

ДИСКУССИИ, БИБЛИОГРАФИЯ, ОБЗОРЫ

DOI <https://doi.org/10.30695/zrmo/2019.1484.08>

© Д. чл. В. С. ШКОДЗИНСКИЙ,* В. В. БЕСКРОВАНОВ**

ПРИРОДА РАЗНООБРАЗИЯ АЛМАЗОВ В КИМБЕРЛИТАХ

* *Институт геологии алмазов и благородных металлов СО РАН,
677980, Якутск, пр. Ленина, 39;
e-mail: shkodzinskiy@diamond.yasn.ru*

** *Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова,
677007, Якутск, ул. Кулаковского, 42;
e-mail: vv.beskrovanov@s-yfu.ru*

Однонаправленный характер эволюции включений в алмазах и большая длительность этой эволюции (более 2.8 млрд лет) свидетельствуют о кристаллизации алмазов во фракционированном перидотитовом слое глобального магматического океана. Формирование алмазов происходило вследствие накопления углерода в остаточных кимберлитовых расплавах. Повышение содержания кремнекислоты в расплаве приводило к сильному росту его вязкости, уменьшению скорости диффузии компонентов и увеличению степени пересыщения углеродом. Это обусловило смену тангенциального роста алмазов на радиальный, октаэдрической морфологии кристаллизовавшихся алмазов на ромбодекаэдрическую и кубическую и формирование различных скульптур на гранях алмазов.

Ключевые слова: происхождение алмазов и кимберлитов, магматический океан, мантия.

V. S. SHKODZINSKIY,* V. V. BESKROVANOV.** NATURE OF DIVERSITY OF DIAMONDS IN KIMBERLITES

* *Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch RAS, Yakutsk, Russia*

** *Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia*

The one-way evolution of inclusions in diamonds and its ultra-long duration (more than 2.8 Ga) provide evidence that the crystallization of diamonds took place from the fractionated peridotitic layer in the global magmatic ocean. Diamonds were formed as a result of accumulation of carbon in residual kimberlitic melts. The increment of SiO₂ concentration in the melts caused increase in its viscosity, decrease of diffusion velocity and degree of carbon oversaturation. These resulted that the layered diamond crystallization mode was changed by the radial one, diamond octahedrons transformed into rhombic dodecahedrons and cubes, varied sculptures were created on diamond crystals faces.

Keywords: genesis of diamonds and kimberlites, magma ocean, mantle.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ КИМБЕРЛИТОВ И АЛМАЗОВ

Природные алмазы существенно различаются по морфологии, строению, скульптурам, люминесценции, содержанию примесей, изотопному составу и другим свойствам. Очевидно, что эти различия определяются особенностями их происхождения. Обычно предполагалось, что алмазы механически захва-

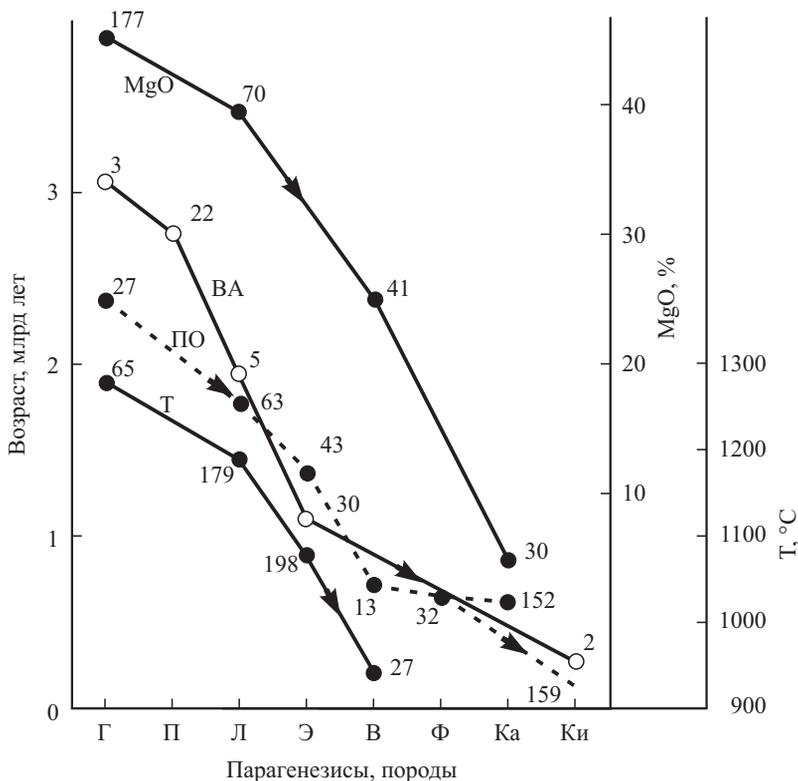


Рис. 1. Средние изотопные возрасты мантийных пород из ксенолитов в кимберлитах (линия ПО), включений в алмазах (линия ВА), средняя температура образования мантийных ксенолитов при 5 ГПа (линия Т) и среднее содержание MgO в породах (линия MgO).

Г—В — парагенезисы включений в алмазах: Г — гарцбургитовый, П — перидотитовый нерасчлененный, Л — лерцолитовый, Э — эклогитовый, В — верлитовый и вебстеритовый; Ф — флюопитсодержащие породы, Ка — карбонатиты, Ки — кимберлиты. Числа у точек — количество определений (Шкоджинский, 2015).

Fig. 1. Average isotope ages of mantle rocks from xenoliths in kimberlites (line ПО), inclusions in diamonds (line ВА), average temperature of formation of mantle xenoliths under 5 GPa pressure (line Т), and average MgO content in rocks (line MgO).

тывались кимберлитовыми магмами из архейской мантии (гипотеза ксеногенного происхождения; Boyd, Gurney, 1986). На рис. 1 обобщен опубликованный материал по составу, возрасту и температурам формирования мантийных ксенолитов и включений в алмазах. Рисунок показывает, что изотопный возраст включений в алмазах (линия ВА) составляет в среднем 3.1 млрд лет для гарцбургитового парагенезиса, 1.75 млрд лет для лерцолитового, 1.1 млрд лет для эклогитового и 0.3 млрд лет для кимберлитового (карбонатсодержащего). Из этих данных следует, что большинство (около 60 %) включений моложе 2.5 млрд лет и, следовательно, являются постархейскими. Поэтому нет оснований предполагать захват алмаза кимберлитовыми магмами из архейской мантии.

