A goniometric study of diamond crystals was carried out by a photo method in a cylindrical chamber. It was found that when a sulphur content was 15 wt %, diamond crystals of tetragonal habit were transformed into a curved shaped octahedroids with morphological features similar to natural diamonds found in kimberlites. When the sulphur content was 23–30 wt %, the rate of dissolution of diamonds in the Fe-S melt sharply reduced, while the diamond surface at the micro level became covered with numerous etching hillocks, whose sidewalls have surfaces similar to flat-faced {111} form. Dissolution of the rounded diamonds in the Fe-S melt at high pressure occurred by a “normal” mechanism, that is perpendicular to the surface of the dissolving crystal through trigonal dissolution layers, while a tangential-layered mechanism played a minor role. *Conclusion.* The natural diamond crystals could undergo dissolution in the mantle before they were captured by kimberlite magma. Two fundamentally different types of homomorphic and typtomorphic features of the dissolution forms observed on natural diamonds can be determined, namely: on one side, those associated with storage in mantle before the crystals were captured by the kimberlite magma, and on the other side, with the kimberlite process itself. The presence of octahedral diamonds with parallel (trigonal) striation in kimberlite deposits may indicate on a high degree of diamond preservation due to relatively insignificant effect of the kimberlite magma. This, undoubtedly, should help to decipher the diamond genesis and, possibly, improve the mineralogical criteria used in diamond exploration.

**Keywords:** diamonds, sulfur-containing iron melt, dissolution, high pressure and temperature, Earth’s mantle

#### Acknowledgements

The authors are grateful to the anonymous reviewer for valuable comments.

The study was carried out according to the state assignment of IGM SB RAS with the support of AK “ALROSA” (PAO).

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большинством исследователей признано, что генезис алмазов из кимберлитов связан с мантией Земли, а кимберлитовая магма транспортирует алмазы в верхние горизонты литосферы. Являясь реакционной средой, она влияет на морфологию алмазов и даже на алмазность кимберлитовых трубок (Сонин и др., 2002; 2004; Kozai, Arima, 2005; Fedortchouk et al., 2007; Khokhryakov, Pal’yanov, 2007; Arima, Kozai, 2008). В результате растворения алмазов во флюидонасыщенном кимберлитовом расплаве при высоких давлениях и температурах плоскогранные кристаллы алмаза преобразуются в округлые индивиды тетрагексаэдрического габитуса как конечную форму растворения (Khokhryakov, Pal’yanov, 2007). Данный эффект определяется окислением алмазов в водосодержащем флюиде магмы, сопровождающимся образованием дитригональных слоев растворения на октаэдрических гранях (Kanda et al., 1977; Чепуров и др., 1985; Сонин и др., 1997).

Проблема заключается в том, что в кимберлитах присутствуют и другие морфологические типы алмазов, а собственно тетрагексаэдриды достаточно редки (Бартошинский, Квасница, 1991; Афанасьев и др., 2000). Округлые кристаллы алмаза в отечественной научной литературе принято классифицировать как додекаэдриды (или ромбододекаэдриды), но этот термин является обобщающим для ряда *октаэдрид* – *тетрагексаэдрид*. Общим для этих форм кристаллов является наличие гранного шва по короткой диагонали ромбододекаэдри-

ческих кривогранных псевдограней, а различием – степень кривизны по гранному шву вдоль длинной диагонали.

Но если округлые кристаллы алмаза образовались в результате растворения непосредственно в кимберлитовой магме, то почему не все из них достигли конечной формы растворения? Возможным объяснением этого факта может быть одновременное попадание алмазов в кимберлитовую магму при дезинтеграции алмазосодержащих ксенолитов, поскольку присутствие плоскогранных индивидов в кимберлитах объясняется их консервацией в ксенолитах (Орлов, 1963). Возможно также, что кристаллы алмаза типа октаэдридов образовались в других условиях и в другой среде, но были изолированы в ксенолитах так же, как и плоскогранные аналоги.

Недавно нами при растворении октаэдрических алмазов в расплаве Fe-S при высоких *P-T* параметрах было установлено, что конечной (стационарной) формой растворения в данных условиях является октаэдрид (Жимулев и др., 2016а). Мы называем форму растворения октаэдридом, поскольку кристаллы алмаза имели кривогранные поверхности, близкие к плоскогранной форме октаэдра (Афанасьев и др., 2000). Более того, октаэдрид – конечная форма растворения алмазов, если исходная форма представляла собой тетрагексаэдрид (Сонин и др., 2018а). Этот вывод сделан при фотогониометрическом исследовании алмазов после экспериментов. Но габитус кристаллов визуально не соответствовал фотогониометрическим данным, оставаясь близким исходному варианту. То есть

макроморфология и микроморфология кристаллов алмаза после растворения различалась.

В настоящей работе нами представлены результаты микроморфологического изучения исходно округлых кристаллов природного алмаза на начальных стадиях процесса растворения в расплаве Fe-S целью выяснения причины указанного явления.

