

## ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА МИКРОВКЛЮЧЕНИЙ В КРИСТАЛЛАХ АЛМАЗА МЕСТОРОЖДЕНИЯ ИМ. М.В. ЛОМОНОСОВА (АРХАНГЕЛЬСКАЯ ПРОВИНЦИЯ)

© 2019 г. Г. Ю. Криулина<sup>а,\*</sup>, А. В. Искрина<sup>а,\*\*</sup>, Д. А. Зедгенизов<sup>б</sup>,  
А. В. Бобров<sup>а,с,д</sup>, В. К. Гаранин<sup>а,е</sup>

<sup>а</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
Геологический факультет  
Россия, 119991 Москва, Ленинские Горы, 1

<sup>б</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН  
Россия, 630090 Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3

<sup>с</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН  
Россия, 119991 Москва, ул. Косыгина, 19

<sup>д</sup>Институт экспериментальной минералогии имени академика Д.С. Коржинского РАН  
Россия, 142432 Московская область, Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 4

<sup>е</sup>Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН  
Россия, 117071 Москва, Ленинский проспект, 18, к. 2  
e-mail: \*galinadiamond@gmail.com; \*\*grigoryeva\_av888@mail.ru

Поступила в редакцию 24.12.2018 г.

После доработки 12.02.2019 г.

Принята к публикации 14.02.2019 г.

В работе впервые приводятся данные по составу микровключений в алмазах месторождения им. М.В. Ломоносова (Архангельская алмазоносная провинция). Изученные алмазы представлены кристаллами кубического габитуса ( $n = 5$ ) и кристаллами в «оболочке» ( $n = 5$ ). Установленный диапазон степени агрегации азота (4–39%V1) в алмазах не подтверждает их непосредственную связь с кимберлитовым магматизмом, но допускает их непродолжительное нахождение в мантии при высоких температурах. Состав микровключений в изученных образцах варьирует от преимущественно карбонатитовых расплавов до существенно водно-силикатных флюидов. Показано, что с увеличением содержания силикатов и воды уменьшаются содержания MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, Cl и P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Для объяснения наблюдаемых вариаций рассмотрены различные механизмы генерации и эволюции алмазообразующих сред.

**Ключевые слова:** алмаз; Архангельская алмазоносная провинция; микровключения; флюид; расплав

**DOI:** 10.31857/S0016-7525649958-966

### ВВЕДЕНИЕ

Природные волокнистые алмазы кубического габитуса, а также алмазы в «оболочке» нередко содержат микровключения алмазообразующих флюидов или расплавов. Подобные микровключения также часто встречаются в отдельных зонах октаэдрических кристаллов (Zedgenizov et al., 2006; Скузоватов и др., 2014, 2015; Skuzovатов et al., 2016). Обобщение результатов определения состава микровключений показывает, что для них можно выделить четыре главные группы: водно-алюмосиликатные, высоко-Mg и низко-Mg карбонатные (карбонатитовые), а также водно-солевые (хлоридные) (Weiss et al., 2009). В частности, для Сибирских алмазов высоко-Mg и низко-Mg флюиды/расплавы зафиксирова-

ны в алмазах трубок Удачная (Zedgenizov et al., 2007), Интернациональная (Zedgenizov et al., 2009; Скузоватов и др., 2011; Skuzovатов et al., 2016), Мир (Skuzovатов et al., 2016), водно-силикатные и силикатно-карбонатные — в алмазах в оболочке из трубок Сытыканская (Скузоватов и др., 2012), Интернациональная и Мир (Zedgenizov et al., 2009; Skuzovатов et al., 2016). Согласно данным ИК-спектроскопии, для таких микровключений устанавливаются высокие внутренние остаточные давления, которые соответствует параметрам образования алмазов в основании литосферной мантии при 4–7 ГПа (Navon, 1991). Предполагается, что первоначально микровключения были захвачены как гомогенные, высокоплотные, концентрированные флю-

иды, сходные с надкритическими расплавами, но с относительно повышенным содержанием летучих компонентов (Navon et al., 1988). В ходе последующей эволюции происходила частичная раскристаллизация включений, так что, как правило, их абсолютное большинство представлено полиминеральными агрегатами (оксиды, силикаты, карбонаты, сульфиды, частично раскристаллизованный рассол), включающими также аморфное стеклоподобное вещество и флюидные пузырьки (Титков и др., 2006; Logvinova et al., 2008, 2019).

В последние десятилетия микровключения флюидов/расплавов были охарактеризованы в алмазах из различных регионов мира, в том числе Канады (Klein-BenDavid et al., 2004), Бразилии (Ширяев и др., 2005), Якутии (Зедгенизов и др., 2007; Zedgenizov et al., 2007, 2009; Титков и др., 2006), Южной Африки (Israeli et al., 2004) и Заира (Schrauder, Navon, 1994). В ряде случаев установлено изменение состава микровключений флюидов/расплавов по зонам роста кристаллов алмаза, которое, как предполагается, отражает эволюцию алмазообразующих сред в процессе роста таких кристаллов (Klein-BenDavid et al., 2004; Weiss et al., 2015). Полученные к настоящему времени данные по составу микровключений можно рассматривать как один из важных типоморфных признаков, отражающих особенности среды образования алмазов из разных месторождений.