В связи с поздним образованием многих алмазов, присутствием в них флюидных включений и изменением состава захватываемых включений в процессе кристаллизации возникло предположение о метасоматическом образовании алмазов под влиянием подъема флюидных потоков (Zhang, Fedortchouk, 2012; Spetsius et al., 2012). С позиций физической химии такие потоки в высокотемпературной мантии существовать не могут, так как по экспери-

ментальным данным (Mysen, Voetcher, 1975) в случае появления флюидной фазы породы расплавятся и флюид полностью растворится в расплаве. Кроме того, из-за высоких температур и давлений в мантии не могут существовать открытые трещины и породы, необходимые для движения флюидов.

На основании экспериментов по синтезу алмазов и состава содержащихся в них включений высказываются предположения о кристаллизации алмазов в сульфидно-силикатных расплавах (Bulanova, 1995), во флюидах системы C—O—H (Haggerty, 1986), в карбонатных породах, погруженных в мантию в зонах субдукции (Aulbach et al., 2012). Но в экспериментах время кристаллизации алмазов составляет часы, а в природе они образуются в течение миллионов или даже миллиардов лет. Поэтому трудности с синтезом алмазов в очень вязких силикатных расплавах могут быть связаны с кинетическими причинами и не являются аргументами в пользу кристаллизации алмазов в несиликатных системах.

Изучение флюидных включений в алмазах обычно показывает низкие температуры и давления. При P — T условиях, характерных для мантии, большинство флюидных включений должно раствориться в силикатных расплавах или в кристаллической матрице. Поэтому присутствие флюидных включений в алмазах не доказывает существование флюидной фазы при алмазообразовании. Для зон субдукции не характерны карбонатиты, кимберлиты и алмазы. В связи с этим нет оснований предполагать связь процессов алмазообразования с этими зонами.

В гипотезах образования алмазов проблемы происхождения геосфер и планеты Земля обычно полностью игнорируются. Между тем, именно здесь находится ключ для решения генетических вопросов алмазообразования. Установлено, что тепловыделение при аккреции Земли составляло 9000 кал/г (Ringwood, 1979). Даже если формирование протопланеты происходило в течение менее 10 млн лет (Рузмайкина, 1991), такое большое тепловыделение должно было привести к горячему образованию Земли.

О горячей аккреции и существовании магматического океана на Земле свидетельствуют уменьшение изотопного возраста (линия ПО на рис. 1) и температуры кристаллизации (линия T) различных пород из мантийных ксенолитов в кимберлитах, полностью соответствующие последовательности их образования при фракционировании. Уменьшение содержания MgO (линия MgO) от гарцбургитов к эклогитам (в среднем от 45 до 25 %) подтверждает образование пород из мантийных ксенолитов в результате магматического фракционирования. На эти процессы указывают тренды фракционирования в раннедокембрийских кристаллических комплексах и другие данные (Шкодзинский, 2015, 2018).

Резкая химическая неравновесность мантийных пород с металлическим железом и присутствие на поверхности Земли H_2O и CO_2 , а не H_2 и CO (Ringwood, 1979), свидетельствуют о том, что силикатные и железные частицы протопланетного диска никогда не были перемешаны в земных недрах и выпадали раздельно. Иными словами, аккреция была гетерогенной. Ядро образовалось раньше мантии под влиянием магнитных сил, многократно превышавших гравитационные (Шкодзинский, 2018). Вследствие быстрой аккреции ядро изначально имело более высокую температуру по сравнению с мантией (на тысячи градусов) и подогревало ее в ходе геологической истории. Это стало причиной мантийной конвекции и механизма тектоники плит на Земле.

Уменьшение с течением времени во включениях в алмазах роли ранних минералов ультраосновных магм (магнезиальных оливина и ромбического

пироксена, характерных для гарцбургитового парагенезиса) и возрастание роли минералов остаточных расплавов (клинопироксена и карбонатов, типичных для эклогитового и кимберлитового парагенезисов) (рис. 1) указывают, что алмазы кристаллизовались во фракционировавших ультраосновных магмах. Огромный временной интервал образования (более 2.8 млрд лет), охватывающий большую часть геологической истории, и однонаправленность эволюции состава включений в алмазах свидетельствуют, что фракционирование происходило не во множестве разновозрастных магматических очагов, а в едином длительно эволюционировавшем очаге. Таким очагом мог быть только глобальный магматический океан.

Положение точек кимберлитов и карбонатитов в конце последовательностей фракционирования на линиях ПО и ВА (рис. 1) указывает, что кимберлитовые и карбонатитовые магмы образовались на поздней стадии фракционирования придонного ультраосновного слоя магматического океана в результате накопления в остаточных расплавах углекислоты, воды и других расплавофильных химических компонентов, что согласуется с экспериментальными данными (Wyllie, Huang, 1975). Этот вывод подтверждается положением полей состава дунитовых, гарцбургитовых, лерцолитовых, вебстеритовых и эклогитовых ксенолитов на едином тренде (рис. 2) и ответвлением от него