## МЕТОДИКА

Эксперименты по растворению кристаллов алмаза проводили на беспрессовом многопуансонном аппарате типа “разрезная сфера” (БАРС) в твердофазной ячейке высокого давления, изготовленной из прессованных порошков тугоплавких оксидов  $ZrO_2$ , CaO, MgO, с цилиндрическим графитовым нагревателем по методике, изложенной в работах (Жимулев и др., 2012, 2016б; Сонин и др., 2018а). В опытах использовали природные округлые кристаллы алмаза, по габитусу относимые к додекаэдроидам (тетрагексаэдроидам), из кимберлитовой трубки Интернациональная (Якутия). Масса кристаллов приведена в табл. 1.

Растворение алмазов осуществляли в расплаве Fe-S при разном содержании серы (см. табл. 1). При увеличении количества серы в расплаве резко уменьшается растворимость углерода и, соответственно, скорость растворения алмазов (Сонин и др., 2018б). Следует напомнить, что в работах (Жимулев и др., 2016а; Сонин и др., 2018а) использовали один растворитель с содержанием серы 20 мас. %.

Общая масса растворителя составляла 1200 мг. Алмазы (один кристалл за один опыт) помещали в порошкообразную смесь из компонентов растворителя и опрессовывали в специальной пресс-форме. Использовали железо, полученное карбонильным способом, и молекулярную серу. Параметры экспериментов: 4 ГПа, 1450°C, длительность 60 мин. Охлаждение образцов осуществляли закалкой.

Для выделения алмазов после экспериментов образцы последовательно обрабатывали смесью кислот HCl + HNO<sub>3</sub> (“царская водка”), раствором K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> в концентрированной H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, затем промывали дистиллированной водой. После очистки кристаллы изучали с помощью оптического микро-

скопа МБС-10 с фотоприставкой и сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JeolJSM-6510LV в ЦКП ИГМ СО РАН во вторичных электронах по стандартной процедуре. Взвешивание кристаллов алмаза проводили на весах ВЛР-20 с точностью ±0.02 мг, а компонентов растворителя – на весах ACCULABVIC-200 с точностью ±5 мг. Гониометрическое изучение кристаллов алмаза проводили фотометодом в цилиндрической камере. Кристалл на юстировочной головке в фотокамере устанавливали таким образом, чтобы одна из осей кристалла  $L_4$  совпадала с осью фотокамеры. При освещении кристалла параллельным пучком света на фотобумаге, расположенной на цилиндрической поверхности камеры, фиксировались рефлексы – отражения от поверхности кристалла, т.е. фотограмма кристалла.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

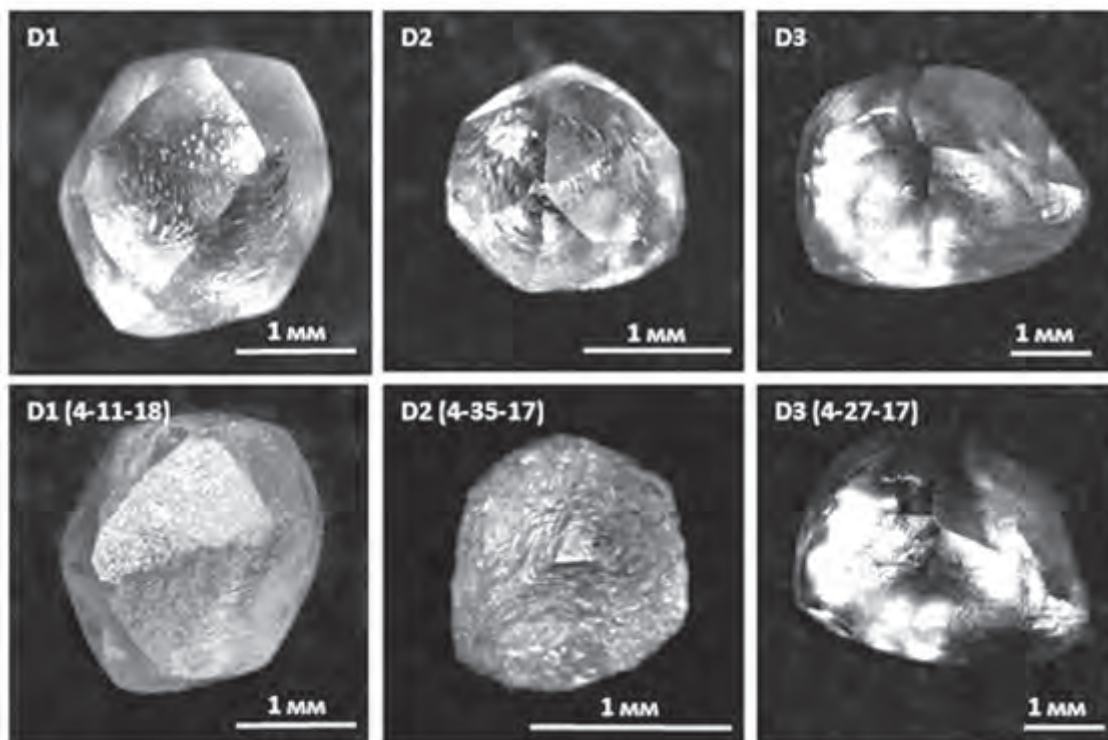
Кристаллы алмаза в экспериментах испытали разную степень растворения (см. табл. 1). Так как условия всех опытов были одинаковыми, эти различия обусловлены вариациями в содержании серы в Fe-S расплаве. Оптические фотографии кристаллов алмаза после экспериментов представлены на рис. 1.