Месторождение алмазов им. М.В. Ломоносова расположено на северо-западе Восточно-Европейской платформы и представлено шестью трубками, сложенными глиноземистыми низкотитанистыми кимберлитовыми породами. Особенности минералогии алмазов месторождения им. М.В. Ломоносова детально описаны в работе (Богатиков и др., 1999). Алмазы из этого месторождения характеризуются наличием специфических форм кристаллов (Криулина, 2012), которые часто трудно отнести к конкретной минералого-генетической разновидности по классификации Ю.Л. Орлова (1984). Наиболее интересным объектом для исследований являются кристаллы алмаза из трубки Архангельская, т.к., с одной стороны, данные тела уже вовлечены в промышленную отработку, с другой стороны, набор типоморфных характеристик алмаза (Криулина, 2012) делает это месторождение уникальным. В настоящем сообщении приводятся первые данные о составе микровключений в алмазах из данного месторождения.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Морфология кристаллов охарактеризована с использованием стереоскопического микроскопа "Альтами СМ0745-Т". Для дальнейших исследований алмазы были приполированы в пластинки по плоскости ромбододекаэдра. Изучение внутреннего строения в пластинках проводилось с использованием поляризационно-оптической микроскопии. Дефектно-примесный состав алмазов и фазовый состав микровключений в них были определены с помощью ИК-спектроскопии. ИК-спектры регистрировались в диапазоне 650-4000 см<sup>-1</sup> с разрешением 4 см<sup>-1</sup> на спектрометре Bruker Vertex, оборудованном ИК-микроскопом Hyperion 2000. Содержание азота оценивали путем вычитания поглощения, соответствующего поглощению А- (пара смежных атомов азота) и В-дефектов (четыре смежных атома азота вокруг вакансии) из экспериментальных спектров с использованием специализированной программы SpectrExamination, разработанной О.Е. Ковальчуком в НИГП АК «АЛРОСА». Данные ИК-спектроскопии для вещества микровключений позволяют определить содержание летучих компонентов (СО<sub>2</sub> и воды). Содержание молекулярной СО<sub>2</sub> в микровключениях значительно меньше, чем содержание СО<sub>2</sub> в карбонатной фазе. Поэтому для оценки содержания этого компонента мы использовали только расчет для СО<sub>2</sub> в карбонатной фазе. Для дальнейшего сопоставления данных были использованы соотношения  $CO_2 = 213,7 \times I_{1430}$  ppm и  $H_2O = 64,1 \times I_{3420}$  ppm (где  $I_{1430}$  и  $I_{3420}$  — приведенные коэффициенты поглощения на 1430 см<sup>-1</sup> для карбонатов и 3420 см<sup>-1</sup> для воды соответственно), позволяющие проводить расчет концентрации карбонатов и воды (Navon et al., 1988).

Химический состав микровключений был проанализирован с использованием энергодисперсионного спектрометра Oxford с системой обработки спектров INCA Energy 350, установленного на электронный микроскоп LEO-1430VP в аналитическом центре многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН. Индивидуальные микровключения, расположенные вблизи полированной поверхности, распознавались с использованием детектора обратно-рассеянных электронов (BSE). На полученных изображениях фиксировалось, что изучаемые микровключения полностью заключены в алмазной матрице и не соединяются с поверхностью трещинами. Безэталонные количественные анализы с ZAF-коррекцией (поправки на атомный номер

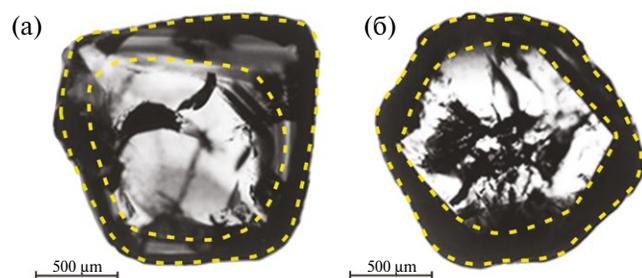
(Z), поглощение рентгеновского излучения (A) и флюоресценцию (F) проводились при следующих параметрах: ускоряющее напряжение 15 кэВ, ток пучка 10 нА. Время накопления спектров в зависимости от интенсивности сигнала составляло 60–100 с. Все анализы были приведены к 100% без учета содержания предполагаемых летучих компонентов ( $H_2O$ ,  $CO_2$  и др.). По полученным результатам определен валовый состав микровключений, который был рассчитан как среднее значение из 5–13 анализов, полученных в одной или нескольких областях изученных кристаллов.

### ОПИСАНИЕ ОБРАЗЦОВ

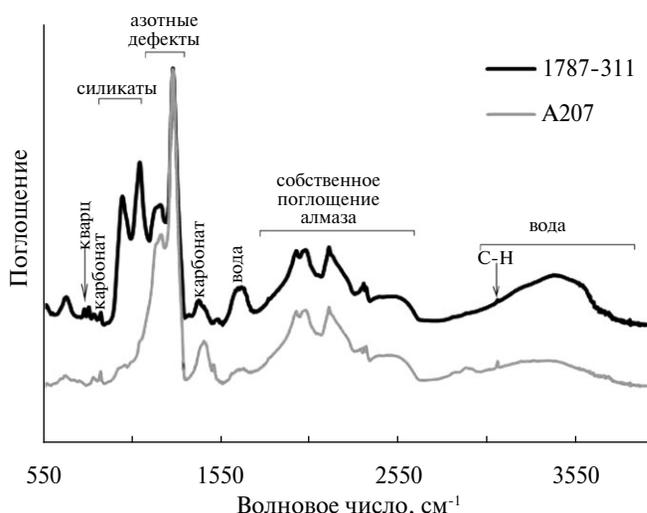
Для изучения были отобраны 10 алмазов, из них 5 алмазов кубического габитуса и 5 алмазов в «оболочке» (III и IV разновидности по классификации Ю.Л. Орлова (1984) соответственно), содержащих микровключения. Все выбранные алмазы имеют желто-зеленую или сероватую окраску. Для отобранных кристаллов характерна морфология, варьирующая от кубической формы до полукруглых индивидов тетрагексаэдрического или додекаэдрического габитуса. После полировки выявлены особенности внутреннего строения и распределения микровключений в изученных кристаллах. Некоторые алмазы III разновидности отображают концентрические зоны кубоида, определяемые различной плотностью включения (рис. 1а). Для алмазов в «оболочке» характерна внутренняя прозрачная область без микровключений и внешняя зона, насыщенная многочисленными микровключениями (рис. 1б).