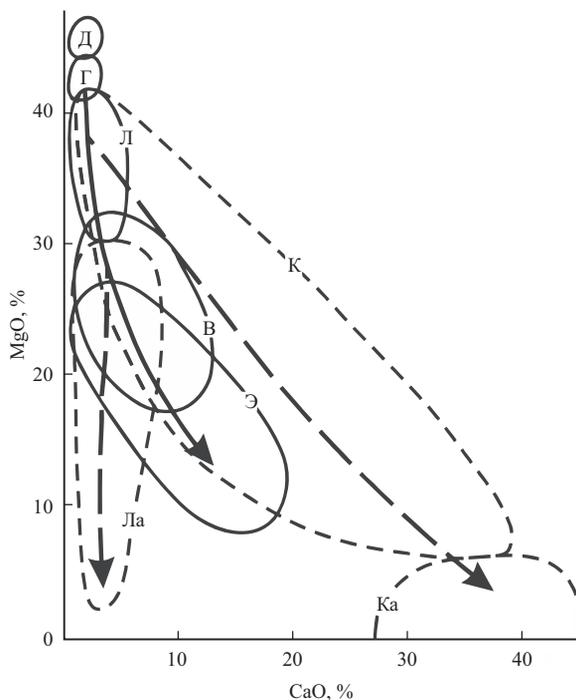


Рис. 2. Соотношение MgO–CaO в мантийных породах. Оконтуры поля составов ксенолитов в кимберлитах (В — вебстеритовых, Г — гарцбургитовых, Д — дунитовых, Л — лерцолитовых, Э — эклогитовых) и поля составов магматических пород (К — кимберлитов, Ка — карбонатитов, Ла — лампроитов). Сплошными стрелками показана эволюция состава кумулатов, пунктирными — остаточных расплавов (Шкодзинский, 2015).

Fig. 2. MgO–CaO ratio in mantle rocks. Lines outline fields of compositions of xenoliths in kimberlites (B — websterite, Г — harzburgite, Д — dunite, Л — lherzolite, Э — eclogite) and fields of magmatic rocks (K — kimberlites, Ka — carbonatites, La — lamproites). Continuous and dashed arrows show the evolution of cumulate and residual melt composition respectively (Shkodzinskiy, 2015).

полей и трендов лампроитов, кимберлитов и карбонатитов. Следовательно, мантийные ксенолиты в кимберлитах являются кумулатами ультраосновных магм, возникшими при образовании кимберлитовых остаточных расплавов. Это объясняет массовое распространение таких ксенолитов в кимберлитах и присутствие в них алмазов. Отсутствие алмазоносных кимберлитов в океанических областях (правило Клиффорда) обусловлено раздвижением продуктов фракционирования перидотитового слоя, родоначального для кимберлитовых расплавов, мантийными плюмами при образовании этих областей. Затвердевание кимберлитовых расплавов на поздних стадиях подъема под влиянием декомпрессионного выделения из них большого количества летучих компонентов приводило к взрыву верхних частей кимберлитовых колонн под влиянием избыточного давления газовой фазы, законсервированной затвердеванием. Расчеты показали (Шкодзинский, 2015), что мощность этих взрывов была в тысячи раз больше атомных. Это объясняет формирование кимберлитовыми магмами трубок взрыва и их отсутствие на земной поверхности.

ЭВОЛЮЦИЯ ПРОЦЕССОВ АЛМАЗООБРАЗОВАНИЯ

Из рассмотренной модели формирования кимберлитовых магм следует, что алмаз должен был кристаллизоваться в результате накопления углерода в остаточных расплавах. Он начал кристаллизоваться в ультраосновных расплавах, что объясняет присутствие в нем включений перидотитового парагезиса и наиболее древний возраст таких включений (до 3 и более миллиардов лет), резко превосходящий возраст вмещающих кимберлитов (обычно сотни миллионов лет). С этим согласуется низкое содержание алмазов в кимберлитах (обычно меньше 1 г/т); если бы алмазы возникали путем восстановления углекислоты (Haggerty, 1986), их содержание было бы в сотни раз выше вследствие присутствия большого количества карбонатов в кимберлитах.

Ультраосновные расплавы имеют небольшую вязкость. В соответствии с формулой Эйнштейна—Стокса коэффициент диффузии прямо пропорционален температуре и обратно пропорционален вязкости среды. Поэтому в ультраосновных расплавах скорость диффузии углерода была относительно большой. В связи с этим атомы углерода успевали достичь торцов слоев роста на кристаллах алмаза и присоединялись к ним, так как здесь обнажалось больше ковалентных связей, чем на плоскости слоев (Хайдаров и др., 1986). Поэтому путем послыонного (тангенциального) роста формировались идеальные остросеребряные плоскогранные октаэдры с зеркально гладкими гранями. Это согласуется с исключительно октаэдрической огранкой кристаллов алмазов, встречающихся в наиболее ранних перидотитовых ксенолитах (Бескрованов, 2000; Аргунов, 2005). Небольшое содержание в магме расплавофильных компонентов обусловило незначительное количество примесей в алмазах, прозрачность и высокое качество большинства октаэдров. Минимальное содержание примесей является причиной яркого синего или сиреневого цвета их фотолюминесценции.

На ранних стадиях кристаллизация самого нижнего перидотитового слоя магматического океана происходила очень медленно, так как он был перекрыт еще горячими верхними слоями. Формировавшаяся в ходе затвердевания океана литосфера при кристаллизации октаэдров алмаза имела мощность до 10 км, ниже располагались магмы, в которых содержание твердых фаз уменьшалось с глубиной. Поэтому самые ранние октаэдрические алмазы росли

очень долго (более 1 млрд лет). Подобная длительность кристаллизации объясняет происхождение изредка встречающихся в кимберлитах алмазов-гигантов весом сотни карат и октаэдрическую огранку подавляющего большинства из них (93—94 %; Аргунов, 2005). Низкая концентрация в остаточных магмах расплавофильных компонентов является причиной отсутствия среди алмазов-гигантов особо ценных безазотных разновидностей.

И из экспериментальных, и из геологических данных следует, что затвердевание нижнего перидотитового слоя в магматическом океане должно было сопровождаться увеличением содержания кремнекислоты в остаточном расплаве от 25 до 40—45 мас. % при формировании кимберлитовых расплавов и до 70 мас. % при возникновении самых поздних включений в алмазах (Zedgenizov et al., 2009). За счет этого динамическая вязкость расплава увеличилась на 6—7 порядков, а коэффициент диффузии углерода уменьшился в миллионы раз. Снижение коэффициента диффузии замедляло движение атомов углерода к формирующимся кристаллам алмаза, что приводило к сильному возрастанию степени пересыщения углеродом остаточных расплавов.