Изменения исходной массы и макроморфологии у кристаллов D1 и D3 не зафиксированы. Кристалл D3 (содержание S – 30 мас. %) не испытал каких-либо изменений на поверхности и микроуровне (см. рис. 1). В отличие от алмаза D3 на кристалле D1 после первого с ним эксперимента (содержание S – 25 мас. %) появилось слабое матирование поверхности, усилившееся после второго эксперимента (содержание S – 23 мас. %). SEM-фотографии алмаза D1 представлены на рис. 2. Матирование поверхности вызвано появлением многочисленных бугорков травления размером менее 10 мкм. Особенность бугорков травления – их форма. Около выхода осей симметрии  $L_4$  они представляли собой остроконечные четырехгранные пирамидки. После второго эксперимента размеры бугорков травления увеличились. Вблизи выхода осей симметрии  $L_3$  скульптуры растворения состояли из треугольных пластинок, надвигающихся друг на друга в виде черепитчатого узора. Около выхода  $L_2$

**Таблица 1.** Условия и результаты экспериментов по растворению алмазов (4 ГПа, 1450°C, длительность 1 ч)

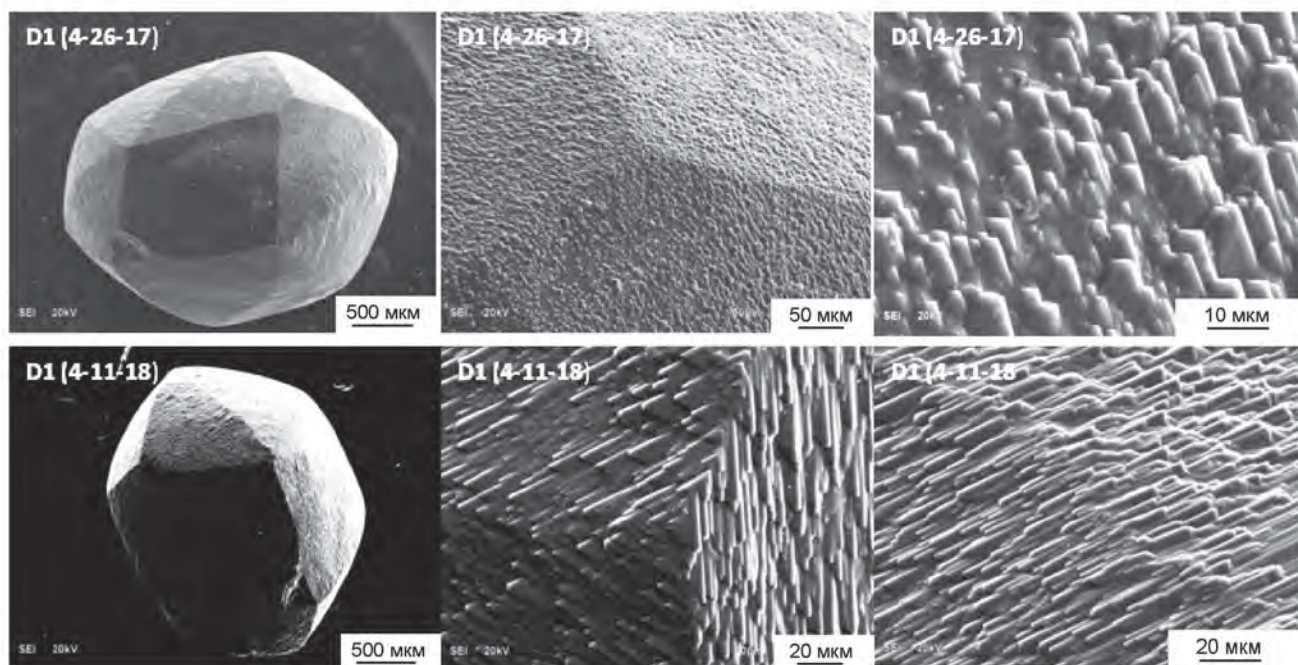
**Table 1.** Conditions and results of diamond dissolution experiments (4 GPa, 1450°C, duration 1 h)

