

ФИЗИКО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ГЕНЕЗИСА АЛМАЗОВ ТИПА “МАТРЕШКА” НА ОСНОВЕ МАНТИЙНО-КАРБОНАТИТОВОЙ ТЕОРИИ

© 2023 г. Ю. А. Литвин*

*Институт экспериментальной минералогии им. Д.С. Коржинского РАН,
ул. Академ. Осипьяна, 4, Московская обл., Черноголовка, 142432 Россия*

**e-mail: litvin@iem.ac.ru*

Поступила в редакцию 19.04.2022 г.

После доработки 25.09.2022 г.

Принята к публикации 25.09.2022 г.

Выполнен физико-химический анализ генезиса уникального алмазного образца типа “Матрешка” из кимберлитовой трубки Нюрбинская Накынского кимберлитового поля, Якутия, Россия. Образец состоит из основного алмаза с полостью, в которой находится незакрепленный алмаз-включение; из полости выходят два сквозных отверстия шириной от 0.1 до 0.4 мм. Основой анализа является мантийно-карбонатитовая теория генезиса алмазов и ассоциированных фаз, развитая на основе согласованных результатов физико-химического эксперимента и аналитического изучения парагенных включений в природных алмазах кимберлитовых месторождений. Используются также литературные данные кристалломорфологических и физических исследований алмазного образца “Матрешка”. В итоге обоснованы физико-геохимические механизмы нуклеации и кристаллизации его основного алмаза с полостью и алмаза-включения в условиях массового генезиса алмазов в полностью смесимых карбонат-эклогит-углеродных расплавах алмазообразующего очага верхней мантии. Первоначально закрытую полость заполнял алмазообразующий карбонат-силикатный расплав с растворенным углеродом. Вместе с тем выполнен анализ условий травления и растворения основного алмаза и алмаза-включения во время кимберлитового транспорта алмазоносного вещества из мантийного очага на глубины земной коры. При этом рассмотрены причины взрывообразного формирования конусообразных сквозных отверстий в основном алмазе, что сопровождалось выбросом алмазообразующей среды и заполнением полости (C–O–H)-флюидсодержащим кимберлитовым расплавом. Заключительные эпизоды частичного растворения алмазов образца “Матрешка” кимберлитовыми и ассимилированными расплавами продолжались при формировании кумулятивного очага в земной коре и его затвердевании с выделением сильно сжатого C–O–H-флюида. “Флюидное бурение” кровли кумулятивного очага привело к взрывному образованию трубки Нюрбинская и заполнению ее кимберлитовым и ассимилированным алмазоносным веществом. При продолжительном уплотнении этого вещества алмазный образец “Матрешка” оказался в сфере воздействия атмосферных и гидротермальных факторов, о чем свидетельствует мелкозернистый осадочный барит, минерал сернокислого бария, обнаруженный в сквозных отверстиях основного алмаза.

Ключевые слова: алмаз “Матрешка”, основной алмаз с полостью, алмаз-включение, мантийно-карбонатитовая теория, верхняя мантия, очаг материнского карбонат-эклогит-углеродного расплава, механизмы роста алмазов, кимберлитовый транспорт, растворение алмазов, кумулятивный очаг земной коры, флюидное бурение, трубка взрыва Нюрбинская

DOI: 10.31857/S001675252303007X, EDN: MAZGJN

ВВЕДЕНИЕ

Уплотненный алмаз размером $4.8 \times 4.9 \times 2.8$ мм и массой 0.62 карата с полостью размером $\sim 3.0 \times 3.0 \times (0.7-1.2)$ мм (объем 6.0 мм^3), в которой находится незакрепленный алмаз-включение размером $1.9 \times 2.1 \times (0.5-0.6)$ мм и массой 0.02 карата, обнаружен в кимберлитовой породе трубки Нюрбинская Накынского кимберлитового поля, Якутия, Россия сотрудниками АК “АЛРОСА”

(Quick, 2019). В Научно-исследовательском геологическом предприятии этой компании выполнены комплексные кристалломорфологические и физические исследования алмазов образца “Матрешка”, свойства которых практически совпадают (Коногорова и др., 2020). Габитус как основного, так и включенного алмазов октаэдрический. Они являются шпинелевыми двойниками переходной формы октаэдр-додекаэдр. В двойниковом контакте основного алмаза имеется кли-



Рис. 1. Общий вид алмазного образца “Матрешка” с алмазным включением, границы которого просматриваются. Видеосъемка АК АЛРОСА (Siberian Times 2019. Matryoshka diamond. YouTube).

новидная пластина-вросток. Грани ступенчато-пластинчатые со сноповидной штриховкой, вершины расщеплены. Механическое попадание алмаза-включения извне в полость основного ископаемого. Сообщалось также о двух находках подобных алмазов массой 1.09 (Kammerling et al., 1995) и 0.87 карат (Renfro, Koivula, 2020).

Основной алмаз из трубки Нюрбинская прозрачен (рис. 1). При этом просматриваются границы как его полости, так и алмаза-включения. Полость с поверхностью соединяют два сквозных отверстия, ширина которых возрастает от 0.1 до 0.4 мм. Отверстия расположены в зонах двойниковых границ и ориентированы поперек граней (рис. 2). Одно заполнено баритом, осадочным минералом земной коры, во втором обнаружился его небольшой фрагмент. Заметные следы растворения присутствуют на гранях основного алмаза и на поверхности его полости (рис. 1, 2), как и на гранях алмаза-включения (рис. 3). Также на них имеются треугольные ямки травления. Уникальный алмаз назван “Матрешка”, так как устроен подобно популярной в России игрушке кукла-в-кукле с этим названием (рис. 4).

Происхождение алмазов типа “Матрешка” обсуждалось в ряде работ, однако генетически важная информация о химических составах и фазовых состояниях материнских сред, физико-химических механизмах роста и растворения не раскрыта. Допускается, что основной и включенный алмазы образовались одновременно при одних и тех же P и T , а также в общей ростовой среде (Коногорова и др., 2020). Это согласуется с их онтогенезом – подобие форм кристаллов, признаки совместной кристаллизации, аналогия структурных и примесных дефектов, особенности люминесценции и др.

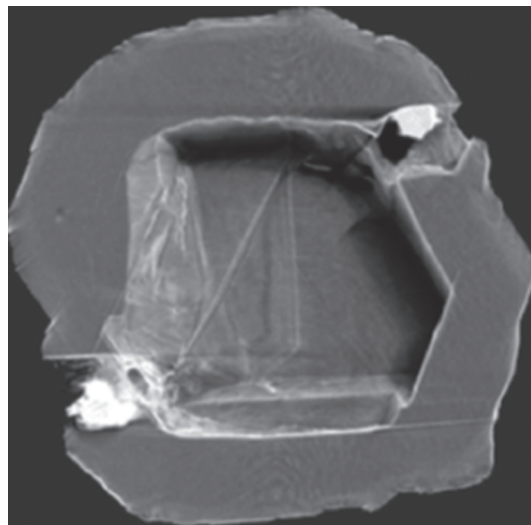


Рис. 2. Внутренняя полость основного алмаза образца “Матрешка”, которая соединена с его поверхностью двумя сквозными отверстиями, расположенными в области двойникового шва (белое вещество в каналах – барит). Рентгеновское микротомографическое 3D-изображение, полученное без разрушения образца (Коногорова и др., 2020).



Рис. 3. Общий вид уплощенного алмаза-включения в образце “Матрешка”. Рентгеновское микротомографическое 3D-изображение (Коногорова и др., 2020).

Примеры имеющихся объяснений происхождения образца “Матрешка”: “... слой пористой поликристаллической алмазной субстанции сформировался внутри алмаза в результате сверхбыстрого роста, а более агрессивные мантийные процессы впоследствии растворили ее” (Quick, 2019); “После того, как образовался алмаз-хозяин, алмаз-матрешка попал в среду, в которой в результате агрессивных мантийных процессов была растворена прослойка и сформировалась

пустая полость...” (Коногорова и др., 2020); “...этот редкий образец образовался в результате... слоистого роста..., за которым следовало вытравливание двух дислокаций..., которые проникли в волокнистый слой, обеспечивая циркуляцию травящих растворов для полной резорбции волокнистой части кристалла” (Fritsch, 2021); “В кристаллах... алмаза... имеются антивискерсы... в направлении $\langle 111 \rangle$... По этим каналам циркулировала кристаллообразующая жидкая фаза с содержанием углерода. Вследствие этого внутри сформировалось ядро октаэдрической формы. Затем по этим же каналам... стала поступать фаза, агрессивная для алмаза. В результате часть поверхности внутреннего алмаза растворилась, и он стал свободно болтаться во внутренней полости. Это же послужило причиной того, что два волокнистых образования также растворились с образованием более широких каналов” (Бескрованов, 2022).