Накопление в остаточных магмах расплавофильных компонентов обусловило возрастание содержания примесей в алмазах в тысячи раз (рис. 3). Это

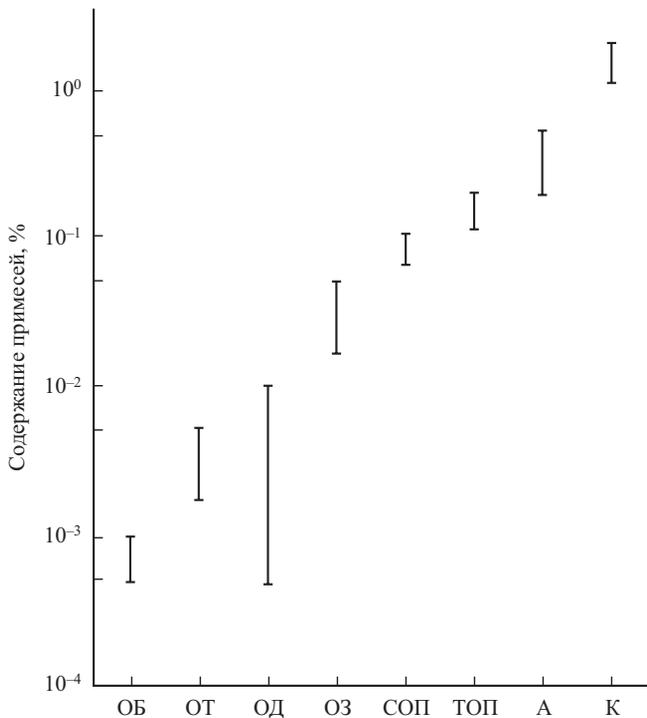


Рис. 3. Суммарное содержание примесей в различных октаэдрах алмаза: ОБ — бесцветных, ОТ — с тригональными слоями роста, ОД — с дитригональными слоями роста, ОЗ — с занозистой скульптурой, СОП — светло-коричневых с полицентрическими гранями, ТОП — темно-коричневых с полицентрическими гранями; а также А — в агрегатах и К — в карбонадо. Построен по данным К. П. Аргунова (2005).

Fig. 3. Summary contents of minor components in different octahedrons of diamond: colorless (ОБ), with trigonal growth layers (ОТ), with ditrigonal growth layers (ОД), with splintery sculpture (ОЗ), light-brown (СОП) and dark-brown (ТОП) with polycentrical faces; the same in aggregates (А) and cabonado (К). Composed after data of Argunov, 2005.

обстоятельство, а также снижение температуры привели к росту количества дефектов в кристаллической структуре алмазов. Поскольку интенсивность рентгенолюминесценции дефектных алмазов уменьшается вследствие ее поглощения дефектами (Аргунов, 2004, 2005), величина этого параметра является показателем состава остаточного расплава и относительного времени кристаллизации каждой разновидности алмаза при затвердевании перидотитового слоя магматического океана. Так как интенсивность рентгенолюминесценции I зависит от величины кристаллов, необходимо использовать удельную интенсивность, I/m , где m — масса кристалла в миллиграммах.

Самый древний возраст плоскогранных октаэдров подтверждается максимальной величиной их удельной интенсивности рентгенолюминесценции, равной, по данным К. П. Аргунова, в среднем 1.8 у. е. По мере кристаллизации придонных перидотитовых частей магматического океана и уменьшения скорости диффузии углерода в остаточном расплаве слои роста на алмазах разрастались все медленнее. Зато возрастание степени пересыщения углеродом приводило к более быстрому образованию новых центров роста. Поэтому площади слоев роста уменьшались и грани октаэдров покрывались сокращавшимися слоями, все в большей степени не достигавшими ребер и вершин (рис. 4, кристаллы 2 и 3). В результате формировались выпуклые грани, плоские в центре и наклонные по краям. На гранях выходы торцов слоев роста создавали параллельную или сноповидную штриховку. Первая возникала при недорастании слоев до ребер, вторая — при более сильном сокращении площади слоев около вершин кристаллов.

В дальнейшем сокращавшиеся слои роста покрывали все грани и возникали слоистые (рис. 4, кристалл 3), полицентрические (кристалл 4), блочные и округло-ступенчатые (кристаллы 4, 7) октаэдры, переходные к ромбододекаэдрам. Эта последовательность образования подтверждается уменьшением величины удельной интенсивности рентгенолюминесценции в среднем от 1.55 в занозисто-сноповидных октаэдрах до 1.25 в полицентрических, 1.02 в блоковых и 0.8 у. е. в округло-ступенчатых по (Аргунов, 2004, 2005).

В изначально бедных кремнекислотой частях перидотитового слоя, вследствие повышенной скорости диффузии углерода в расплаве и высокой скорости роста алмазов, возникала грубая слоистость в их кристаллах (рис. 4, ряд Ка). В богатых кремнекислотой частях перидотитового слоя и на поздних стадиях фракционирования вследствие возрастания содержания кремнекислоты в остаточных расплавах и уменьшения скорости диффузии углерода формировалась тонкая слоистость (ряд Ла).

С началом сокращения площади растущих слоев на месте ребер и вершин октаэдров начинали формироваться ступенчатые грани соответственно ромбододекаэдра и куба и возникали кристаллы соответствующей морфологии (5, 6, 11). Это подтверждается данными И. Сунагавы (Sunagava, 1984) о смене процессов формирования октаэдрических кристаллов ромбододекаэдрическими и кубическими при возрастании степени пересыщения среды углеродом. Позже, путем быстрой кристаллизации во флюидных пузырьках, выделявшихся в небольшом количестве из самых последних остаточных расплавов, формировались алмазные агрегаты (балласы, борт и карбонадо) (рис. 4, фото 12). Вследствие очень высокой скорости диффузии компонентов во флюиде кристаллы алмаза в борте чаще всего имеют октаэдрическую морфологию.