№ опыта	Содержание S в растворителе Fe-S, мас. %	№ кристалла (исх. масса, мг)	Масса кристалла после опыта, мг	Потеря массы, мг (%)
4-26-17	25	D1 (22.67)	22.67	0 (0)
4-27-17	30	D3 (29.36)	29.36	0 (0)
4-35-17	15	D2 (11.92)	5.04	6.88 (57.7)
4-11-18	23	D1 (22.67)	22.67	0 (0)



**Рис. 1.** Оптические фотографии кристаллов алмаза (D1, D2, D3) до и после экспериментов по растворению.

**Fig. 1.** Optical photographs of diamond crystals (D1, D2, D3) before and after dissolution experiments.



**Рис. 2.** SEM-фотографии кристалла D1 (общий вид и фрагменты поверхности) после экспериментов по растворению.

**Fig. 2.** SEM photographs of D1 crystal (general view and surface fragments) after dissolution experiments.

(у гранного шва) скульптуры растворения состояли из шестиков, вытянутых по направлению  $\langle 110 \rangle$ . Торцы шестиков не округлые, а ограненные плоскостями, визуально близкими к форме  $\{111\}$  (см. рис. 2).

Кристалл D1 был изучен методом фотогониометрии. Несмотря на отсутствие потери массы (в пределах точности использовавшихся весов), фотограмма кристалла резко изменилась (рис. 3). Если отражения от исходного кристалла присутствовали исключительно в виде “световых треугольников”, то уже после первого опыта они были выражены только фрагментарно, а после второго исчезли совсем. Появились рефлексы от плоскостей октаэдра и дуговые засветы, соответствующие геометрическому местоположению тригон-триоктаэдров и тетрагон-триоктаэдров. По классификации природных алмазов (Бартошинский, Квасница, 1991), основанной на гониометрии кристаллов, фотограмма кристалла D1 после незначительного растворения соответствует плоскогранному октаэдру со штриховкой у ребер.

Таким образом, растворение округлых алмазов в расплаве Fe-S при высоком давлении происходит по “нормальному” (перпендикулярно поверх-

ности растворяющегося кристалла) механизму при подчиненном значении тангенциально-послойного механизма. Именно поэтому, вследствие образования многочисленных мельчайших фигур травления, ограненных поверхностями, близкими к форме  $\{111\}$ , и изменились фотограммы кристалла D1 (см. рис. 3). Этот процесс переоформления по “нормальному” механизму происходит уже при минимальных скоростях растворения.

В целях увеличения степени растворения кристалл D2 был подвергнут растворению в расплаве Fe-S с содержанием серы 15 мас. %. В результате данной процедуры он потерял около 60% первоначальной массы (см. табл. 1), превратившись в грубоскульптурированный индивид с хорошо различимыми элементами октаэдрической огранки (рис. 4). То есть округлая форма алмазов типа тетрагексаэдроида (додекаэдроида с гранным швом) становится нестабильной в расплаве Fe-S при высоком давлении. Стационарной формой растворения в этих условиях является октаэдроид – кривогранный октаэдр.

По последним данным, среда кристаллизации глубинных алмазов II типа (по оптическим свойствам) соответствует металл-сульфидным природ-