Основой данного генетического анализа образцов алмаза типа “Матрешка” является мантийно-карбонатитовая теория генезиса алмазов и ассоциированных фаз (Litvin, 2017). При этом составы природных алмазообразующих сред обоснованы согласно требованиям критерия сингенезиса алмазов с парагенными и ксеногенными минеральными фазами (Litvin, 2007). К главным этапам формирования месторождений алмазов в кимберлитовых трубках взрыва отнесены следующие (Литвин и др., 2020):

(1) *Формирование алмазообразующих полностью смешимых карбонат-силикатных расплавов с растворенным элементарным углеродом и их очагов в РТ-условиях верхней мантии (150–250 км, 4.5–7.5 ГПа). Главные Mg, Fe, Ca, Na-карбонатные компоненты материнских расплавов – продукты CO₂-метасоматоза породообразующих минералов перидотитов (оливина, ортопироксена, клинопироксена, граната) и/или эклогитов (омфацита, граната, коэсита). Компоненты этих же минералов верхней мантии, растворяясь в карбонатных расплавах, образуют силикатную составляющую алмазообразующих сред. Происхождение источника углерода алмазов прослеживается по изотопным данным от аккреции углистых хондритов до коренных углеродсодержащих пород мантии (Виноградов и др., 1965; Галимов, 1968; Javoy et al., 1986).*

(2) *Массовая нуклеация и рост кристаллов алмаза в очагах карбонат-силикат-углеродных расплавов с возможностью захвата парагенных и ксеногенных включений. В лабильно пересыщенном к алмазу растворе углерода в полностью смешимом карбонат-силикатном расплаве происходит нуклеация алмазных зародышей, а с дальнейшим ростом кристаллов алмаза концентрация пересыщения углеродом понижается до метастабильной.*



Рис. 4. Игрушка “Матрешка” в разобранном виде. Основная кукла с внутренней полостью (слева) и кукла-включение (справа).

При росте алмазы могут захватывать включения парагенных и ксеногенных фаз. В условиях тепловода во вмещающую мантию метастабильное пересыщение алмазообразующего расплава углеродом поддерживаются вплоть до полного затвердевания очага. На солидусе карбонат-силикатный расплав-раствор углерода становится насыщенный к алмазу. В геотермальном режиме мантии твердое состояние алмазоносного очага сохраняется до активизации регионального кимберлитового магматизма через миллионы лет.

(3) *Перемещение вещества алмазоносных очагов верхней мантии кимберлитовыми магмами на глубины земной коры с формированием кумулятивных очагов. Высокотемпературные потоки кимберлитовых магм разрушают алмазоносные очаги верхней мантии, подплавляют и ассимилируют алмазоносное вещество. При транспорте с понижением давления алмаз становится термодинамически метастабильной фазой, а графит – стабильной. Подъем сопровождается травлением и растворе-*

нием алмазов карбонат-содержащими расплавами. Происходит также захват ксенолитов вмещающих пород верхней мантии и земной коры. При давлении менее 2,6 ГПа карбонаты Mg и Fe попадают в условия инконгруэнтного плавления и разлагаются на оксиды и CO_2 (Irving, Wyllie, 1975; Weidner, 1982). Это сопровождается С–О–Н-флюидизацией кимберлитов и ассимилированного вещества накануне формирования герметизированных кумулятивных кимберлитовых очагов в земной коре.

(4) *Затвердевание кимберлитовых расплавов в кумулятивных очагах при теплоотводе во вмещающие породы земной коры.* При этом происходит частичное или полное растворение метастабильных алмазов карбонат-содержащими кимберлитовыми и ассимилированными расплавами. При затвердевании расплавов в кумулятивных очагах генерируется и накапливается самостоятельная сильно сжатая газовой-флюидная С–О–Н-фаза с постепенным возрастанием в ней давления. При критическом давлении возникает “флюидное бурение” прочной кровли кумулятивного очага (Perchuk, Ryabchikov, 1983).

(5) *Образование алмазных месторождений в кимберлитовых трубках взрыва.* “Флюидное бурение” завершается взрывным разрушением кровли кумулятивного очага с формированием полости трубки взрыва. Кратковременный перепад давления перебрасывает еще горячее кимберлитовое и ассимилированное алмазоносное вещество из кумулятивного очага в трубку взрыва, в полости которой формируется кимберлитовое месторождение алмазов. Достаточно продолжительное время неоднородное алмазоносное вещество в трубке взрыва уплотняется при воздействии атмосферных и гидротермальных факторов.

Главная цель настоящей работы – раскрыть составы, физико-химические механизмы генезиса и особенности эволюции материнских расплавов при кристаллизации и растворении основного алмаза и алмаза-включения образца “Матрешка” в условиях формирования алмазоносной кимберлитовой трубки Нюрбинская. Теоретической основой при этом являются положения мантийно-карбонатитовой теории генезиса алмазов и ассоциированных минеральных фаз (Литвин и др., 2016; Litvin, 2017). Теория обоснована результатами экспериментальных физико-химических исследований многокомпонентных многофазовых карбонат-силикат-углеродных систем, сопоставимых по составам с алмазообразующими природными средами по данным аналитического изучения парагенных сингенетических включений в алмазах и породообразующих минералов алмазоносных пород (Литвин и др., 2016; 2020). Уникальный алмаз “Матрешка” формировался во время массо-

вой кристаллизации алмазов трубки Нюрбинская, поэтому их свойства и особенности генезиса должны учитываться. Физико-химический анализ его происхождения выполняется также с учетом данных по минералогическим и физическим свойствам как основного алмаза, так и включения (Коногорова и др., 2020).

МАТЕРИНСКИЕ СРЕДЫ, СТИМУЛЫ И МЕХАНИЗМЫ ГЕНЕЗИСА АЛМАЗОВ

Материнские среды алмазов. Породы мантии – продукты фракционной кристаллизации глобального магматического океана пиролитового состава (Ringwood, 1975) в гравитационном поле Земли. По соотношению ксенолитов в кимберлитах (MacGregor, Carter, 1970) верхняя мантия на 95% ультрабазитовая перидотитовая и на 5% базитовая эклогитовая. Породообразующие минералы перидотитов – *Ol* (оливин $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$), *Orp* (ортопироксен $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$), *Cpx* (клинопироксен $(\text{Ca}, \leq \text{Na})(\text{Mg}, \text{Fe})(\text{Si}, \leq \text{Al})_2\text{O}_6$) и *Grt* (гранат $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Ca})_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$). Для ультрабазитовой магматической эволюции важна перитектическая реакция ортопироксена и расплава с образованием клинопироксена (Литвин, 1991; Литвин и др., 2016). Для ультрабазит-базитовой эволюции ключевым механизмом является перитектическая реакция оливина и жадеит-содержащего расплава с образованием гранат-содержащей ассоциации (Литвин и др., 2019; Литвин, Кузюра, 2021). При этом неравновесный режим фракционной кристаллизации обеспечивает переход от ультрабазитовых перидотитов к базитовым эклогитам с породообразующими минералами *Omph* (омфацитом $(\text{Ca}, \geq \text{Na})(\text{Mg}, \text{Fe})(\text{Si}, \geq \text{Al})_2\text{O}_6$), *Grt* (гранатом $(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe})_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$) и *Coe* (коэситом SiO_2).

Роль породообразующих минералов перидотитов и эклогитов первостепенна в генезисе алмазообразующих карбонат-силикат-углеродных расплавов верхней мантии. Вначале в реакциях CO_2 -метасоматоза минералов мантии образуются расплавы карбонатов Mg, Fe, Ca, Na, в которых растворяются те же породообразующие минералы мантии. В результате создаются полностью смешимые карбонат-силикатные расплавы. Как и карбонатные, карбонат-силикатные расплавы являются эффективными растворителями углерода, чем обеспечивается формирование алмазообразующих карбонат-силикат-углеродных расплавов. При этом в их силикатной составляющей сохраняется способность к выше упомянутому перитектическим реакциям как ортопироксена, так и оливина. Это обеспечивает ультрабазит-базитовую эволюцию алмазообразующих расплавов, с которой связано образование перидотитовых и эклогитовых минеральных включений в

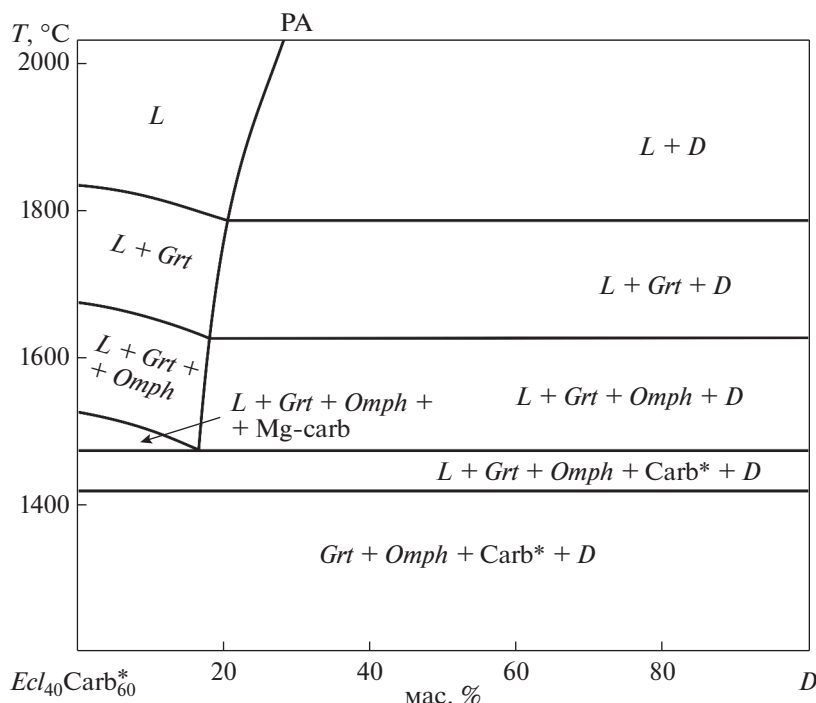


Рис. 5. Равновесная диаграмма сингенезиса алмаза и ассоциированных фаз базитовой системы эклогит–карбонат Carb*–углерод С (= алмаз D) в ее политермическом сечении Ecl₄₀Carb*₆₀ – D по данным эксперимента при 7.0 ГПа. Символы: PA – кривая растворимости алмаза, L – полностью смешимый карбонат-силикатный расплав, Ecl – эклогит, Mg-carb – Mg-карбонат, Carb* – объединенный символ карбонатов Mg, Fe, Ca, Na для упрощения диаграммы, Omph – омфациит, Grt – гранат, D – алмаз.