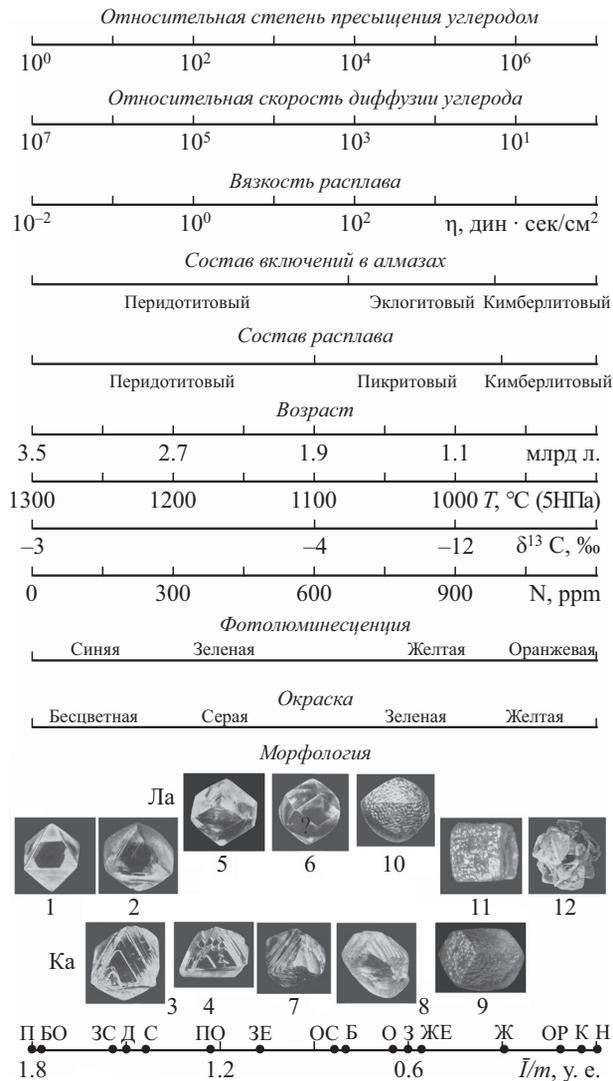


Рис. 4. Соотношение величины удельной интенсивности рентгенолюминесценции (I/m) с морфологией кристаллов алмаза, цветом их фотолюминесценции, содержанием азота, изотопным составом углерода, температурой образования, возрастом алмазов и составом расплава при кристаллизации. Точками показаны средние величины I/m при образовании плоскогранных (П), занозистослоистых (ЗС), полицентрических (ПО), округло-ступенчатых (ОС) и блоковых (Б) октаэдров; ромбододекаэдров (Д) и округлых додекаэдров (О); бесцветных (БО), зеленых (З), желтых (Ж) и коричневых (К) алмазов; с синей (С), зеленой (ЗЕ), желтой (ЖЕ), оранжевой (ОР) фотолюминесценцией и нелюминесцирующих кристаллов (Н). Ряды Ка и Ла — кристаллы в кимберлитах с соответственно карбонатитовой и лампроитовой тенденцией дифференциации, промежуточный ряд — кристаллы, встречающиеся в различных кимберлитах (1 — гладкогранный кристалл, 2 — тонкослоистый кристалл, 3 — грубослоистый кристалл, 4 — полицентрический кристалл, 7 и 8 — округло-ступенчатые октаэдры; 5 — ромбододекаэдр, 6, 9 и 10 — округлые додекаэдры соответственно гладкогранный, с бугорчатой и черепитчатой скульптурами; 11 — куб; 12 — агрегат). Фото кристаллов из монографии Ю. Л. Орлова (1973).

Fig. 4. Correlation between the value of specific X-ray luminescence (I/m) and morphology of diamond crystals, their color and photoluminescence, the nitrogen content, isotopic composition of carbon, formation temperature, their age and composition of the melt while crystallization. Points show average values of I/m while formation of diamonds of different morphology, coloring, etc. Rows Ka and La are crystals in kimberlites with, respectively, carbonatite (Ka) and lamproite (La) trends of differentiation, the intermediate row — crystals occurring in various kimberlites.

По мере увеличения степени пересыщения расплава и возрастания химической активности углерода его атомы начинали кратчайшим путем присоединяться ко всей поверхности кристаллов. В связи с этим образование кубов и додекаэдров происходило в основном путем нормального радиального роста. Такой рост является причиной меньшего проявления во внутренних частях кубов и додекаэдров слоистого строения, чем в большинстве октаэдров, и частого присутствия секториальной неоднородности. При радиальном росте первоначально ступенчатые грани, видимо, становились гладкими вследствие более интенсивного зарастания веществом углублений, поскольку здесь обнажалось больше ковалентных связей. При неравномерном радиальном подтоке углерода на их поверхности возникала бугорчатая скульптура (рис. 4, кристалл 9). Рост бугров в дальнейшем, видимо, приводил к образованию фибриллярных оболочек на кристаллах и богатых включениями внешних кубических зон на алмазах IV разновидности по Ю. Л. Орлову. Позднее образование ромбододекаэдров и особенно кубов подтверждается низкой величиной удельной интенсивности рентгенолюминесценции (в среднем соответственно 1.0 и 0.2 у. е.), отсутствием подобных кристаллов в ксенолитах ранних перидотитов и их присутствием в ксенолитах эклогитов, являющихся поздними кумулатами (рис. 1). Об этом же свидетельствуют: резкое возрастание (в тысячи раз) суммарного содержания примесей в ряду бесцветные—светло-коричневые—темно-коричневые октаэдры—кубы—агрегаты (рис. 3); как правило, отсутствие включений алмазных агрегатов в октаэдрических алмазах; возрастание доли додекаэдров и кубов с увеличением количества кремнекислоты в кимберлитах (Шкодзинский, 2015).

Радиальный рост начинался еще на поздней стадии кристаллизации октаэдров. Атомы углерода при этом в повышенном количестве присоединялись к торцам выхода на гранях слоев роста, так как здесь обнажалось больше ковалентных связей, чем на зеркально гладких гранях. Это приводило к возникновению на их поверхности правильной системы различных выпуклостей и, видимо, к формированию занозистой, черепитчатой скульптуры (рис. 4, кристалл 10). В участках повышенного содержания адсорбированных примесей рост кристаллов тормозился и, вероятно, возникали впадины различной формы.