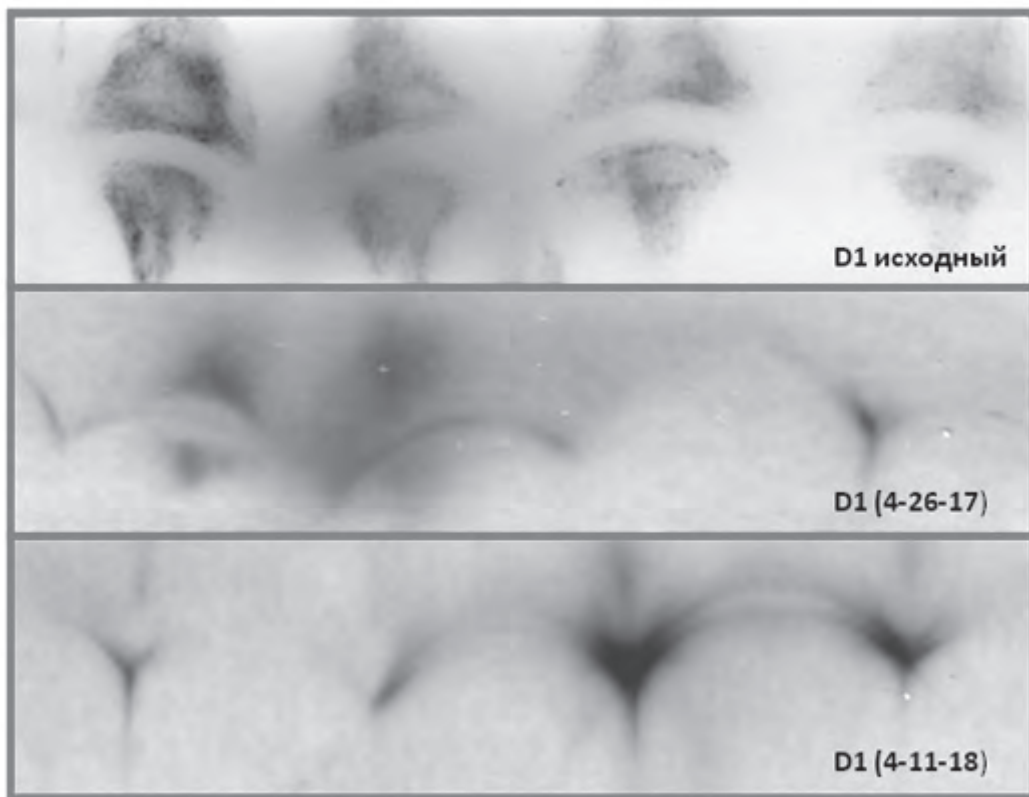
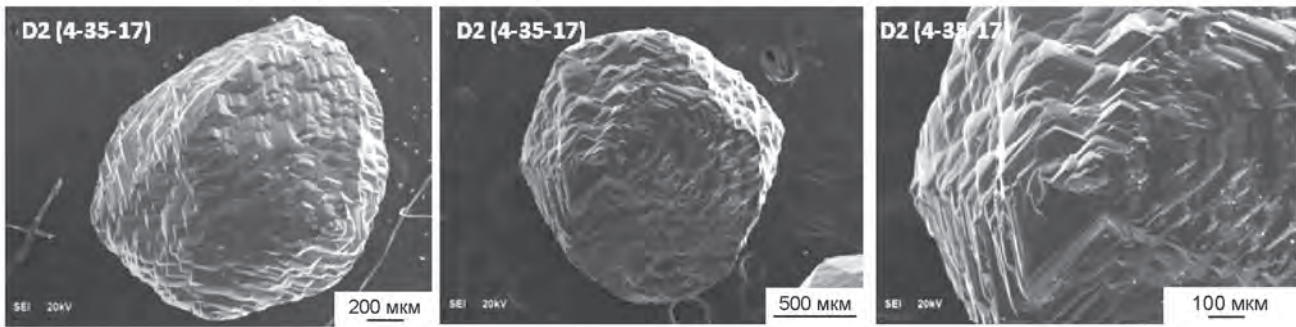


Рис. 3. Фотограммы кристалла D1 до и после экспериментов по растворению.

Fig. 3. Photograms of crystal D1 before and after dissolution experiments.



**Рис. 4.** SEM-фотографии кристалла D2 (общий вид с двух ракурсов и фрагмент поверхности) после эксперимента по растворению.

**Fig. 4.** SEM photographs of crystal D2 (general view from two angles and a fragment of the surface) after the dissolution experiment.

ным системам (Smith et al., 2016). Но и для алмазов I типа характерно широкое распространение в виде включений сульфидных минералов (Буланова и др., 1990), что не согласуется с незначительным их присутствием в эклогитах и перидотитах (Специус, Богуш, 2018). Известны находки включений в алмазах самородного железа и карбидов (Соболев и др., 1981; Garanin, Kudryavtseva, 1990; Bulanova et al., 1998; Stachel et al., 1998; Kaminsky, Wirth, 2011; Walter et al., 2011; и др.). Для природных алмазов характерно также сложное внутреннее строение со структурными особенностями, обусловленными перерывами в росте в результате процессов растворения (Варшавский, 1968; Геншафт и др., 1977; Бескрованов, 2000; Специус, Богуш, 2018). Металл-сульфидные расплавы являются алмазопроизводящими, что установлено экспериментально при высоких давлениях и температурах (Жимулев и др., 2012; 2016б). Указанные выше факты дают основание предполагать участие металл-сульфидных расплавов в генезисе алмазов в восстановленных доменах мантии Земли. При недосыщении металл-сульфидных расплавов углеродом должно происходить растворение алмазов и в природных условиях, причем при растворении октаэдрических алмазов в Fe-S расплаве в присутствии силикатных компонентов образуются морфологически сложные формы кристаллов (Сонин и др., 2017; Черуров et al., 2018), что характерно для глубинных безазотных алмазов. Этот эффект обусловлен различием в величинах растворимости углерода в этих системах: силикатные компоненты в контакте с алмазами блокируют их поверхность от растворения.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суммируя сказанное, отметим, что такие типы кристаллов природных алмазов, как октаэдры с параллельной (тригональной) штриховкой вдоль