алмазах, а также алмазоносных перидотитов и эклогитов среди ксенолитов в кимберлитах (Литвин и др., 2020).

Возможно предположить, что главное значение в алмазообразующих процессах кимберлитовой трубки Нюрбинская принадлежит базитовой карбонат-эклогитовой системе, так как среди сингенетических включений в массовых алмазах минералы эклогитового парагенезиса преобладают по сравнению с перидотитовыми (Специус и др., 2015; Коногорова и др., 2020). Данные о парагенных силикатных включениях для обоих алмазов образца “Матрешка” отсутствуют. Вместе с тем в центральной части алмаза-включения рентгеновским методом установлено присутствие включенных фаз, природа которых не идентифицирована (Коногорова и др., 2020). Таким образом, возможность генезиса алмаза “Матрешка” в ультрабазитовой карбонат-перидотитовой системе не может быть исключена. Однако физико-химические механизмы генезиса в обоих случаях подобны, поэтому целесообразно подробно рассмотреть относительно более простой и вероятный вариант карбонат-эклогит-углеродной ростовой среды. Ниже приведена также необходимая информация для карбонат-перидотит-углеродной системы, которая может быть использована при

получении необходимых минералогических доказательств.

На рис. 5 – фазовые отношения при плавлении системы эклогит (Ecl)–карбонат (Carb*)–алмаз (D) в ее политермическом сечении Ecl₄₀Carb*₆₀ – D, исследованные в эксперименте при 7.0 ГПа (Litvin, 2017). Кривая PA характеризует равновесную растворимость алмаза в полностью смешимых эклогит-карбонатных расплавах. Фазовая диаграмма иллюстрирует совместную кристаллизацию алмазов и силикатных минералов, чем обеспечивается обрастание алмазами минералов, оказавшихся с ними в контакте, и в итоге их захват как парагенных включений. При этом захват парагенных включений карбонатных минералов может происходить только на солидусе алмазообразующей системы, где они кристаллизуются в самостоятельные твердые фазы. Этим объясняется их относительная редкость среди включений в природных алмазах. С другой стороны, исключительно редки включения карбонатных и карбонат-силикатных расплавов, которые не создают из-за пониженной вязкости достаточное сопротивление растущим алмазам и легко отжимаются их гранями. Эти процессы влияют на соотношение силикатных и карбонатных пара-

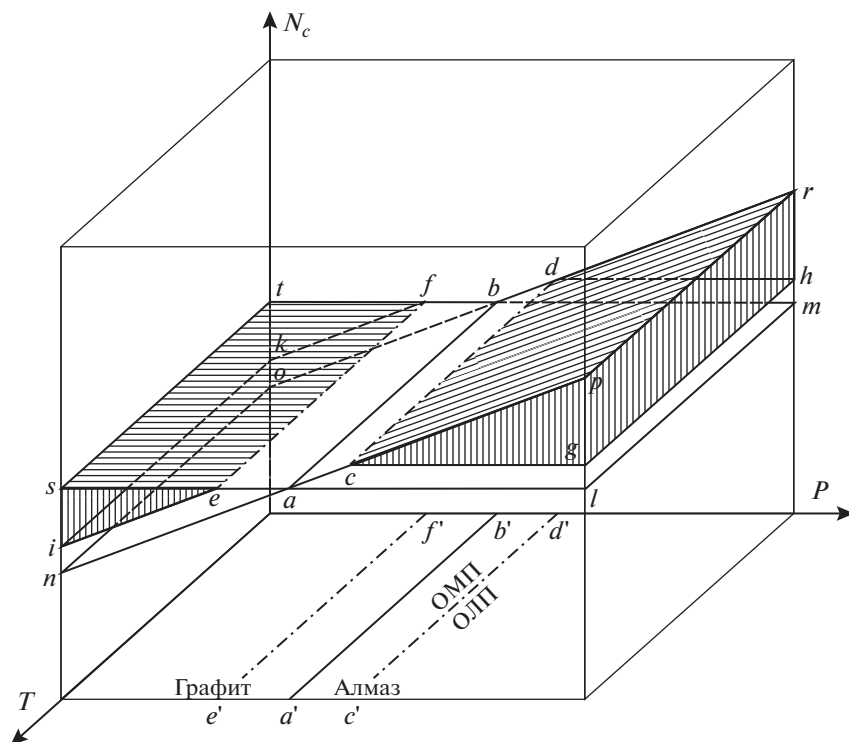


Рис. 6. P – T – N_c -диаграмма пересыщения углерода в расплаве-растворителе с проекцией на PT -плоскость (P – давление, T – температура, N_c – растворимость углерода в обобщенном расплаве-растворителе). Термодинамически стабильные и метастабильные (но кинетически устойчивые) фазы алмаза и графита участвуют в формировании расплаво-растворов углерода, которые могут быть как лабильно (заштриховано), так и метастабильно пересыщенными по отношению к алмазу и графиту. Условные обозначения: (ab) – PTN_c -кривые растворимости алмаза и графита совпадают в условиях равновесной границы алмаз-графит, показанной в проекции $(a'b')$ на граничную PT -плоскость; $(abml)$, $(abfise)$ – поверхности растворимости стабильного и метастабильного алмаза; $(abon)$, $(abdrpc)$ – поверхности растворимости стабильного и метастабильного графита; $(cdhg)$ – граница между областями лабильных $(cdhgrp)$ и метастабильных $(abmlgcdh)$ пересыщений к алмазу; $(efkj)$ – граница между областями лабильных $(efjsik)$ и метастабильных $(abonikfe)$ пересыщений к графиту. В PT -плоскости – $(a'b')$, $(e'f')$, $(c'd')$ – проекции соответствующих границ (ab) , (ef) , (cd) . Соответственно, ОМП и ОЛП – области метастабильных и лабильных пересыщений.

генных включений в природных алмазах. Поэтому соотношение минеральных включений в алмазах может использоваться для качественной, но не количественной оценки химического состава алмазообразующих сред.

Подобные фазовые отношения характерны и для системы перидотит–карбонат Carb^* –углерод C (= алмаз D) при 7 ГПа в интервале 1400–2000°C (Litvin, 2017). При этом последовательность образования алмаз-содержащих фазовых полей при кристаллизации материнских расплавов следующая: $L + D$, $L + Ol + D$, $L + Ol + Opx + D$, $L + Ol + Opx + Grt + D$, $L + Ol + Opx + Grt + Cpx + D$, $L + Ol + Opx + Grt + Cpx + Carb^* + D$, $Ol + Opx + Grt + Cpx + Carb^* + D$. Здесь, как и в эклогит-карбонатитовой системе, реализуются требования критерия сингенезиса алмаза и парагенных включений к составам природных алмазообразующих сред, в соответствии с которыми такие среды должны обеспечивать совместное образование алмазов и парагенных минеральных включений,

а также возможность захвата ксеногенных включений. По данным (Коногорова и др., 2020) в случае алмаза “Матрешка” среди включений в его основном алмазе и алмазе-включении обнаружены только парагенный метастабильный графит, кристаллизующийся из алмазообразующего расплава, и ксеногенный сульфид, расплав которого несмесим с алмазообразующим полностью смесимым карбонат-силикатным расплавом. Включения графита в ассоциации с сульфидами характерны и для массовых алмазов эклогитового парагенезиса.

Стимулы и механизмы генезиса алмазов. Алмаз и графит представлены в природе равновесными термодинамически стабильными модификациями и метастабильными, но кинетически устойчивыми формами (рис. 6). При этом равновесная растворимость стабильных фаз алмаза и графита в эффективных расплавах-растворителях (таких как расплавы металлов, сульфидов, карбонатов, некоторых силикатов, полностью смесимых кар-

бонат-силикатных и др.) одинакова только для P - T -условий кривой равновесия графит-алмаз (ab). В поле стабильности алмаза растворимость метастабильного графита ($acprdb$) выше, чем алмаза ($almb$), и разница их растворимостей увеличивается по мере повышения давления. Наоборот, в поле стабильности графита растворимость метастабильного алмаза ($aestfb$) выше, чем графита ($anob$), и разница их растворимостей увеличивается по мере понижения давления. Фазовая диаграмма (рис. 6), раскрывающая эти соотношения между стабильными и метастабильными фазами алмаза и графита, а также их растворами углерода, демонстрирует изменчивые стимулы при их росте и растворении (Литвин, Спивак, 2004; Litvin, 2017). Этими стимулами при кристаллизации алмазов в материнских средах являются концентрации углерода в пересыщенных растворах, тогда как при растворении алмазов – концентрации ненасыщенных углеродом карбонат-содержащих растворителей. Эти стимулы эффективны как для основного, так и включенного алмазов образца “Матрешка”, а также алмазов массовой кристаллизации трубки Нюрбинская.