В формировавшихся путем полицентрического роста блочных кристаллах сокращение сечения растущих блоков вследствие постепенного уменьшения скорости подтока к ним углерода обусловило образование между ними глубоких каверн и повышенную степень последующего дробления поздних кристаллов, особенно додекаэдров. Прямолинейные и извилистые каверны формировались на границе сочленения двух блоков, разветвляющиеся — в промежутках между несколькими блоками. Каверны выклиниваются в центральных частях кристаллов. Поэтому в них не мог циркулировать гипотетический растворитель, особенно если учесть, что кристаллы росли в очень вязком расплаве (рис. 4). Следовательно, каверны не могли формироваться путем растворения, как иногда предполагается (Орлов, 1973).

При остывании перидотитового слоя его горячие части вместе с кристаллизующимся алмазом могли всплывать в область термодинамической неустойчивости этого минерала, где он подвергался процессам растворения. Видимо, с этим связаны очень редко встречающиеся заливообразные углубления в ядрах кристаллов алмаза (Malkovets et al., 2008). Захоронение кристаллов алмаза в кумулатах приводило к прекращению их роста. Об этом свидетель-

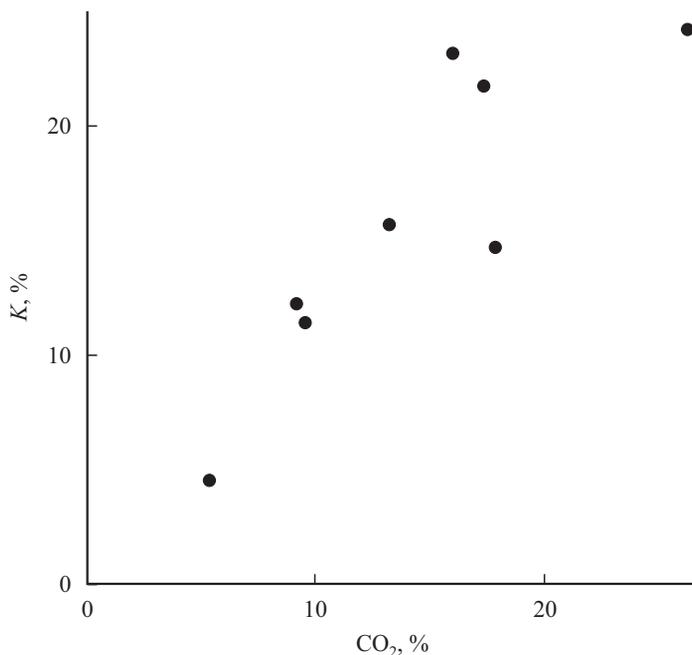


Рис. 5. Зависимость доли резорбированных кристаллов алмаза (K) от содержания углекислоты в кимберлитах. Построена по данным К. П. Аргунова (2005).

Fig. 5. Dependence of the fraction of resorbed diamond crystals (K) on the CO_2 content in kimberlites. Composed after data of Argunov, 2005.

ствуют очень высокие содержания алмазов в некоторых ксенолитах эколлитов.

После вскипания кимберлитовых расплавов под влиянием декомпрессии на заключительной стадии их подъема, соприкосновение пузырьков богатого углекислотой флюида с кристаллами алмаза могло приводить к локальному проявлению процессов растворения этого минерала в результате реакции $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$. При этом на контакте с пузырьками должны были возникать встречающиеся на кристаллах дискообразные впадины. Не случайно доля резорбированных кристаллов растет с увеличением содержания CO_2 в кимберлитах (рис. 5).

При образовании октаэдров недорастание формировавшихся слоев до ребер и вершин приводило к образованию округлых кристаллов (рис. 4, кристаллы 6—10): сначала ступенчатых, затем гладкогранных. Дискуссия об их происхождении путем антискелетного роста или растворения продолжается уже более века. Низкое значение удельной интенсивности рентгенолюминесценции I/m в подобных кристаллах (0.8 у. е. в округло-ступенчатых октаэдрах по сравнению с 1.8 у. е. в плоскогранных; рис. 4) вполне определенно указывает на ростовое происхождение округлых алмазов. Они содержат значительно больше примесей и структурных дефектов, чем плоскогранные. Поэтому округлые алмазы возникали на более поздней стадии кристаллизации перидотитового слоя магматического океана. Этот вывод подтверждается увеличением доли округлых алмазов с ростом содержания кремнекислоты в кимберлитах и с уменьшением величины структурного параметра их расплавов $200(\text{O}—2\text{H})/\text{O}$ (Шкодзинский, 2015). В этой формуле O и H — числа грамм-

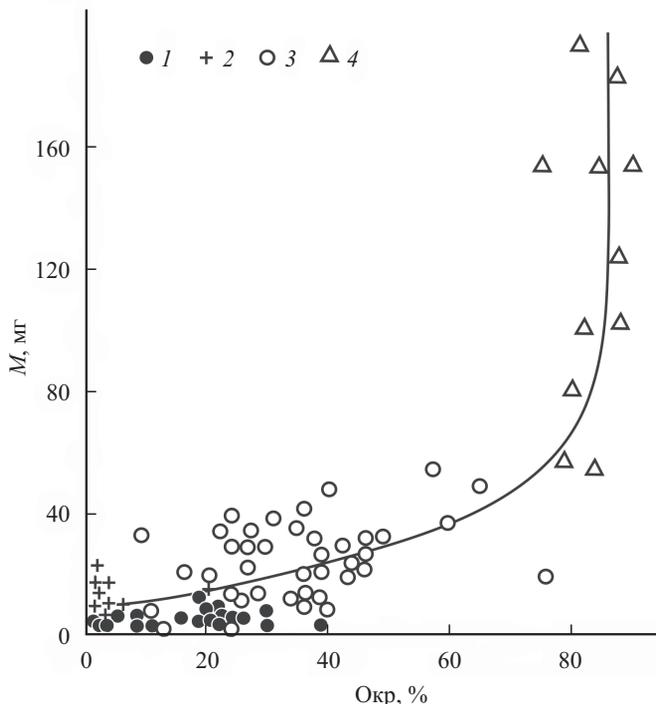


Рис. 6. Зависимость средней массы (M) округлых алмазов от их распространенности в кимберлитовых трубках Якутии (1), в россыпях района кимберлитовых полей (2), в россыпях, удаленных от кимберлитовых трубок Якутии (3), в россыпях Вишерского Урала (4). Построена по данным (Аргунов, 2005; Граханов и др., 2007).