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Алмазы кубического габитуса III разновидности отличаются высоким содержанием азота (от 742 до 1044 ppm) при относительно невысо-



**Рис. 1.** Представительные пластинки изученных алмазов: (а) — кубоид, III разновидность по классификации Ю.Л. Орлова (1984); (б) — алмаз в «оболочке», IV разновидность. Изображения в проходящем свете. Маркируются зоны, насыщенные микровключениями.



**Рис. 2.** Представительные ИК-спектры алмаза в «оболочке» (1787-311) и алмаза кубического габитуса (A207) с микровключениями из месторождения им. М.В. Ломоносова. На спектре отмечены полосы поглощения, относящиеся к структурным азотным дефектам и собственному поглощению алмаза, а также полосы, связанные с присутствием в микровключениях воды, карбонатов и силикатов.

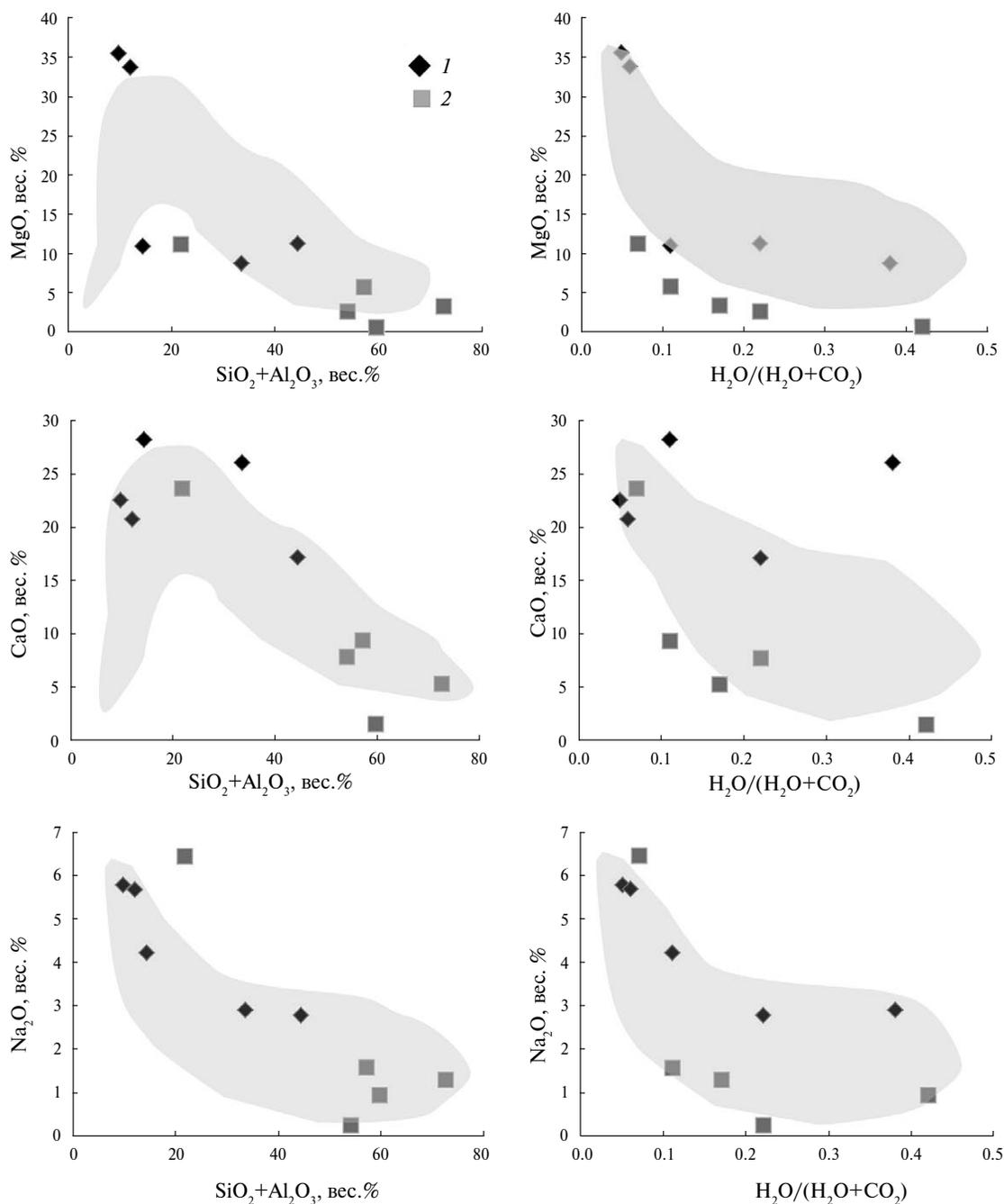
ком его содержания в форме В-дефектов (10–39% В1). Высокая степень агрегации (29–39% В1) отмечена в трех изученных алмазах (А-213, 1787-313 и А-210). Помимо полос, связанных с азотными дефектами, в спектрах изученных алмазов фиксируется поглощение, обусловленное присутствием инородных фаз микровключений — воды, карбонатов и силикатов (например, обр. А-207, рис. 2). Молярное соотношение  $H_2O$  и  $CO_2$  в микровключениях кристаллов этой группы варьирует от 0.07 до 0.42. За исключением обр. А-207, для алмазов данной группы характерно поглощение, связанное с присутствием силикатных фаз. Это подтверждается данными энергодисперсионной спектроскопии по составу главных элементов микровключений в образцах 1785-3, 1787-313, А210 и А213. Содержание  $SiO_2 + Al_2O_3$  в них варьирует от 21.9 до 72.7 вес.%,  $CaO + MgO + FeO$  — от 12.9 до 53.3 вес.%,  $K_2O + Na_2O$  — от 7.1 до 19.1 вес.%. Молярное соотношение К/Na в этих кристаллах составляет 1.3–14.5.