На рис. 6 граница равновесия алмаз-графит в P - T -координатах изображена как ($a'b'$). В этих условиях и алмаз и графит стабильны, а их равновесные растворимости равны и изображены в P - T - N_c -координатах как (ab). Если источником углерода является метастабильный графит, то при повышении давления сначала возникает область метастабильного пересыщения ($abmlgcdh$), которого недостаточно для самопроизвольной нуклеации алмазных зародышей. Однако при метастабильном пересыщении рост алмаза осуществим на затравочных кристаллах, что, – по экспериментальным данным, – сопровождается спонтанной кристаллизацией метастабильного, но кинетически устойчивого графита (Litvin, 2017). С дальнейшим повышением давления и возрастанием концентрации растворенного углерода создается область лабильного пересыщения ($cdhgr$). Степень пересыщения углеродом лабильных растворов обеспечивает самопроизвольную массовую нуклеацию алмазных зародышей и процессы их роста, в результате которых лабильное пересыщение к алмазу может заметно понижаться вплоть до перехода в метастабильное. Таким образом, величина пересыщения к алмазу, как алмазообразующий стимул, в природных условиях не постоянна, она изменчива в зависимости от давления и температуры, а также влияния характера кристаллизационных процессов алмаза.

Температуры алмазообразующих очагов медленно понижаются из-за постоянного теплоотвода во вмещающие породы мантии. Этим поддерживается пересыщенное состояние растворенного углерода по отношению к алмазу в полностью

смесимых карбонат-силикатных расплавах. На рис. 7 представлена обобщенная диаграмма составов и источников вещества материнских расплавов алмазов и ассоциированных фаз (Литвин и др., 2020). В данной диаграмме согласованы результаты экспериментальных физико-химических исследований фазовых отношений при плавлении многокомпонентных многофазовых магматических и алмазообразующих систем верхней мантии с данными аналитического изучения химических и фазовых составов пород и минералов, генетически связанных с алмазами. Граничные малые тетраэдры на вершинах главного тетраэдра обозначают источники вещества парагенных компонентов, как главных перидотитовых, эклогитовых и карбонатных, так и примесных растворимых. Тетраэдр ксеногенных фаз, отнесенных к примесным фазам и компонентам, которые нерастворимы в материнских карбонат-силикат-углеродных расплавах, отделен условной границей полной жидкостной несмесимости (г.п.ж.н.) от диаграммы материнских расплавов. Символ углерода, как общего компонента всех граничных тетраэдров системы, вынесен за пределы диаграммы.

Физико-химическая ультрабазит-базитовая эволюция магматизма верхней мантии от перидотит-пироксенитовых составов до эклогитовых становится возможной в режиме фракционной кристаллизации (ф.к.), благодаря перитектическим реакциям ортопироксена (для ультрабазитовых составов) и оливина (ключевое значение в ультрабазит-базитовом переходе). Компоненты перидотитовых и эклогитовых породообразующих минералов, растворяясь в расплавах $Mg-Fe-Ca-Na-(\pm K)$ -карбонатов вместе с углеродом, создают материнские расплавы алмазов и ассоциированных фаз. Вместе с этим силикатные компоненты несут перитектические реакции ортопироксена и оливина, которые обеспечивают ультрабазит-базитовую эволюцию алмазообразующих расплавов в режиме фракционной кристаллизации (ф.к.). Физико-химический раствор-расплавный механизм образования алмаза представляется единым для его кимберлитовых и лампроитовых месторождений. Выделены примесные растворимые компоненты, концентрация которых изменчива. Формирование их минеральных фаз также возможно в алмазообразующих расплавах, поэтому их включения в алмазах относятся к парагенным. Выделены также примесные нерастворимые компоненты, минералы и расплавы которых являются ксеногенными по отношению к алмазу; их образование из алмазообразующих расплавов невозможно, но проникновение в них не ограничивается.

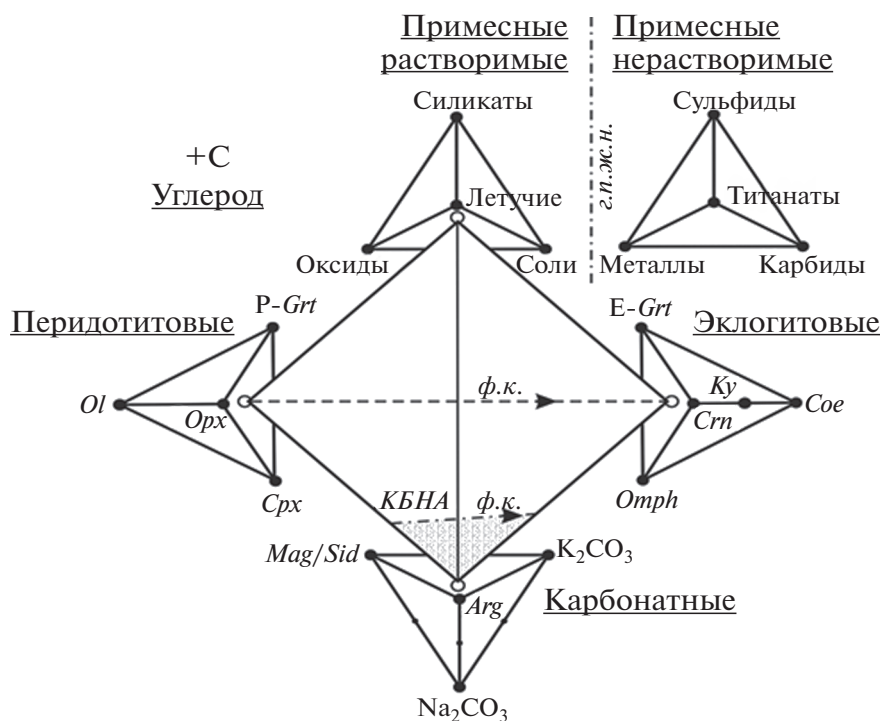


Рис. 7. Обобщенная диаграмма-тетраэдр составов материнских расплавов алмазов и ассоциированных фаз (заштрихованная область). Условные обозначения: *Ol* – оливин, *Opх* – ортопироксен, *Срх* – клинопироксен, *P-Grt* гранат перидотитового парагенезиса, *Omph* – омфакит, *E-Grt* – гранат эклогитового парагенезиса, *Crn* – корунд, *Ku* – кианит, *Coe* – коэсит, *Mag* – магнезит, *Arg* – арагонит, *Sid* – сидерит, – КБНА – концентрационный барьер нуклеации алмаза, г.п.ж.н. – граница полной жидкостной несмесимости, ф.к. – фракционная кристаллизация, направление которой обозначено стрелкой.

ФИЗИКО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ АЛМАЗА “МАТРЕШКА” НА ГЛУБИНАХ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ

Кристалломорфологические особенности основного алмаза и алмаза-включения образца “Матрешка”, а также массовых алмазов трубки Нюрбинская совпадают: октаэдрический габитус, шпинелевое двойникование октаэдр-ромбододекаэдр со сноповидной штриховкой, треугольные и канало-образные фигуры травления, включения графита и сульфида, природа дефектов и примесей. Для трубки Нюрбинская характерно преобладание алмазов-двойников над октаэдрическими и ромбододекаэдрическими монокристаллами, высокое содержание алмазов со скульптурами травления. Эти факты свидетельствуют, что уникальный образец “Матрешка” формировался одновременно и в тех же ростовых расплавах, что и множество алмазов массовой кристаллизации. Эти дефекты показательны для физико-химической эволюции его ростовой среды с переходами от роста к растворению. При этом о совместном росте основного алмаза и алмаза-включения свидетельствуют характерные рисунки поверхностной индукционной штриховки, зеркальное совпадение форм роста на поверх-

ности полости основного и грани включенного, макровключения графита и сульфидов, примесные и структурные дефекты, однородные результаты лазерной люминесценции (Коногорова и др., 2020). Допущение, что изначально основной алмаз и алмаз-включение были частями единого кристалла, главная особенность которого в двойниковом сочленении областей послыоного октаэдрического роста и волокнистой ромбододекаэдрической кристаллизации, является произвольным предположением (Fritsch, 2021).

Физические и кристалломорфологические данные для обоих алмазов образца “Матрешка” (Коногорова и др., 2020) свидетельствуют о сопоставимых давлении, температуре и времени их образования, а также об общем материнском расплаве, хотя его состав не обсуждается. Вместе с тем, минеральный состав ксенолитов пород верхней мантии в кимберлитах трубки Нюрбинская, как и сингенетические включения в алмазах свидетельствуют о преобладании базитовых эклогитов над ультрабазитовыми перидотитами (Специус и др., 2015). Показательны также для 46% алмазов включения графита, нередко в ассоциации с сульфидами, а также формы частичного растворения большинства алмазов.