Fig. 6. Dependence of the mean weight of rounded diamond crystals (M) on their fraction in kimberlite pipes of Yakutia (1), in placers at the area of kimberlite fields (2), in placers far distanced from kimberlite pipes of Yakutia (3), in placers of Vishersky district at the Urals (4). Composed after data of Argunov, 2005, and Grakhanov et al., 2007.

атомов соответственно кислорода и сеткообразователей, умноженные на 10^3 (Персиков, 1984). Величина структурного параметра обратно пропорциональна вязкости расплавов, поэтому округлые алмазы чаще всего кристаллизовались в поздних богатых кремнекислотой вязких остаточных расплавах. О ростовом происхождении округлых алмазов свидетельствует в среднем большая масса таких алмазов по сравнению с плоскогранными (рис. 6).

Содержания азота и легкого изотопа углерода широко используются для типизации алмазов и изучения их генезиса. Однако причины вариаций содержаний этих компонентов остаются неясными. Модель формирования алмазов в процессе кристаллизации перидотитового слоя магматического океана объясняет природу этих вариаций. Из экспериментальных данных известно, что летучие компоненты накапливаются в остаточных расплавах при глубинной кристаллизации магм. Азот является типичным летучим компонентом, поэтому его содержание должно постепенно увеличиваться в остаточных расплавах и кристаллизовавшихся в них алмазах по мере кристаллизации магматического океана.

Легкий изотоп углерода так же должен накапливаться в остаточных расплавах и алмазах по сравнению с тяжелым. Обобщение опубликованных данных показало, что среднее содержание азота и доля легкого углерода возрастает

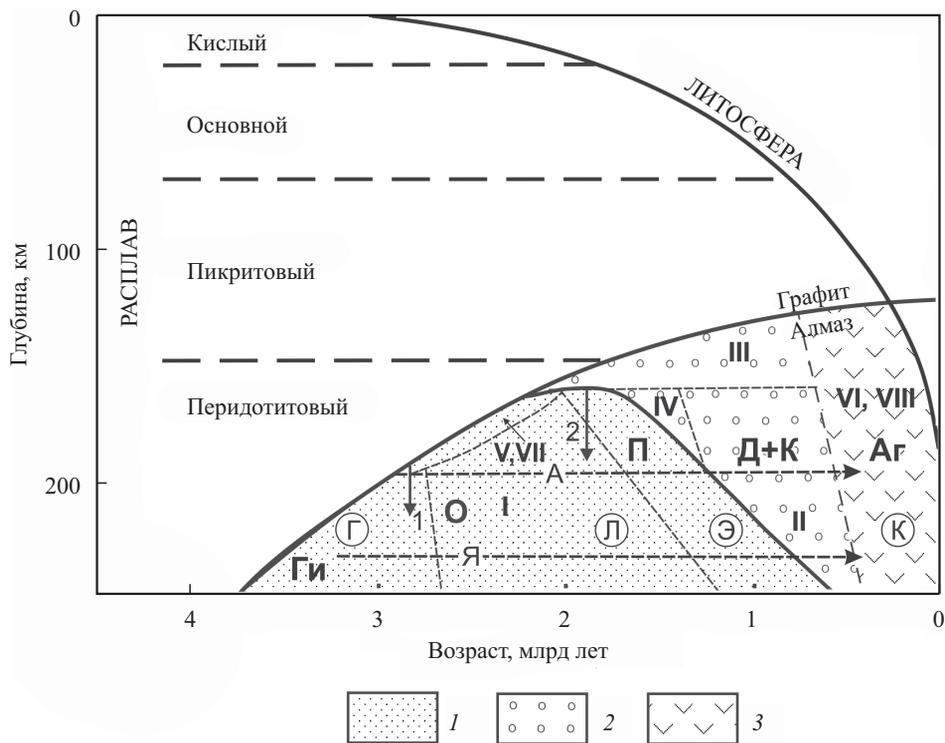


Рис. 7. Схема затвердевания слоистого океана магмы и условия кристаллизации в его перидотитовом слое различных алмазов: октаэдров (О, 1), додекаэдрондов (Д, 2), кубов (К, 2), агрегатов (Аг, 3), переходных разновидностей (П, 1), разновидностей I—VIII по Ю. Л. Орлову (1973), алмазов-гигантов (Ги).

Буквы в кружках показывают средний изотопный возраст включений в алмазах гарцбургитового (Г), кимберлитового (К), лерцолитового (Л) и эклогитового (Э) парагенезисов. Стрелки отражают погружение графитосодержащих октаэдрических (1) и кубических (2) зародышей кристаллов на уровень средних (А) и нижних (Я) частей перидотитового слоя магматического океана.

Fig. 7. Scheme of solidification of the magmatic ocean and crystallization conditions of different types of diamonds in the peridotite layer: octahedrons (O, 1), dodecahedroids (Д, 2), cubes (К, 2), aggregates (Аг, 3), intermediate varieties (П, 1), varieties I—VIII by Orlov (1973), and giant diamonds (Ги).

тают от ранних октаэдров к поздним кубам и агрегатам соответственно в 5 и в 8 раз (Шкодзинский, 2015). Примером накопления азота в остаточных расплавах служит повышение его содержания во внешних зонах кристаллов алмаза из россыпей севера Якутии по сравнению с внутренними зонами (Рагозин, Шацкий, 2003).