ребер, с полицентрическим строением граней  $\{111\}$  (Жимулев и др., 2016а; Сонин и др., 2018а, б) или грубоскульптурованные октаэдровиды могли образовываться в мантии Земли в восстановленных участках мантии, в условиях стабильности Fe-S расплава, еще до попадания в кимберлитовую магму. Учитывая фотогониометрические и микроскопические исследования алмазов, растворенных в экспериментах при высоких  $P$ - $T$  параметрах, можно выделить два принципиально различных комплекса гомоморфных и типоморфных особенностей форм растворения природных алмазов, а именно: связанные с мантийными условиями до попадания кристаллов в кимберлитовую магму и собственно с кимберлитовым процессом. Это, несомненно, должно способствовать выяснению генезиса и, возможно, совершенствованию минералогических критериев поиска алмазов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасьев В.П., Ефимова Э.С., Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. (2000) Атлас морфологии алмазов России. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 298 с.
- Бартошинский З.В., Квасница В.Н. (1991) Кристалломорфология алмаза из кимберлитов. Киев: Наук. думка, 172 с.
- Бескрованов В.В. (2000) Онтогенез алмаза. Новосибирск: Наука, 264 с.
- Буланова Г.П., Специус З.В., Лескова Н.В. (1990) Сульфиды в алмазах и ксенолитах из кимберлитовых трубок Якутии. Новосибирск: Наука, 120 с.
- Варшавский А.В. (1968) Аномальное двупреломление и внутренняя морфология алмаза. М.: Наука, 92 с.
- Геншафт Ю.С., Якубова С.А., Волкова Л.М. (1977) Внутренняя морфология природных алмазов. *Исследования глубинных минералов*. М.: ИФЗ АН СССР, 5-31.
- Жимулев Е.И., Чепуров А.И., Синякова Е.Ф., Сонин В.М., Чепуров А.А., Похиленко Н.П. (2012) Кристаллизация алмаза в системах Fe-Co-S-C и Fe-Ni-S-C и роль металл-сульфидных расплавов в генезисе

- алмазов. *Геохимия*, (3), 227-239.
- Жимулев Е.И., Сонин В.М., Афанасьев В.П., Чепуров А.И., Похиленко Н.П. (2016а) Расплав Fe-S – возможный растворитель алмаза при мантийных условиях. *Докл. АН*, **471**(5), 583-585.
- Жимулев Е.И., Сонин В.М., Миронов А.М., Чепуров А.И. (2016б) Влияние содержания серы на кристаллизацию алмаза в системе Fe-C-S при 5.3–5.5 ГПа и 1300–1370°C. *Геохимия*, (5), 439-446.
- Орлов Ю.Л. (1963) Морфология алмаза. М.: Изд-во АН СССР, 236 с.
- Соболев Н.В., Ефимова Е.С., Поспелова Л.Н. (1981) Самородное железо в алмазах Якутии и его парагенезис. *Геология и геофизика*, **22**(12), 25-29.
- Сонин В.М., Жимулев Е.И., Помазанский Б.С., Земнухов А.Л., Афанасьев В.П., Чепуров А.И. (2017) Фотогониометрия кристаллов алмаза, растворенных в гетерогенной среде при 4 ГПа и 1400°C. *Записки РМО*, **146**(5), 115-124.
- Сонин В.М., Жимулев Е.И., Помазанский Б.С., Земнухов А.Л., Чепуров А.А., Афанасьев В.П., Чепуров А.И. (2018а) Морфологические особенности растворения кристаллов алмаза в расплаве Fe<sub>0.7</sub>S<sub>0.3</sub> при 4 ГПа и 1400°C. *Геология рудн. месторождений*, **60**(1), 91-102.
- Сонин В.М., Жимулев Е.И., Томиленко А.А., Чепуров С.А., Чепуров А.И. (2004) Хроматографическое изучение процесса травления алмазов в расплаве кимберлита в связи с их устойчивостью в природных условиях. *Геология рудн. месторождений*, **46**(3), 212-221.
- Сонин В.М., Жимулев Е.И., Федоров И.И., Осоргин Н.Ю. (1997) Травление кристаллов алмаза в силикатном расплаве в присутствии существенно водного флюида при высоких P-T параметрах. *Геохимия*, (4), 451-455.