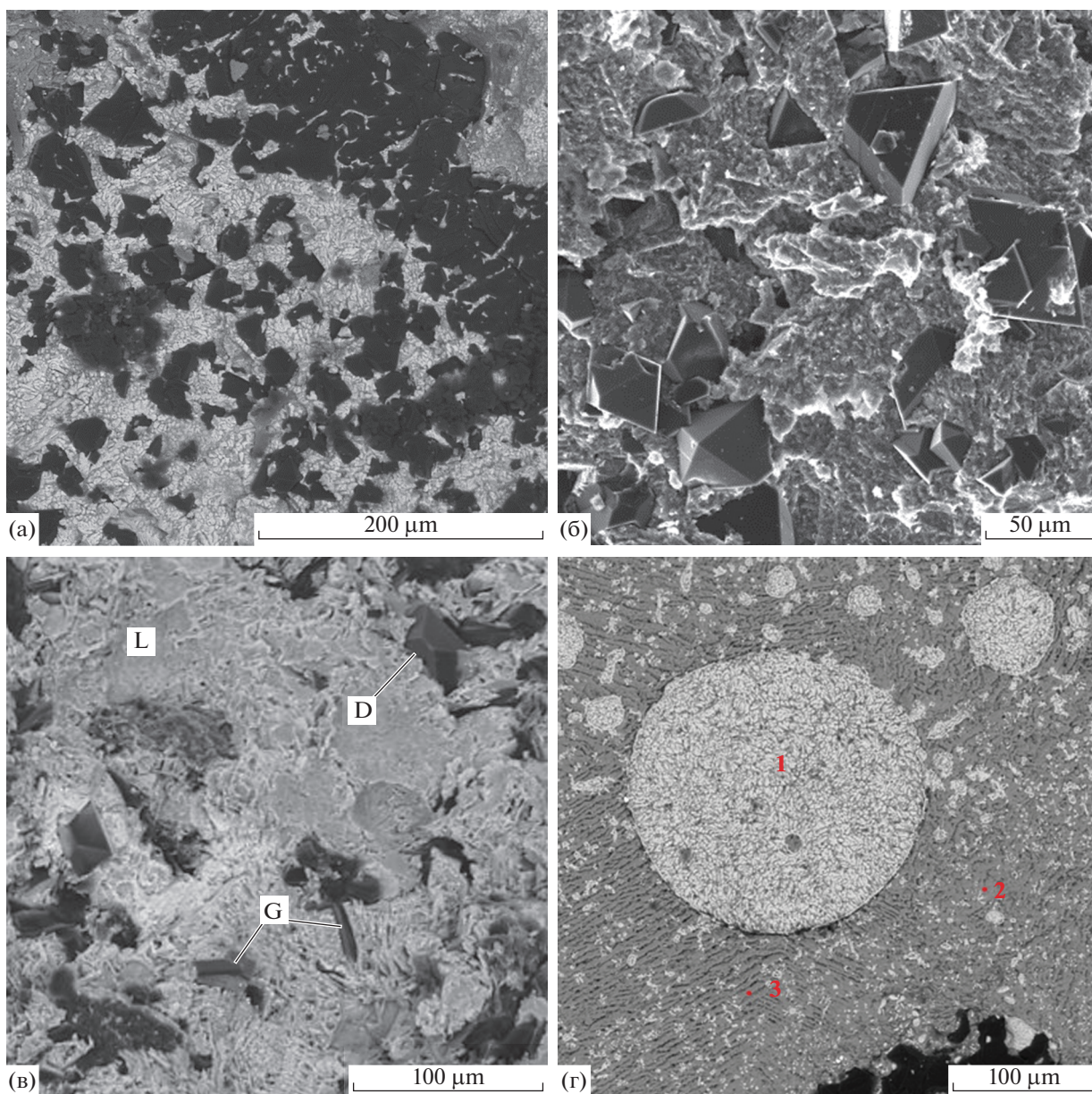


Рис. 8. Экспериментальные образцы, иллюстрирующие кристаллизацию алмаза в карбонат-силикат-углеродных расплавах, а также происхождение парагенных и ксеногенных включений: (а, б) спонтанная кристаллизация в системе карбонат-силикат-углерод при 7.0 ГПа; (в) совместная кристаллизация алмаза D и метастабильного графита G (L – расплав); (г) несмешиваемые расплавы – карбонат-силикат-углеродные (серые) и шарообразные сульфидные (светлые) с поликристаллическим сростком алмазов (темным).

Как следует из анализа PTN_c -соотношений системы углерод-растворитель (рис. 6), величина пересыщения углеродом ростовых расплавов алмаза определяет плотность его нуклеации и массовой кристаллизации. Например, рис. 8а и 8б иллюстрируют достаточно высокую плотность спонтанной кристаллизации алмаза в (Mg–Fe–Ca–Na-карбонат)-эклогит-углеродных расплавах в эксперименте при 7 ГПа (Litvin, 2017). При понижении давления с приближением к границе алмаз-графит величина пересыщения к алмазу

понижается, что ведет к уменьшению плотности массовой нуклеации и скорости роста кристаллов. Возможные PT -условия формирования алмазного образца “Матрешка” в ростовых расплавах трубки Нюрбинская (рис. 6) принадлежат к области границы (cd) между областями лабильных и метастабильных пересыщений. Об этом свидетельствуют включения спонтанных кристаллов парагенного метастабильного графита как в основном его алмазе, так и в алмазе-включении (Коногорова и др., 2020). Указанием на относитель-

но пониженные температуры формирования алмазного образца “Матрешка” могут служить невысокие модальные значения коэффициента поглощения полосы азотного V1-дефекта — 1367 см^{-1} (Kriulina et al., 2010; Криулина и др., 2013).

Процессы нуклеации зародышей и роста основного и включенного алмазов образца “Матрешка” одновременны и совмещены с массовой кристаллизацией алмазов кимберлитового месторождения трубки Нюрбинская. Их общими материнскими средами являются карбонат-эклогит-углеродные расплавы, в которых одновременно с алмазами могут кристаллизоваться парагенные минералы, а ксеногенные — проникать в них. При этом парагенные и ксеногенные минеральные фазы могут одновременно (сингенетически) захватываются растущими алмазами как включения. Массовая нуклеация алмазов происходит в области лабильных пересыщений (рис. 6), последующая кристаллизация на возникших зародышах алмазов понижает пересыщение к алмазу до метастабильного. Как и в экспериментальных системах, время активной кристаллизации природных алмазов на ранних стадиях может соответствовать первым десяткам минут. При этом два кристалла становятся затравками для основного и включенного алмазов образца “Матрешка”, занимая оптимальное взаимное расположение по отношению к алмазам массовой кристаллизации.

Важное значение имеет распределение кристаллизующихся алмазов вокруг затравочных кристаллов образца “Матрешка”. При росте каждый массовый кристалл, как и алмазы образца “Матрешка”, создают вокруг себя своеобразный ореол понижающейся концентрации углерода в карбонат-эклогит-углеродном растворе. На внешней границе такого ореола концентрация углерода в расплаве может какое-то время сохраняться исходной, если она достаточно удалена от ореолов со-кристаллизующихся алмазов. Этим может создаваться эффективная конфигурация исходных метастабильно пересыщенных растворов углерода в контакте с ореолами растущих основного алмаза и алмаза-включения образца “Матрешки”. Эта конфигурация должна соответствовать форме основного алмаза, чем обеспечивается его непрерывный рост до полного завершения.

Вероятно, в начальной стадии на затравке основного алмаза быстро разрастаются грани узкой поверхности $4.8 \times 2.8 \text{ мм}$ с последующими поворотами к началу торцевого роста граней четырех боковых поверхностей — двух 4.8×4.9 и двух $2.8 \times 4.9 \text{ мм}$ вокруг формирующейся полости. Одновременно происходит рост алмазной затравки-включения из прилегающего материнского расплава, чем создается полость в основном алмазе,

который не получает достаточной подпитки изнутри. Этот же “внутренний” расплав прилегает и к основному алмазу со стороны внутренней полости, чем обеспечивается небольшое его подрастание изнутри. Немаловажно, что при этом опережающий торцевой рост основного кристалла блокирует боковой рост алмаза-включения, определяя его уплощенную форму с размерами в сечении $1.9 \times 0.5 \text{ мм}$. В дальнейшем пересыщенный углеродом расплав на фронте роста поддерживает торцевой рост основного алмаза только в длину до 4.9 мм . Одновременно из того же расплава растет в длину и алмаз-включение до 2.1 мм .

Закрытая полость, в которой оказывается алмаз-включение в окружении материнского карбонат-эклогитового расплава, создается заключительным формированием в основном алмазе граней второй “герметизирующей” узкой поверхности $4.8 \times 2.8 \text{ мм}$. В дальнейшем слабо пересыщенная к алмазу метастабильная концентрация растворенного углерода с понижением температуры уменьшается до насыщенной на солидусе ростовой системы. Благодаря теплоотводу во вмещающие породы происходит полное затвердевание алмазоносного очага в геотермальном режиме верхней мантии.

Немаловажно, что на этапе массовой нуклеации и роста кристаллов алмаза в очагах карбонат-силикат-углеродных расплавов с захватом парагенных и ксеногенных включений могут формироваться преимущественно плоскогранные кристаллы алмаза. Рост основного и включенного алмазов образца “Матрешка” в метастабильно пересыщенных карбонат-эклогит-углеродных расплавах (как и массовая кристаллизация алмазов трубки Нюрбинская) сопровождается образованием парагенных включений метастабильного графита, который кристаллизуется совместно с алмазом (рис. 8в), как и ксеногенных включений сульфидных расплавов. Рис. 8г иллюстрирует эффект жидкостной несмесимости полностью смесимых карбонат-силикатных расплавов с сульфидными, что свидетельствует о ксеногенной природе сульфидных включений по отношению к алмазообразующим карбонат-силикат-углеродным расплавам.

В случае образца “Матрешка”, в закрытой полости основного алмаза затвердевший материнский карбонат-эклогит-углеродный расплав, окружающий алмаз-включение, рассыпается на несмесимые твердые карбонаты Mg, Fe, Ca и Na, силикаты омфацит, гранат и оксид Si (коэсит), а также метастабильный микродернистый графит. В этих условиях алмаз термодинамически стабилен (возможный интервал давления $4.5\text{--}7.5 \text{ ГПа}$) при температурах, соответствующих геотерме на глубинах $150\text{--}250 \text{ км}$. При этом грани основного алмаза, как и его внутренней полости, а также ал-

маза-включения остаются плоскими с сохранением ростовой морфологии. Сквозные отверстия отсутствуют.