Для изученных «оболочек» алмазов IV разновидности по результатам ИК-спектроскопии установлено, что содержание азота в них варьирует от 443 до 1206 ppm, а степень агрегации (содержание азота в В-форме) от 4 до 22% В1. Согласно данным ИК-спектроскопии, основными компонентами микровключений в «оболочках» также являются карбонаты, силикаты и вода (рис. 2). Для алмазов с высоким содер-

жанием силикатов дополнительно выявлены полосы поглощения ( $\sim 784$  и  $\sim 810$   $\text{см}^{-1}$ ), связанные с присутствием свободной фазы  $\text{SiO}_2$  — кварца (например, обр. 1787-311). Молярное соотношение  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  в микровключениях алмазов этой группы варьирует от 0.05 до 0.22. Содержание  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$  в них варьирует от 9.9 до 44.5 вес.%,  $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{FeO}$  — от 38.3 до 67.1 вес.%, а  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  — от 10.2 до 14.6 вес.%.

Молярное соотношение  $\text{K}/\text{Na}$  в этих кристаллах составляет 0.6–2.2.

Полученные результаты позволяют определить некоторые важные межкомпонентные зависимости состава микровключений (рис. 3). С увеличением содержания  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$  и соотношения  $\text{H}_2\text{O}/(\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2)$  для изученных алмазов наблюдается уменьшение содержания  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Cl}$  и  $\text{P}_2\text{O}_5$ .



**Рис. 3.** Вариации состава микровключений в алмазах в сопоставлении с кристаллами из разных месторождений мира: 1 — алмазы «в оболочке»; 2 — кубоиды; серое поле построено по литературным данным (Navon et al., 1988; Schrauder, Navon, 1994; Izraeli et al., 2001; Ширяев и др., 2005; Klein-BenDavid et al., 2006; Tomlinson et al., 2005; Weiss et al., 2009; Klein-BenDavid et al., 2009).

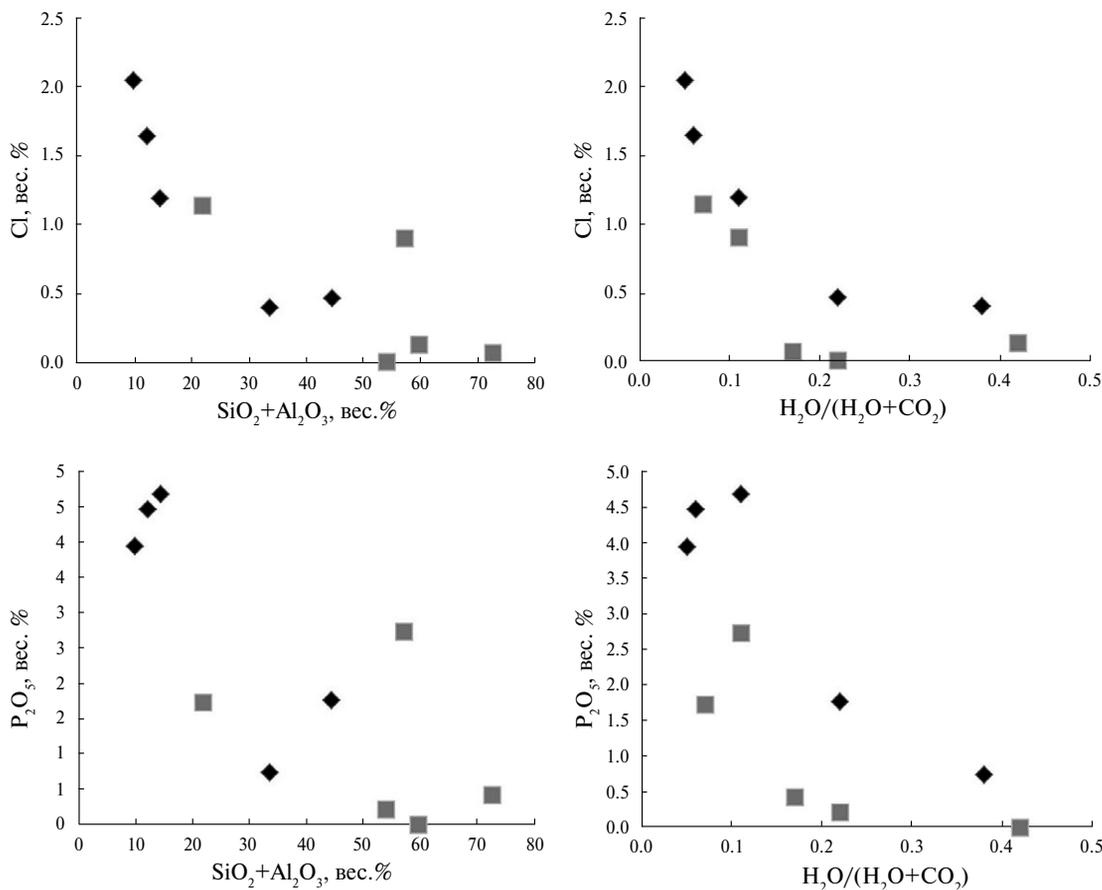


Рис. 3. Продолжение.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящее время в алмазах из кимберлитов и лампроитов из разных месторождений мира описаны микровключения мантийных флюидов/расплавов, основной характеристикой которых является высокая концентрация щелочей (K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O) вне зависимости от концентраций других компонентов (Schrauder, Navon, 1994; Izraeli et al., 2004; Klein-BenDavid et al., 2004; Ширяев и др., 2005; Зедгенизов и др., 2007; Zedgenizov et al., 2007, 2009). В результате проведенных исследований выявлено, что состав микровключений в алмазах кубического габитуса и в алмазах в «оболочке» из месторождения им. М.В. Ломоносова варьирует в широких пределах — от преимущественно карбонатитовых до существенно силикатных (рис. 4). Микровключения такого состава также были зафиксированы в алмазах из трубки им. В. Гриба (Архангельская алмазоносная провинция) (Zedgenizov et al., 2017). Относительное содержание воды выше в существенно силикатных микровключениях. Такие микровключения характерны только для алмазов кубического габитуса. Микровключе-