- Сонин В.М., Жимулев Е.И., Чепуров А.И., Афанасьев В.П. (2002) Морфология кристаллов алмаза, протравленных в расплаве кимберлита при высоких P-T параметрах. *Изв. вузов. Геология и разведка*, (1), 60-69.
- Сонин В.М., Жимулев Е.И., Чепуров А.А., Чепуров А.И., Похиленко Н.П. (2018б) Влияние содержания серы в расплаве Fe-S на сохранность алмазов при P-T условиях мантии Земли. *Докл. АН*, **481**(1), 193-196.
- Специус З.В., Богущ И.Н. (2018) Структурные особенности и макровключения алмазов эклогитового и перидотитового генезиса. *Эффективность геологоразведочных работ на алмазы: прогнозно-ресурсные, методические, инновационно-технологические пути ее повышения*. Мат-лы V Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвящ. 50-летию Алмазной лаборатории ЦНИГРИ – НИГП АК “АЛРОСА”. Мирный, 176-180.
- Чепуров А.И., Хохряков А.Ф., Сонин В.М., Пальнов Ю.Н., Соболев Н.В. (1985) формах растворения кристаллов алмаза в силикатных системах при высоком давлении. *Докл. АН СССР*, **285**(1), 212-216.
- Arima M., Kozai Y. (2008) Diamond dissolution rates in kimberlitic melts at 1300–1500°C in the graphite stability field. *Eur. J. Mineral.*, **20**, 357-364.
- Bulanova G.P., Griffin W.L., Ryan C.G. (1998) Nucleation environment of diamonds from Yakutian kimberlites. *Mineral. Mag.*, **62**, 409-419.
- Bulanova G.P., Spetsius Z.V., Leskova N.V. (1990) *Sul'fidy v amazakh i ksenolitakh iz kimberlitovykh trubok Yakutii* [Sulfides in diamonds and xenoliths from Yakutian kimberlite pipes]. Novosibirsk, Nauka Publ., 120 p. (In Russian)
- Chepurov A.I., Khokhryakov A.F., Sonin V.M., Pal'yanov Yu.N., Sobolev N.V. (1985) The shape of diamond. *Mineral. Mag.*, **62**, 409-419.
- Chepurov A.I., Sonin V.M., Zhimulev E.I., Chepurov A.A., Pomazansky B.S., Zemnukhov A.L. (2018) Dissolution of diamond crystals in a heterogeneous (metal-sulfide-silicate) medium at 4 GPa and 1400°C. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, **113**(2), 59-67.
- Fedortchouk Y., Canil D., Semenets E. (2007) Mechanism of diamond oxidation and their bearing on the fluid composition in kimberlitic magmas. *Amer. Mineral.*, **92**, 1200-1212.
- Garanin V.K., Kudryavtseva G.P. (1990) Morphology, physical properties and paragenesis of inclusion-bearing diamonds from Yakutian kimberlites. *Lithos*, **25**, 211-217.
- Kaminsky F.V., Wirth R. (2011) Iron carbide inclusions in lower-mantle diamond from Juina, Brazil. *Can. Mineral.*, **49**, 555-572.
- Kanda H., Yamaoka S., Setaka N., Komatsu H. (1977) Etching of diamond octahedrons by high pressure water. *J. Cryst. Growth*, **38**, 1-7.
- Khokhryakov A.F., Pal'yanov Yu.N. (2007) The evolution of diamond morphology in the process of dissolution: Experimental data. *Amer. Mineral.*, **92**, 909-917.
- Kozai Y., Arima M. (2005) Experimental study on diamond dissolution in kimberlitic and lamproitic melts at 1300–1420°C and 1 GPa with controlled oxygen partial pressure. *Amer. Mineral.*, **90**, 1759-1766.
- Smith E.M., Shirey S.B., Nestola F., Bullock E.S., Wang J., Richardson S.H., Wang W. (2016) Large gem diamonds from metallic liquid in Earth's deep mantle. *Science*, **35**(6318), 1403-1405.
- Stachel T., Harris J.W., Brey G.P. (1998) Rare and unusual mineral inclusions in diamond from Mwadui, Tanzania. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **132**, 34-47.
- Walter M.J., Kohn S.C., Araujo D., Bulanova G.P., Smith C.B., Gaillou E., Wang J., Steele A., Shirey S.B. (2011) Deep mantle cycling of oceanic crust: evidence from diamonds and their mineral inclusions. *Science*, **334**, 54-57.