ФИЗИКО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ЧАСТИЧНОГО РАСТВОРЕНИЯ АЛМАЗА “МАТРЕШКА” ПРИ ПОДЪЕМЕ НА ГЛУБИНЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Через десятки миллионов лет в областях консолидированных алмазоносных очагов верхней мантии активизируется кимберлитовый магматизм в форме подвижных восходящих высокотемпературных потоков кимберлитовых расплавов. В составе первичной кимберлитовой магмы, как продукта метасоматического взаимодействия глубинного сверхкритического CO_2 -флюида с породообразующими минералами вмещающей мантии, преобладают силикатные и карбонатные компоненты Mg, Fe и Ca. Встречая консолидированный алмазоносный карбонат-силикат-углеродный очаг, кимберлитовый поток разрушает его, проникает в него, частично расплавляет твердое материнское вещество и ассимилирует его вместе с алмазами. Дальнейшее его восхождение сопровождается захватом ксенолитов вмещающих пород верхней мантии и земной коры.

После проникновения высокотемпературной кимберлитовой магмы в алмазообразующий очаг грани поверхности основного алмаза образца “Матрешка” подвергаются активному физико-химическому воздействию высокотемпературных карбонат-содержащих кимберлитовых и ассимилированных алмазоносных расплавов, которые являются эффективными растворителями алмаза (Литвин и др., 2018). При подъеме в *PT*-условиях за пределами материнского очага алмаз становится термодинамически метастабильной, но кинетически устойчивой фазой. При этом его растворимость в карбонатных и карбонат-силикатных расплавах становится выше, чем стабильного графита в этих условиях, а разность их растворимостей увеличивается с понижением давления (рис. 6).

Внешние грани основного алмаза образца “Матрешка”, как и алмазов массовой кристаллизации, при контактах с расплавленным карбонат-силикатным кимберлитовым и ассимилированным веществом начинают подвергаться кратковременным травлению и растворению в разрушенных алмазообразующих очагах. Процессы растворения продолжают и усиливаются как при дальнейшем подъеме, сопровождаемом понижением давления, так и при формировании и постепенном затвердевании кумулятивного частично расплавленного кимберлитового очага на глубинах земной коры. Драматическим событием кимберлитового транспорта является разложение карбонатов Mg (магнезита) и Fe (сидерита) на ок-

сиды и сверхкритическую CO_2 при понижении давления до 2.6 и 0.4 ГПа в интервале температур 800–1550, что сопровождается C–O–H-флюидизацией кимберлитовых и ассимилированных расплавов (Литвин и др., 2018). В этих условиях арагонит превращается в кальцит, который устойчив вплоть до затвердевания кимберлитов в трубках взрыва.

Между тем, иной физико-химический сценарий реализуется внутри полости основного алмаза образца “Матрешка”. При прогревании кимберлитовой магмой разрушенного алмазоносного очага на глубинах верхней мантии консолидированные фазы алмазообразующей карбонат-силикат-углеродной материнской среды плавятся, возрождая карбонат-эклогит-углеродные расплавы. Однако первоначально концентрация растворенного углерода в них не насыщена к алмазу. Это связано с тем, что в эпизоде полного затвердевания алмазообразующего очага растворимость углерода минимальна на солидусе материнской системы. Высокотемпературная кимберлитовая магма прогревает материнское вещество в полости основного алмаза до температур выше солидусной. Поэтому “возродившийся” материнский ненасыщенный к алмазу расплав в контакте с алмазом-включением и внутренними поверхностями основного алмаза осуществляет травление/растворение их поверхностей, стремясь к состоянию полного насыщения по отношению к алмазу в этих *PT*-условиях. Этот процесс может продолжаться и в условиях дальнейшего подъема на глубины земной коры после перехода алмаза в метастабильное состояние. При этом давление внутри полости основного алмаза сохраняется высоким, тогда как на его поверхности оно стремительно понижается по мере продвижения кимберлитовой магмы к глубинам земной коры.

Важное изменение в основном алмазе образца “Матрешка” в условиях подъема из верхней мантии на глубины земной коры обусловлено возрастанием разности между внутренним давлением в его полости и внешним на его поверхности. В условиях алмазообразующего очага верхней мантии значения этих давлений должны совпадать (в пределах 4.5–7.5 ГПа). В условиях кимберлитового транспорта на глубины земной коры в закрытой полости основного образца оно продолжает сохраняться относительно высоким, близким к начальному уровню. Однако, на внешней поверхности основного алмаза давление стремительно уменьшается при транспорте вплоть до значения 0.01–0.02 ГПа при формировании кумулятивного очага на глубине земной коры. В результате напряжение изнутри полости возрастает, а внутреннее давление сильно-сжатого, высокотемпературного и маловязкого полностью смесимого карбонат-силикат-углеродного расплава на по-

верхность внутренней полости основного алмаза значительно возрастает в отсутствие внешней механической поддержки. Наименее прочные места локализованы в областях двойниковых швов, по которым срстаются субиндивиды основного алмаза. В этих ослабленных зонах происходит взрывоподобное продавливание конусообразных отверстий, размеры которых расширяются от 0.1 мм в полости до 0.4 мм при выходе на поверхность. В условиях генерации существенной разницы давлений происходит стремительный выброс жидкой материнской среды из полости, а также твердых частиц омфациита и граната размерами менее 0.1 мм, если они успели образоваться. В результате отверстия в основном алмазе образца “Матрешка” сделали доступной его полость с алмазом-включением для С–О–Н-содержащих кимберлитовых расплавов, сжатых газов, маловязких карбонат-силикатных расплавов и водных растворов, а также твердых частиц размером менее 0.1 мм в условиях кумулятивных очагов и кимберлитовых трубок взрыва. Конусообразная форма каналов в основном алмазе и их неровные внутренние поверхности свидетельствуют о механическом их формировании, направленном изнутри полости. До образования сквозных отверстий в полости сохранялся сильно сжатый материнский карбонат-эклогит-углеродный расплав, насыщенный углеродом, растворение поверхности полости основного алмаза и поверхности алмаза-включения было маловероятным. Такая возможность возникла в условиях кумулятивных очагов флюидизированных карбонат-содержащих кимберлитовых и ассимилированных расплавов.

На глубинах земной коры, встретив препятствие в виде прочной кровли, кимберлитовые магмы с алмазоносным веществом, мантийными и коровыми породами формируют стационарные кумулятивные очаги. В зависимости от времени затвердевания флюидизированных частичных расплавов кумулятивных очагов может происходить небольшое или даже полное растворение метастабильных алмазов в Са–Na-карбонатных и карбонат-кимберлитовых расплавах (Литвин и др., 2018). Происходит также выделение растворенных в кимберлитовых расплавах С–О–Н-компонентов в самостоятельную сильно сжатую сверхкритическую газовой-флюидную фазу, давление в которой нарастает по мере затвердевания кумулятивного очага. Это инициирует “флюидное бурение” кровли очага и приводит к взрывному формированию в кровле конусообразной полости к поверхности Земли. Под воздействием возникшего перепада давления эта полость–“трубка” быстро заполняется кимберлитовым и ассимилированным веществом кумулятивного очага. В дальнейшем – заключительное формирование ал-

мазного месторождения в кимберлитовой трубке взрыва.

После взрывного формирования трубки Нюрбинская происходит продолжительное уплотнение алмазоносного карбонат-содержащего кимберлитового и ассимилированного вещества в месторождении алмазов с воздействием атмосферных и гидротермальных факторов. Свидетельством этих процессов является барит, минерал сернокислого бария $BaSO_4$, которым практически полностью заполнено одно из отверстий основного алмаза “Матрешка”, а во втором отверстии имеется небольшой фрагмент на стенке канала (рис. 2), Барит отличается высокой плотностью 4.5 г/см^3 и твердостью 3–3.5, практически нерастворим в воде (Бетехтин, 1956; Фруе, 1981). Встречается в зернистых, пластинчатых или землистых агрегатах. Цвет белый или серый, красный (из-за окиси железа), желтый или бурый (из-за гидроокислов железа). Обычен в гидротермальных месторождениях, встречается в осадочных оксидных и карбонатных рудах. Таким образом, вероятно, что барит, увлекаемый жидкой водосодержащей струей, мог извне проникать в сужающееся отверстие к полости основного алмаза “Матрешка”. Однако он был остановлен на границе полости с отверстием 0.1 мм из-за особенностей его зернистого строения. Вероятно, фрагмент барита во втором отверстии был прижат к неровной поверхности внутри отверстия при продвижении в направлении полости.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Возраст кимберлитовой трубки Нюрбинская по многочисленным радиологическим исследованиям изменчив в пределах 332–449 млн лет, а по преобладающим датировкам 360–370 млн лет (Серебряков и др., 2019). Это совпадает с изотопной датировкой 363–364 млн лет (Томшин, 2017) и может быть отнесено к эпохе раннего Девона ко времени интеграции суперконтинента Пангея (Божко, 2019). Возраст алмаза “Матрешка” оценивается в 800 млн лет (Quick, 2019).