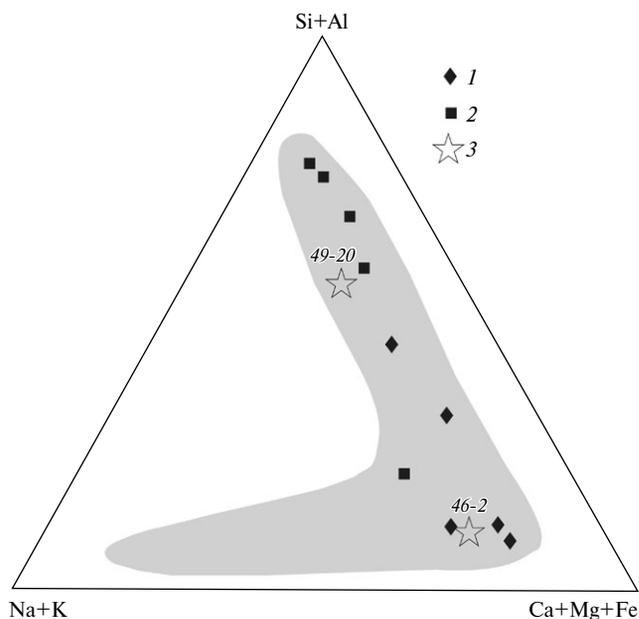


Рис. 4. Вариации состава микровключений в алмазах месторождения им. М.В. Ломоносова: 1 — алмазы «в оболочке», 2 — кубоиды. Показаны также вариации состава микровключений в алмазах из трубки им. В. Гриба (Архангельская провинция) (3) и в алмазах из разных месторождений мира (выделено серым полем) (по данным из работы Zedgenizov et al., 2017).

ния в «оболочках» отражают преимущественно карбонатитовый состав алмазообразующих сред. Содержание хлоридов не превышает первых процентов и увеличивается в микровключениях, обогащенных карбонатами. Микровключения в алмазах из месторождения им. М.В. Ломоносова имеют также черты сходства с включениями в алмазах из разных месторождений Якутской алмазоносной провинции (Zedgenizov et al., 2007; Zedgenizov et al., 2009; Скузоватов и др., 2011; Зедгенизов и др., 2011; Skuzovatov et al., 2016; Скузоватов и др., 2012). В отличие от алмазов Южной Африки (Schrauder, Navon, 1994; Izraeli et al., 2004) и Канады (Tomlinson et al., 2006; Титков и др., 2006), для изученных алмазов Архангельской алмазоносной провинции не выявлено значительное количество хлоридных компонентов в микровключениях.

Микровключения карбонатно-силикатного состава ранее описывались в алмазах Заира (Navon et al., 1988), Ботсваны (Schrauder, Navon, 1994), Гвинеи (Weiss et al., 2008), Бразилии (Ширяев и др., 2005), Сибири (Zedgenizov et al., 2007; Zedgenizov et al., 2009; Скузоватов и др., 2011; Зедгенизов и др., 2011; Skuzovatov et al., 2016; Скузоватов и др., 2012), Канады (Klein-BenDavid et al., 2004; Tomlinson et al., 2006; Зедгенизов и др., 2015) и других месторождений мира. Для большинства изученных ранее алмазов с микровключениями (алмазы кубического габитуса и алмазы «в оболочке») характерна низкая степень агрегации азотных дефектов. Исходя из этого делается вывод, что такие алмазы находились в мантийных условиях в течение небольшого промежутка времени, и, следовательно, их образование происходило незадолго до того, как они были вынесены на поверхность (Boyd et al., 1994). Установленный диапазон степени агрегации азотных дефектов в алмазах с микровключениями из месторождения им. М.В. Ломоносова составил от 4 до 39% V1. Предполагается, что увеличение степени агрегации отражает длительность пребывания алмазов в мантийных условиях. Таким образом, этот факт не подтверждает образование исследованных алмазов незадолго до события извержения и их связь с кимберлитовым магматизмом. Тем не менее, возможно, что данные алмазы находились в мантии короткий промежуток времени, но при более высоких температурах.

Результаты экспериментальных исследований некоторых модельных систем говорят о том, что карбонатно-силикатные расплавы — среда активного алмазообразования (Arima et al., 1993;

Pal'yanov et al., 1999; Литвин, Жариков, 1999; Palyanov et al., 2007; Palyanov, Sokol, 2009; Бобров, Литвин, 2009). Согласно существующим предположениям, образование флюидов или расплавов, подобных описанным в микровключениях, в условиях верхней мантии может быть связано с такими процессами, как (1) частичное плавление карбонатизированных эклогитовых и перидотитовых субстратов и/или (2) мантийный метасоматоз с привнесением карбонатных и водных агентов (например, Schrauder et al., 1996; Wyllie, Ryabchikov, 2000; Tomlinson et al., 2005; Weiss et al., 2015). Кроме того, отмеченные геохимические особенности микровключений в исследованных алмазах из месторождения им. М.В. Ломоносова, находящиеся в пределах карбонатно-силикатного тренда, могут также быть обусловлены как их разным источником, так и эволюционными процессами.