## REFERENCE

- crystal dissolution in silicate melts under high pressure. *Dokl. Akad. Nauk USSR*, **285**(1), 212-216. (In Russian)
- Chepurov A.I., Sonin V.M., Zhimulev E.I., Chepurov A.A., Pomazansky B.S., Zemnukhov A.L. (2018) Dissolution of diamond crystals in a heterogeneous (metal-sulfide-silicate) medium at 4 GPa and 1400°C. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, **113**(2), 59-67.
- Fedortchouk Y., Canil D., Semenets E. (2007) Mechanism of diamond oxidation and their bearing on the fluid composition in kimberlitic magmas. *Amer. Mineral.*, **92**, 1200-1212.
- Garanin V.K., Kudryavtseva G.P. (1990) Morphology, physical properties and paragenesis of inclusion-bearing diamonds from Yakutian kimberlites. *Lithos*, **25**, 211-217.
- Genshaft Yu.S., Yakubova S.A., Volkova L.M. (1977) Internal morphology of natural diamonds, Studies of deep minerals. *Issledovanie glubinnykh mineralov* [Research of deep kimberlit]. Moscow, Akad. Nauk USSR, 5-31. (In Russian)
- Kaminsky F.V., Wirth R. (2011) Iron carbide inclusions in lower-mantle diamond from Juina, Brazil. *Can. Mineral.*, **49**, 555-572.
- Kanda H., Yamaoka S., Setaka N., Komatsu H. (1977) Etching of diamond octahedrons by high pressure water. *J. Cryst. Growth*, **38**, 1-7.
- Khokhryakov A.F., Pal'yanov Yu.N. (2007) The evolution of diamond morphology in the process of dissolution: Experimental data. *Amer. Mineral.*, **92**, 909-917.
- Kozai Y., Arima M. (2005) Experimental study on diamond dissolution in kimberlitic and lamproitic melts at 1300-1420°C and 1 GPa with controlled oxygen partial pressure. *Amer. Mineral.*, **90**, 1759-1766.
- Orlov Yu.L. (1963) *Morfologiya almaza* [Diamond morphology]. Moscow, Akad. Nauk USSR, 236 p. (In Russian)
- Sobolev N.V., Efimova E.S., Pospelova L.N. (1981) Native iron in diamonds of Yakutia and its paragenesis. *Geol. Geofiz.*, **22**(12), 25-29. (In Russian)
- Smith E.M., Shirey S.B., Nestola F., Bullock E.S., Wang J., Richardson S.H., Wang W. (2016) Large gem diamonds from metallic liquid in Earth's deep mantle. *Science*, **35**(6318), 1403-1405.
- Sonin V.M., Zhimulev E.I., Chepurov A.I., Afanas'ev V.P. (2002) Morphology of diamond crystals etched in kimberlite melt at high *P-T* parameters. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Geologiya i Razvedka*, (1), 60-69. (In Russian)
- Sonin V.M., Zhimulev E.I., Chepurov A.A., Chepurov A.I., Pokhilenko N.P. (2018b) Influence of the sulfur concentration in a Fe-S melt on diamond preservation under *P-T* conditions of the Earth's mantle. *Dokl. Earth Sci.*, **481**(1), 922-924.
- Sonin V.M., Zhimulev E.I., Fedorov I.I., Osorgin N.Yu. (1997) Etching of diamond crystals in silicate melt in the presence of aqueous fluid under high *P-T* parameters. *Geokhimiya*, (4), 451-455. (In Russian)
- Sonin V.M., Zhimulev E.I., Pomazansky B.S., Zemnukhov A.L., Afanasiev V.P., Chepurov A.I. (2017) Photohoniometry of diamond crystals dissolved in heterogeneous media under 4 GPa pressure at 1400°C. *Zapiski RMO*, (5), 115-124. (In Russian)
- Sonin V.M., Zhimulev E.I., Pomazanskiy B.S., Zemnukhov A.L., Chepurov A.A., Afanasiev V.P., Chepurov A.I. (2018a) Morphological features of diamond crystals dissolved in Fe<sub>0.7</sub>S<sub>0.3</sub> melt 4 GPa and 1400°C. *Geol. Ore Deposits*, **60**(1), 82-92.
- Sonin V.M., Zhimulev E.I., Tomilenko A.A., Chepurov S.A., Chepurov A.I. (2004) Chromatographic study of diamond etching in kimberlitic melts in the context of diamond natural stability. *Geol. Ore Deposits*, **46**(3), 182-190.
- Spetsius Z.V., Bogush Z.V. (2018) Structural features and macroinclusions in diamonds of eclogite and peridotite genesis. "Effektivnost' geologorazvedochnykh rabot na almazy: prognozno-resursnye, metodicheskie, innovatsionno-tekhnologicheskie puti ee povysheniya". Materialy V Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoi 50-letiyu CNIGRI-YA-NIGP ALROSA ["Efficiency of exploration works for diamonds: forecast-resource, methodical, innovative-technological ways of its increase". Materials V all-Russian conf. with intern. participation dedicated to the 50th anniversary of the Diamond Laboratory CNIGRI-YA-NIGP ALROSA]. Mirnyi, 176-180. (In Russian)
- Stachel T., Harris J.W., Brey G.P. (1998) Rare and unusual mineral inclusions in diamond from Mwadui, Tanzania. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **132**, 34-47.
- Varshavskii A.V. (1968) *Anomal'noe dvuprelomlenie i vnutrennyaya morfologiya almazov* [Anomalous birefringence and internal morphology of diamond]. Moscow, Nauka Publ., 92 p. (In Russian)
- Walter M.J., Kohn S.C., Araujo D., Bulanova G.P., Smith C.B., Gaillou E., Wang J., Steele A., Shirey S.B. (2011) Deep mantle cycling of oceanic crust: evidence from diamonds and their mineral inclusions. *Science*, **334**, 54-57.
- Zhimulev E.I., Chepurov A.I., Sinyakova E.F., Sonin V.M., Chepurov A.A., Pokhilenko N.P. (2012) Diamond crystallization in the Fe-Co-S-C and Fe-Ni-S-C systems and the role of sulfide-metal melts in the genesis of diamond. *Geochem. Int.*, **50**(3), 205-216.
- Zhimulev E.I., Sonin V.M., Afanasiev V.P., Chepurov A.I., Pokhilenko N.P. (2016a) Fe-S melt as a likely solvent of diamond under mantle conditions. *Dokl. Earth Sci.*, **471**(2), 1277-1279.
- Zhimulev E.I., Sonin V.M., Mironov A.M., Chepurov A.I. (2016b) Effect of sulfur concentration on diamond crystallization in the Fe-C-S system at 5.3-5.5 GPa and 1300-1370°C. *Geochem. Int.*, **54**(5), 415-422.