Формирование алмазного образца “Матрешка” в алмазообразующем очаге верхней мантии является уникальным эпизодом массовой кристаллизации алмазов кимберлитовой трубки Нюрбинская в полностью смесимых карбонат-эклогитовых расплавах, пересыщенных растворенным углеродом. При этом на основании экспериментальных данных скорости роста основного алмаза и алмаза-включения сопоставимы со скоростями массовой кристаллизации алмазов, их продолжительность может быть оценена в первые десятки минут в условиях, близким к изотермическим, что наиболее вероятно для природных алмазообразующих очагов. Уровень пересыше-

ния углеродом материнских карбонат-силикат-углеродных расплавов определяется областью кинетической границы между областями лабильного и метастабильного пересыщений на рис. 6.

В условиях массовой кристаллизации алмазов существенное значение приобретает образование ореола пересыщенного состояния вокруг каждого алмазного зародыша и затем растущего кристалла. Два близко растущих кристалла используют совместно углерод раствора, расположенного между ними. Чем ближе они расположены друг к другу, тем быстрее их рост, после завершения которого между ними оказывается насыщенный раствор. На относительно удаленном расстоянии сначала вокруг каждого алмаза образуется ореол, а между ореолами — промежуточная зона с исходным пересыщением углерода. Существование этой зоны зависит от времени, в течение которого растущие кристаллы смогут использовать ее пересыщенный углерод, расширив, таким образом, свои ореолы. Вероятно, что в случае основного алмаза образца “Матрешка” промежуточные зоны между ореолами его основного алмаза и соседних “массовых” алмазов приобрели объемную конфигурацию будущего основного алмаза. Такая конфигурация метастабильно пересыщенных расплавов-растворов углерода могла контролировать непрерывный рост граней первой ограничительной поверхности основного алмаза, повороты и рост граней четырех боковых поверхностей, а также последние повороты и рост граней второй ограничительной поверхности. При этом торцевой рост в длину граней мог непрерывно продвигать их ореолы пересыщенного состояния в направлении роста. В случае алмаза-затравки промежуточная зона пересыщенного состояния между его ореолом пересыщенного состояния и ореолами пересыщенного состояния растущего основного алмаза со стороны полости не образовывалась. Поэтому для алмаза-затравки складывалась ситуация, когда он мог расти в основном в длину вместе с основным алмазом в направлении зоны пересыщенного расплава, пока пересыщенный углерод не был исчерпан при росте второй ограничительной поверхности основного алмаза.

Габитус основного алмаза и алмаза-включения образца “Матрешка” октаэдрический. Это уплощенные шпинелевые двойники. О совместном росте основного алмаза со стороны полости и алмаза-включения свидетельствуют сходные по конфигурации и размерам зеркально расположенные скульптуры роста в полости основного алмаза и на грани алмаза-включения (Конюхова и др., 2020). В результате частичного растворения октаэдрические формы основного алмаза и алмаза-включения были изменены в октаэдро-додекаэдронидные.

Двойники срастания алмазов как плоскогранные, так и частично или полностью растворенные с поверхности кривогранные встречаются в кимберлитовых трубках достаточно часто. Обнаружилось, что уплощенная форма двойников природных алмазов трубки Нюрбинская является характерной их особенностью, причем чаще скольжение рассматривается как конкурирующий механизм деформации алмазов. Причиной двойникового явления является корпоративное смещение атомов вдоль их сетки для грани, растущей в области двойниковой границы. Энергетическое напряжение при смещении большого количества атомов оценивается как значительное. Двойникование объясняется согласованным движением дислокаций. Скольжение же может развиваться независимо в разных участках кристалла. Появление двойниковой границы между субиндивидуумами одного алмаза может быть следствием незначительной дезориентации их атомов.

Однородные по химическому составу кристаллы основного алмаза образца “Матрешка” представляют собой закономерные нормальные двойниковые срастания определенной кристаллографической ориентации, которые связаны между собой плоскостями двойникового явления как плоскостями симметрии. Таким образом, плоскости симметрии являются главными элементами двойникового явления, которое реализованы также в алмазах массовой кристаллизации трубки Нюрбинская. Рост основного алмаза с полостью на поворотах его ограничивающих двойниковых индивидуумов контролируется коленчатым механизмом двойникового явления. При этом срастания двух субиндивидов расположены под определенным углом наклона. Это соответствует конфигурации пересыщенного состояния карбонат-эклогит-углеродных расплавов-растворов в направлении роста. Таким образом, реализуется полисинтетический двойниковый механизм срастания, что связано с определяющим торцевым ростом монокристаллического алмаза с полостью в направлениях узких боковых поверхностей октаэдрических граней. Если к нормальным относятся кристаллы, которые срослись по плоскости двойникового явления, то к полисинтетическим — кристаллы, в которых чередуются взаимно параллельное срастание двух индивидов с также взаимно параллельным, но с относительным поворотом на 180° . Процесс двойникового явления является эффективным механизмом роста кристаллов с постоянной изменяющейся формой. В случае октаэдрических кристаллов наиболее распространенные двойники формируются по шпинелевому закону двойникового явления (Бокий, 1971), когда возникающая двойная ось перпендикулярна двойниковой плоскости, параллельной октаэдрическим граням субиндивидов.

Двойниковым кристаллом является и уплощенный алмаз-включение образца “Матрешка”. Однако его рост происходил из единого зародыша с развитием пирамид роста, формирующих плоскогранную октаэдрическую огранку, так как рост кристалла осуществлялся в направлении ограничивающих его граней. В основном его рост подобен формированию двойниковых алмазов массовой кристаллизации с определенным ограничительным воздействием совместно растущего основного кристалла.

В результате выполненных исследований выясняется, что подготовка и осуществление ростовых процессов основного алмаза и алмаза-включения образца “Матрешка”, определившие его кристалломорфологические и физические свойства, связаны с этапами физико-геохимической генерации ростовых сред для множества кристаллов кимберлитовой трубки Нюрбинская и массовой кристаллизации алмазов совместно с парагенными минералами включений. Также показано, что процессы травления и растворения как основного алмаза, так и алмаза-включения происходили на этапах захвата, ассимиляции и транспорта алмазоносного вещества, включая образец “Матрешка”, восходящими потоками кимберлитовых магм, а также формирования и затвердевания кумулятивного очага на глубинах земной коры. В условиях кимберлитового транспорта и возросшего перепада давлений между закрытой полостью в основном алмазе и его поверхностью произошло локальное взрывообразное разрушение, направленное из полости, с формированием двух конусообразных сквозных отверстий. Этим в кумулятивном очаге был обеспечен доступ карбонат-содержащих кимберлитовых расплавов-растворителей к термодинамически метастабильному основному алмазу со стороны полости, а также к поверхности алмаза-включения. Этап образования месторождения алмазов начинался с газово-флюидного бурения кровли кумулятивного очага и завершался взрывным перемещением алмазоносных пород с образцом “Матрешка” из очага в образованную в результате кимберлитовую трубку взрыва. С развитием гидротермальной активности в алмазоносной трубке Нюрбинская конусообразные сквозные отверстия в основном алмазе образца “Матрешка” были полностью или частично заполнены осадочным минералом баритом.

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Алмазный образец “Матрешка” состоит из основного монокристаллического алмаза с внутренней полостью, в которой свободно перемещается незакрепленный алмаз-включение. Этот уникальный образец обнаружен в августе 2019 г. сотрудниками АК АЛРОСА среди алмазов массо-

вой кристаллизации в кимберлитовом и ассимилированном алмазоносном веществе трубки Нюрбинская Накынского кимберлитового поля (Якутия, Россия). Кристалломорфологические и физические исследования основного и включенного алмазов “Матрешка” (Коногорова и др., 2020) свидетельствуют об их близком подобии, как и подобии с алмазами массовой кристаллизации трубки Нюрбинская, возраст которой около 360–370 млн лет (при возрасте алмаза “Матрешка” около 800 млн лет). Оба алмаза образца “Матрешка” являются уплощенными шпинелевыми двойниками переходной формы октаэдр-додекаэдронид, образовавшейся в процессах роста и растворения, что характерно и для алмазов массовой кристаллизации.

Происхождение алмазного образца “Матрешка” раскрывается на основе мантийно-карбонатитовой теории формирования природных алмазов и ассоциированных парагенных и ксеногенных минеральных фаз (Litvin, 2017). При этом его генетический сценарий охватывает главные эпизоды в происхождении кимберлитовых месторождений алмаза, в том числе и для трубки Нюрбинская. К этим эпизодам относятся становление алмазообразующего карбонат-силикат-углеродного очага на глубинах верхней мантии, затем массовая нуклеация и кристаллизация в очаге плоскогранных алмазов. Закрытая полость образца “Матрешка” была заполнена алмазообразующим карбонат-эклогит-углеродным расплавом, а после его полного затвердевания – карбонатами Mg, Fe, Ca и Na, силикатами омфацитом, гранатом и оксидом Si (козсит), а также метастабильным микрозернистым графитом и сульфидами. Через миллионы лет осуществляется достаточно быстрый кимберлитовый захват в консолидированном алмазоносном очаге и транспорт карбонат-содержащего вещества с алмазами на глубины земной коры. При этом алмазообразующее вещество в полости алмаза “Матрешка” расплавляется, что сопровождается частичным растворением алмазов, включая основной алмаз и алмаз-включение образца “Матрешка”. Понижение давления при транспорте ведет к инконгруэнтному разложению карбонатов Mg и Fe на оксиды и CO₂ с C–O–H-флюидизацией кимберлитовой магмы и ассимилированного вещества. В случае образца “Матрешка”, в условиях значительного перепада давления между полостью ее основного алмаза и его поверхностью взрывоподобно образуются два сквозных отверстия шириной от 0.1 до 0.4 мм. Это сопровождается выбросом материнского расплава из полости, в которую проникает C–O–H-флюидсодержащий кимберлитовый расплав. Частичное растворение алмазов продолжается при формировании на глубинах земной коры кумулятивного кимберлитового очага. Затвердевание

очага сопровождается растворением алмазов, а также постепенным выделением сильно сжатой С–О–Н-флюидной фазы с возрастающим внутренним давлением. Заключительными эпизодами являются “флюидное бурение” кровли кумулятивного очага, взрывное образование объемной конусообразной трубки и стремительное заполнение ее кимберлитовым и ассимилированным алмазоносным веществом. При формировании кимберлитовой трубки Нюрбинская на алмазоносное вещество воздействуют гидротермальные агенты, с чем связано проникновение осадочного минерала барита $BaSO_4$, в сквозные отверстия основного алмаза “Матрешка”.