Частичное плавление представляется важным процессом в генерации алмазообразующих расплавов или флюидов разного состава. Экспериментальные исследования позволили установить, что плавление карбонатизированных перидотитов преимущественно приводит к образованию карбонатитовых расплавов, в то время как существенно силикатные расплавы могут образоваться только при плавлении пересыщенных кремнеземом (коэзитовых) эклогитов (Dalton, Presnall, 1998; Hammouda, 2003; Yaxley, Brey, 2004; Litasov et al., 2009). Следовательно, существенно карбонатный и существенно силикатный составы микровключений в исследованных алмазах могут отражать образование соответствующих расплавов/флюидов в химически различных субстратах, перидотитовом и эклогитовом. При этом ряд составов между двумя контрастными средами может быть обусловлен и дополнительными факторами, такими как несмешимость и/или смешение жидкостей разного состава, а также взаимодействие с минералами субстрата, включая процессы фракционирования (Navon et al., 2008). Так, например, экспериментальные исследования показали, что в широком диапазоне составов карбонатно-силикатных жидкостей ликвидусными фазами являются силикаты (низко-Са клинопироксен, оливин, гранат), а не карбонаты (Girnis et al., 2011). В таком случае при снижении температуры эволюция карбонатно-силикатных расплавов может приводить к образованию богатых щелочами карбонатных жидкостей (Safonov et al., 2009). Такое фракционирование, которое должно привести к дифференциации материнского расплава до карбонатного, обогащенного

Са и щелочами, может быть рассмотрено и для объяснения закономерностей, выявленных в настоящей работе для алмазов из месторождения им. М.В. Ломоносова.

В любом случае, разные механизмы образования и эволюции алмазообразующих сред подразумевают их сосуществование в определенном мантийном объеме, в котором происходит их миграция и взаимодействие с веществом материнского субстрата. О.Г. Сафоновым с соавторами (Safonov et al., 2007) экспериментально обоснована модель взаимодействия хлоридно-карбонатных расплавов с силикатными породами мантии с образованием серии карбонатно-силикатных расплавов. Предполагается, что высокомагнезиальные и низкомагнезиальные флюиды/расплавы в волокнистых алмазах могли образоваться при взаимодействии с перидотитовыми и эклогитовыми субстратами соответственно (Weiss et al., 2015). Выявленные вариации состава микровключений в алмазах из месторождения им. М.В. Ломоносова могут быть результатом подобного взаимодействия.

## ВЫВОДЫ

В данной работе впервые проведено изучение микровключений в кристаллах алмаза из месторождения им. М.В. Ломоносова. Были отобраны 10 алмазов с микровключениями, III (кубического габитуса) и IV (алмазов в «оболочке») разновидностей по классификации Ю.Л. Орлова (1984). Установленный диапазон степени агрегации азота в алмазах не подтверждает их непосредственную связь с кимберлитовым магматизмом, но, возможно, они находились в мантии недолго и при более высоких температурах. Оценка состава микровключений в изученных алмазах свидетельствует о ведущей роли карбонатно-силикатных расплавов с широким диапазоном в них концентраций главных компонентов (карбонатов, силикатов, воды). Определенные межэлементные соотношения существенно различаются для высокосиликатных и высококарбонатных составов. Для объяснения выявленных вариаций могут быть рассмотрены механизмы генерации и эволюции алмазообразующих сред, включая частичное плавление карбонатизированных эклогитов и перидотитов, несмесимость и/или смешение жидкостей разного состава, а также взаимодействие с минералами субстрата, включая процессы фракционирования.

## Источник финансирования

*Работа поддержана грантом Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект 17-55-50062\_ЯФ).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бобров А.В., Литвин Ю.А. (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* **50** (12), 1571–1587.
- Богатиков О.А., Гаранин В.К., Кононова В.А., и др. (1999) Архангельская алмазоносная провинция (геология, петрография, геохимия и минералогия). М.: Изд-во МГУ, 524 с.
- Зедгенизов Д.А., Рагозин А.Л., Шацкий В.С. (2007) Особенности состава среды алмазообразования: по данным изучения микровключений в природных алмазах. *Записки РМО* **136**, 159–172.
- Зедгенизов Д.А., Рагозин А.Л., Шацкий В.С., Араухо Д., Гриффин В.Л. (2011) Карбонатные и силикатные среды кристаллизации волокнистых алмазов из россыпей северо-востока сибирской платформы. *Геология и геофизика* **52** (11), 1649–1664.
- Зедгенизов Д.А., Похиленко Н.П., Гриффин В.Л. (2015) Карбонатно-силикатный состав алмазообразующих сред волокнистых алмазов из месторождения Снэп-Лейк (Канада). *ДАН* **461** (3), 322–326.
- Криулина Г.Ю. (2012) Конституционные характеристики алмаза из месторождений Архангельской и Якутской алмазоносных провинций. Дис. канд. геол.-мин. наук. Москва: МГУ, 192 с.
- Литвин Ю.А., Жариков В.А. (1999) Экспериментальное моделирование генезиса алмаза: кристаллизация алмаза в многокомпонентных карбонат-силикатных расплавах при 5–7 ГПа, 1200–1570°C. *ДАН* **367** (3), 808–811.
- Орлов Ю.Л. (1984) Минералогия алмаза. М.: Издательство «Наука», 170 с.
- Скузватов С.Ю., Зедгенизов Д.А., Шацкий В.С., Рагозин А.Л., Купер К.Э. (2011) Особенности состава облакоподобных микровключений в октаэдрических алмазах из кимберлитовой трубки Интернациональная. *Геология и геофизика* **52** (1), 107–121.
- Скузватов С.Ю., Зедгенизов Д.А., Рагозин А.Л., Шацкий В.С. (2012) Состав среды кристаллизации алмазов в оболочке из кимберлитовой трубки Сытыканская (Якутия). *Геология и геофизика* **53** (11), 1556–1571.
- Скузватов С.Ю., Зедгенизов Д.А., Ракевич А.Л., Шацкий В.С., Мартынович Е.Ф. (2015) Полистадийный рост алмазов с облакоподобными микровключениями из кимберлитовой трубки Мир: по данным изучения оптически-активных дефектов. *Геология и геофизика* **56** (1–2), 426–441.

- Титков С.В., Горшков А.И., Солодова Ю.П., Рябчиков И.Д., Магазина Л.О., Сивцов А.В., Гасанов М.Д., Седова Е.А., Самосоров Г.Г. (2006) Минеральные микровключения в алмазах кубического габитуса из месторождений Якутии по данным электронной микроскопии. *ДАН* **410** (2), 255–258.
- Ширяев А.А., Израэли Е.С., Хаури Э.Г., Захарченко О.Д., Навон О. (2005) Химические, оптические и изотопные особенности волокнистых алмазов из Бразилии. *Геология и геофизика* **46** (12), 1207–1222.
- Arima M., Nakayama K., Akaishi M. (1993) Crystallization of diamond from a silicate melt of kimberlite composition in high-pressure and high-temperature experiments. *Geology* **21**, 968–970.
- Boyd S.R., Pineau F., Javoy M. (1994) Modeling the growth of natural diamonds. *Chem. Geol.* **116**, 29–42.
- Dalton J.A., Presnall D.C. (1998) The continuum of primary carbonatitic-kimberlitic melt compositions in equilibrium with lherzolite: data from the system CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> at 6 GPa. *J. Petrol.* **39**, 1953–1964.
- Girnis A.V., Bulatov V.K., Brey G.P. (2011) Formation of primary kimberlite melts — constraints from experiments at 6–12 GPa and variable CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O. *Lithos*. **127**, 401–413.
- Hammouda T. (2003) High-pressure melting of carbonated eclogite and experimental constraints on carbon recycling and storage in the mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.* **214**, 357–368.
- Izraeli E.S., Harris J.W., Navon O. (2001) Brine inclusions in diamonds: a new upper mantle fluid. *Earth. Planet. Sci. Lett.* **187** (3–4), 323–332.
- Izraeli E.S., Harris J.W., Navon O. (2004) Fluid and mineral inclusions in cloudy diamonds from Koffiefontein, South Africa. *Geochim. Cosmochim. Acta* **68**, 2561–2575.
- Klein-BenDavid O., Izraeli E.S., Hauri E., Navon O. (2004) Mantle fluid evolution — a tale of one diamond. *Lithos* **77**, 243–253.
- Klein-BenDavid O., Wirth R., Navon O. (2006) TEM imaging and analysis of microinclusions in diamonds: a close look at diamond-growing fluids. *Am. Mineral.* **91**, 353–365.
- Klein-BenDavid O., Logvinova A.M., Schrauder M., Speitius Z.V., Weiss Y., Hauri E.H., Kaminsky F.V., Sobolev N.V., Navon O. (2009) High-Mg carbonatitic microinclusions in some Yakutian diamonds - a new type of diamond-forming fluid. *Lithos*, **112S**, 648–659.
- Litasov K.D., Safonov O.G., Ohtani E. (2009) Origin of Cl-bearing silica-rich melt inclusions in diamond: experimental evidences for eclogite connection. *Geology* **38**, 1131–1134.
- Logvinova A.M., Wirth R., Fedorova E.N., Sobolev N.V. (2008) Nanometer-sized mineral and fluid inclusions in cloudy Siberian diamonds: new insights on diamond formation. *Eur. J. Mineral. Special issue on Diamonds*, **20**, 317–331.
- Logvinova A., Zedgenizov D., Wirth R. (2019) Specific multiphase assemblages of carbonatitic and Al-rich silicic diamond-forming fluids/melts: TEM observation of microinclusions in cuboid diamonds from the placers of northeastern Siberian craton. *Minerals* **9** (1), 50.
- Navon O. (1991) High internal pressure in diamond fluid inclusions determined by infrared absorption. *Nature* **353**, 746–748.
- Navon O., Hutcheon I.D., Rossman G.R., Wasserburg G.J. (1988) Mantle-derived fluids in diamond microinclusions. *Nature* **335**, 784–789.
- Navon O., Klein-BenDavid O., Weiss Y. (2008) Diamond-forming fluids: their origin and evolution. *9th Intern. Kimb. Conf. Ext. Abstr. CD-ROM*. 9IKC-A-00121.
- Pal'yanov Yu.N., Sokol A.G., Borzdov Yu.M., Khokhryakov A.F., Sobolev N.V. (1999) Diamond formation from mantle carbonate fluids. *Nature* **400**, 417–418.
- Palyanov Yu.N., Shatsky V.S., Sobolev N.V., Sokol A.G. (2007) The role of mantle ultrapotassic fluids in diamond formation. *PNAS* **104** (22), 9122–9127.
- Palyanov Yu.N., Sokol A.G. (2009) The effect of composition of mantle fluids/melts on diamond formation processes. *Lithos* **112**, 690–700.
- Safonov O.G., Perchuk L.L., Litvin Yu.A. (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.* **253**, 112–128.
- Safonov O.G., Chertkova N.V., Perchuk L.L., Litvin Yu.A. (2009) Experimental model for alkalic chloride-rich liquids in the upper mantle. *Lithos* **112S**, 260–273.
- Schrauder M., Navon O. (1994) Hydrous and carbonatitic mantle fluids in fibrous diamonds from Jwaneng, Botswana. *Geochim. Cosmochim. Acta* **58** (2), 761–771.
- Schrauder M., Koeberl C., Navon O. (1996) Trace element analyses of fluid-bearing diamonds from Jwaneng, Botswana. *Geochim. Cosmochim. Acta* **52**, 761–771.
- Skuzovatov S., Zedgenizov D., Howell D., Griffin W.L. (2016) Various growth environments of cloudy diamonds from Malobotuobia kimberlite field (Siberian craton). *Lithos* **265**, 96–107.
- Tomlinson E., De Schrijver I., De Corte K., Jones A.P., Moens L., Vanhaecke F. (2005) Trace element composition of submicroscopic inclusions in coated diamond: a tool for understanding diamond petrogenesis. *Geochim. Cosmochim. Acta* **69**, 4719–4732.
- Tomlinson E.L., Jones A.P., Harris J.W. (2006) Co-existing fluid and silicate inclusions in mantle diamond. *Earth Planet. Sci. Lett.* **250**, 581–595.
- Weiss Y., Griffin W.L., Elhlou S., Navon O. (2008) Comparison between LA-ICP-MS and EPMA analysis of trace elements in diamonds. *Chem. Geol.* **252** (3–4), 158–168.
- Weiss Y., Kessel R., Griffin W.L., Kiflawi I., Klein-BenDavid O., Bell D.R., Harris J.W., Navon O. (2009) A new model for the evolution of diamond forming fluids: Evidence from microinclusion-bearing diamonds from Kankan, Guinea. *Lithos* **112S**, 660–674.