Исследование выполнено в Институте экспериментальной минералогии им. Д.С. Коржинского РАН при финансовой поддержке по теме FMUF-2022-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бескрованов В.В. (2022) *О возможном механизме образования алмаза-матрешки. В кн.: Геология и минерально-сырьевые ресурсы северо-востока России. Якутск, Сев.-вост. федеральн. ун-т. им. М.К. Аммосова, с. 283-286.*
- Бетехтин А.Г. (1956) *Курс минералогии. М., Издательство литературы по геологии. 559 с.*
- Божко Н.А. (2019) Алмазоносный магматизм в суперконтинентальных циклах. *Руды и металлы. (3), 22-27.*
- Бокий Г.Б. (1971) *Кристаллохимия. М.: Изд. Наука. 400 с.*
- Виноградов А.П., Кропотова О.И., Устинов В.И. (1965) Возможные источники углерода природных алмазов по изотопным данным C^{12}/C^{13} . *Геохимия. (6), 543-552.*
- Галимов Э.М. (1968) *Геохимия стабильных изотопов углерода. М.: Изд. Недра, 226 с.*
- Коногорова Д.В., Ковальчук О.Е., Бардухинов Л.Д. (2020) Уникальный алмаз из трубки Нюрбинская (Ныкыньское кимберлитовое поле, Западная Якутия, Россия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 25(2), 45-55.*
- Криулина Г.Ю., Гаранин В.К., Самосоров Г.Г. (2013) Прогнозирование качества алмазного сырья в месторождениях различного петрохимического типа. Известия высших учебных заведений. *Геология и разведка. (6), 25-32.*
- Литвин Ю.А. (1991) *Физико-химические исследования плавления глубинного вещества Земли. М.: Наука, 312 с.*
- Литвин Ю.А., Спивак А.В. (2004) Рост кристаллов алмаза при 5.5–8.5 ГПа в карбонат-углеродных расплавах-растворах, химических аналогах природных алмазообразующих сред. *Материаловедение. 3(84), 27-34.*
- Литвин Ю.А., Кузюра А.В. (2021) Перитектическая реакция оливина при 6 ГПа в системе оливин–жадеит–диопсид–гранат–С–О–Н) как ключевой механизм эволюции магматизма верхней мантии. *Геохимия. 66(9), 771-798.*
- Litvin Yu.A., Kuzyura A.V. (2021) Peritectic reaction of olivine in the olivine–diopside–jadeite–garnet–(C–O–H) system at 6 GPa as the key mechanism of the magmatism in the upper-mantle. *Geochem. Int. 59(9), 813-839.*
- Литвин Ю.А., Кузюра А.В., Лиманов Е.В. (2019) Гранатизация оливина в системе оливин–диопсид–жадеит: роль в ультрабазит-базитовой эволюции верхне-мантийного магматизма (эксперимент при 6 ГПа). *Геохимия. 64(10), 1026-1046.*
- Litvin Yu.A., Kuzyura A.V., Limanov E.V. (2019) The role of garnetization of olivine in the olivine–diopside–jadeite system in the ultramafic–mafic evolution of upper-mantle magmatism (experiment at 6 GPa). *Geochem. Int. 57(10), 1045-1065.*
- Литвин Ю.А., Кузюра А.В., Варламов Д.А., Бовкун А.В., Спивак А.В., Гаранин В.К. (2018) Взаимодействие кимберлитовой магмы с алмазами при подъеме из верхней мантии в земную кору. *Геохимия. (9), 848-868.*
- Litvin Yu.A., Kuzyura A.V., Varlamov D.A., Bovkun A.V., Spivak A.V., Garanin V.K. (2018) Interaction of kimberlite magma with diamonds upon uplift from the upper mantle to the Earth’s crust. *Geochem. Int. 56(9), 881-900.*
- Литвин Ю.А., Кузюра А.В., Бовкун А.В., Варламов Д.А., Лиманов Е.В., Гаранин В.К. (2020) Генезис алмазоносных пород из ксенолитов верхней мантии в кимберлитах. *Геохимия. 65(3), 209-236.*
- Litvin Yu.A., Kuzyura A.V., Bovkun A.V., Varlamov D.A., Limanov E.V., Garanin V.K. (2020) Genesis of diamondiferous rocks from upper-mantle xenoliths in kimberlites. *Geochem. Int. 58(3), 245-270.*
- Литвин Ю.А., Спивак А.В., Кузюра А.В. (2016) Основы мантийно-карбонатитовой концепции генезиса алмаза. *Геохимия. (10), 873-892.*
- Litvin Yu.A., Spivak A.V., Kuzyura A.V. (2016) Fundamentals of the mantle carbonatite concept of diamond genesis. *Geochem. Int. 54(10), 839-857.*
- Серебряков Е.В., Гладков А.С., Кошкарлов Д.А. (2019) Трехмерные структурно-вещественные модели формирования кимберлитовых трубок Нюрбинская и Ботуобинская (Якутская алмазоносная провинция, Россия). *Геодинамика и тектонофизика. 10(40), 899-920.*
- Специус З.В., Богуш И.Н., Ковальчук О.Е. (2015) ИК-картирование алмазных пластин из ксенолитов эклогитов и перидотитов трубки Нюрбинская (Якутия): генетические следствия. *Геология и геофизика. 56(1–2), 442-454.*
- Томшин М.Д., Похиленко Н.П., Тарских Е.В. (2017) Морфология кимберлитовой трубки Нюрбинская и ее взаимоотношение с долеритовой дайкой. *ДАН. 477(5), 600-603.*
- Fritsch E. (2021) Revealing the formation secrets of the Matryoshka diamond. *The J. Gemmology. 37(5), 528-533.*
- Frye K., Editor (1981) *Encyclopedia of Earth Sciences, Volume IVB “The Encyclopedia of Mineralogy”.* Stroutsborg, Pennsylvania, Hutchinson Ross Publishing Company.
- Irving A.J., Wyllie P.J. (1975) Subsidiary and melting relations for calcite, magnesite and the join $CaCO_3$ – $MgCO_3$ to 36 kb. *Geochim. Cosmochim. Acta. 39, 35-53.*

- Javoy M., Pineau F., Delorme H. (1984) Carbon and nitrogen in the mantle. *Chem. Geol.* **57**, 41-62.
- Kammerling R.C., Koivula J.I., Johnson M.I., Fritsch E. (Eds.) (1995) Gem News: Diamonds with mobile diamond inclusions. *Gems and Gemology.* **31**(3), 204-205.
- Kriulina G.Yu., Vasiliev E.A., Garanin V.K. (2010) Structural defects in diamonds of the Arkhangelsk and Yakut diamond-bearing provinces. In: *Collection of publications on the results of the III and IV annual scientific readings named after G/P/Kudryavtseva*. Institute of applied mineralogy, p. 93-103.
- Litvin Yu.A. (2007) High-pressure mineralogy of diamond genesis. In: *Advances in High-Pressure Mineralogy* (E. Ohtani, Ed.). Geol. Soc. Am. Sp. Paper 121, 83-103.
- Litvin Yu.A. (2017) *Genesis of Diamonds and Associated Phases*. Springer. XIV + 137 p.
- MacGregor I.D., Carter J.L. (1970) The chemistry of clinopyroxenes and garnets of eclogite and peridotite xenoliths from the Roberts Victor Mine, South Africa. *Phys. Earth Planet. Interiors.* (3), 391-397.
- Perchuk L.L., Ryabchikov I.D. (1983) Experimental modelling of some hydrothermal reactions in kimberlitic magma at 12.5 kbar. In: *Proceedings of the First International Symposium on Hydrothermal Reactions*, Ed. by S. Somia, p. 259-279.
- Quick D. (2019) World-first “Matryoshka diamond” found in Russia. *New Atlas*, accessed 15 December 2020.
- Renfro N., Koivula J.I. (2020) Diamond with mobile green diamond inclusion (p. 141). In: *G@G Micro-World* (Renfro N., Ed.). *Gems and Gemology.* **56**(1), 140-147.
- Ringwood A.E. (1975) *Composition and Petrology of the Earth's Mantle*. N.Y.: McGraw-Hill, 618 p.
- Weidner J.R. (1972) Equilibria in the system Fe–C–O; Part I. Siderite-magnetite-carbon-vapor equilibrium from 500 to 10000 bars. *Amer. J. Sci.* **272**, 735-751.