- Weiss Y., McNeill J., D. Pearson G., Nowell G. M., Ohtley C. J. (2015) Highly saline fluids from a subducting slab as the source for fluid-rich diamond. *Nature* **524**, 339–349.
- Wyllie P.J., Ryabchikov I.D. (2000) Volatile components, magmas, and critical fluids in upwelling mantle. *J. Petrol.* **41** (7), 1195–1206.
- Yaxley G.M., Brey G.P. (2004) Phase relations of carbonate-bearing eclogite assemblages from 2.5 to 5.5 GPa: Implications for petrogenesis of carbonatites. *Contr. Miner. Petrol.* **146**, 606–619.
- Zedgenizov D.A., Harte B., EdIMF, Shatsky V.S., Polityanov A.A., Rylov G.M., Sobolev N.V. (2006) Directional chemical variations in diamonds showing octahedral following cuboid growth. *Contr. Miner. Petrol.* **151** (1), 45–57.
- Zedgenizov D.A., Rege S., Griffin W.L., Kagi H., Shatsky V.S. (2007) Composition of trapped fluids in cuboid fibrous diamonds from the Udachnaya kimberlite: LAM-ICPMS analysis. *Chem. Geol.* **240**, 151–162.
- Zedgenizov D.A., Ragozin A.L., Shatsky V.S., Araujo D., Griffin W.L., Kagi H. (2009) Mg- and Fe-rich carbonate-silicate high-density fluids in cuboid diamonds from the Internationalnaya kimberlite pipe (Yakutia). *Lithos* **112S**, 638–647.
- Zedgenizov D.A., Malkovets V.G., Griffin W.L. (2017) Composition of diamond-forming media in cuboid diamonds from the V. Grib kimberlite pipe (Arkhangelsk province, Russia). *Geochem. J.* **51**, 205–213.

## THE COMPOSITIONAL PECULIARITIES OF MICROINCLUSIONS IN DIAMONDS FROM THE LOMONOSOV DEPOSIT (ARKHANGELSK PROVINCE)

© 2019 G. Yu. Kriulina<sup>a,\*</sup>, A. V. Iskrina<sup>a,\*\*</sup>, D. A. Zedgenizov<sup>b</sup>,  
A. V. Bobrov<sup>a,c,d</sup>, V. K. Garanin<sup>a,e</sup>

<sup>a</sup>*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology  
Russia, 119991 Moscow, Leninskie Gory, 1*

<sup>b</sup>*Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
Russia, 630090 Novosibirsk, Koptyuga Avenue, 3*

<sup>c</sup>*Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences  
Russia, 119991 Moscow, Kosygina str., 19*

<sup>d</sup>*D.S. Korzhinskii Institute of Experimental Mineralogy of Russian Academy of Sciences  
Russia, 142432 Chernogolovka, Moscow region, Acad. Osip'yan str., 4*

<sup>e</sup>*Mineralogical Museum of the Russian Academy of Sciences  
Russia, 117071 Moscow, Leninsky Prospekt, 18 k. 2*

e-mail: \*galinadiamond@gmail.com; \*\*grigoryeva\_av888@mail.ru

Received: 24.12.2018

Received version received: 12.02.2019

Accepted: 14.02.2019

The data on the composition of microinclusions in diamonds from the Lomonosov deposit are reported. The studied diamonds include coated ( $n = 5$ ) and cubic ( $n = 5$ ) crystals. The determined range of the degree of nitrogen aggregation (4–39 %B1) in diamonds does not support their links with kimberlite magmatism, but their short occurrence in the mantle at higher temperatures is probable as well. The composition of melt/fluid microinclusions in these samples varies from essentially carbonatitic to significantly silicate. It is shown that the content of MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, Cl and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> decreases with increasing content of silicates and water. Different mechanisms of generation and evolution of diamond-forming media are considered to explain the observed variations.

**Keywords:** diamond, Arkhangelsk diamond province, microinclusions, fluid, melt

**(For citation:** Kriulina G.Yu., Iskrina A.V., Zedgenizov D.A., Bobrov A.V., Garanin V.K. The Compositional Peculiarities of Microinclusions in Diamonds from the Lomonosov Deposit (Arkhangelsk Province). *Geokhimiya*. 2019;64(9):958–966. DOI: 10.31857/S0016-7525649958-966)