Главные закономерности эволюции морфологии алмазов в процессе кристаллизации перидотитового слоя магматического океана отражены на рис. 7. На нем буквами в кружках показаны средние возрасты включений различных минеральных парагенезисов в алмазах (рис. 1). Перидотитовые ксенолиты содержат только октаэдрические алмазы, а эклогитовые — как октаэдрические, так и кубические (Бескрованов, 2000; Аргунов, 2005). Это позволяет оценить примерное положение на рисунке полей образования различных алмазов. Самое большое поле занимают алмазы разновидности I по Ю. Л. Орлову (1973), представленные преимущественно прозрачными октаэдрами и переходными разновидностями к ромбододекаэдрам и кубам.

Присутствие в октаэдрах разновидностей V и VII многочисленных включений графита указывает на их кристаллизацию в относительно малоглубинной части поля октаэдров на его границе с полем устойчивости графита. Остывание магматического океана происходило сверху вниз. Поэтому первые октаэдры зарождались на этой границе. Они могли опускаться в более глубинные части перидотитового слоя (рис. 7, стрелка 1) и продолжать здесь кристаллизоваться. Это объясняет присутствие включений графита в центральных частях октаэдров.

Для светлых кубических кристаллов разновидности III по Ю. Л. Орлову характерно небольшое содержание одиночных атомов азота, чем они резко отличаются от обычно окрашенных кубов разновидности II. Такой состав, видимо, обусловлен кристаллизацией разновидности III в самой верхней части слоя перидотитового расплава, который имел значительную вязкость вследствие повышенного содержания кремнекислоты. Эта часть до зарождения алмазов не подвергалась таким глубоким процессам фракционирования и накопления азота, как более глубокие части перидотитового слоя, где сформировались окрашенные богатые азотом кубические кристаллы разновидности II. Осаждение мелких кубических алмазов (рис. 7, стрелка 2) и нарастание на них октаэдрических зон в глубинных частях перидотитового слоя объясняют присутствие кубических центров в некоторых октаэдрических кристаллах алмаза (Бескрованов, 2000).

Как видно на рис. 7, наибольшее поле устойчивости октаэдрических алмазов разновидности I располагается в глубинных частях перидотитового слоя. Поэтому кимберлитовые магмы, зарождавшиеся в этих частях, должны иметь максимальную долю таких алмазов. Кимберлиты севера Якутии приурочены к утолщенным частям литосферы Сибирской платформы. Это объясняет резкое преобладание в промышленных трубках этого региона октаэдров разновидности I. Уровень Я на рис. 7 отражает глубинность формирования литосферной мантии Якутской провинции.

Разновидности IV, V и VII встречаются в кимберлитах Архангельской провинции, Африки, Канады. Это, видимо, связано с формированием кимберлитовых магм в менее глубинных частях литосферы (уровень А), что согласуется с меньшим содержанием в них октаэдров и алмазов по сравнению с промышленными трубками Якутии. Содержание кубических алмазов в кимберлитовых трубках обычно составляет первые проценты, тогда как доля додекаэдровидов достигает 80—90 % (Аргунов, 2005). Это свидетельствует, что в поле Д+К на рис. 7 наиболее распространены додекаэдровиды, являющиеся, видимо, в основном предельным продуктом эволюции октаэдров. Доля алмазных поликристаллов в трубке Джваненг в Ботсване достигает 55 %, что указывает на условия формирования алмазов, соответствующие полю Аг на рис. 7. Алмазы широко распространенных трубок с очень высоким содержанием додекаэдровидов, видимо, кристаллизовались в верхней части поля Д+К. Их магмы зарождались в наименее глубинных частях литосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Имеющиеся данные по алмазам и кимберлитам хорошо согласуются с моделью глобального магматического океана, сформировавшегося при аккреции Земли. Алмазы кристаллизовались в процессе образования остаточных ким-

берлитовых расплавов при фракционировании придонного перидотитового слоя магматического океана. Увеличение кремнекислотности и вязкости остаточных расплавов приводило к уменьшению скорости диффузии углерода и смене октаэдрической огранки возникавших кристаллов алмаза на ромбододекаэдрическую и кубическую. Тангенциальный рост алмазов сменился на радиальный, что является главной причиной возникновения различных скульптур на гранях алмазов.

Список литературы

- Аргунов К. П.* Дефектные алмазы и их диагностика. Якутск: Изд-во СО РАН, **2004**. 216 с.
- Аргунов К. П.* Алмазы Якутии. Новосибирск: Изд-во СО РАН, **2005**. 402 с.
- Бескрованов В. В.* Онтогенез алмаза. Новосибирск: Наука, **2000**. 264 с.
- Граханов С. А., Шаталов В. И., Штыров В. А., Кычкин В. Р., Сулейманов А. М.* Россыпи алмазов России. Новосибирск: ГЕО, **2007**. 457 с.
- Орлов Ю. Л.* Минералогия алмаза. М.: Наука, **1973**. 223 с.
- Персиков Э. С.* Вязкость магматических расплавов. М.: Наука, **1984**. 160 с.
- Рагозин А. Л., Шацкий В. С.* Минералогия и вопросы генезиса округлых алмазов из россыпей Северо-Востока Сибирской платформы. В кн.: Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века / Ред. Н. Н. Зинчук, А. Д. Савко. Воронеж: Изд-во ВГУ, **2003**. с. 245—249.
- Рузмайкина Т. В.* Протопланетный диск: от идеи захвата к теории происхождения // Физика Земли. **1991**. № 8. С. 5—14.
- Шкодзинский В. С.* Генезис литосферы и алмазов. Модель горячей гетерогенной аккреции Земли. Saarbrücken: Palmarium academic publishing, **2015**. 687 с.
- Шкодзинский В. С.* Глобальная петрология по современным данным о горячей гетерогенной аккреции Земли. Якутск: Изд-во СВФУ, **2018**. 244 с.
- Хайдаров А. А., Гафиттулина К. П., Аргунов К. П.* Ядерно-физические методы контроля качества алмазов. Ташкент: Фан, **1986**. 160 с.

References

- Argunov K. P.* Defective diamonds and their diagnostics. Yakutsk: SB RAS, **2004**. 216 p. (*in Russian*).
- Argunov K. P.* Yakutia diamonds. Novosibirsk: SB RAS, **2005**. 402 p. (*in Russian*).
- Aulbach S., Stachel T., Heanman L. M., Creaser R. A., Seitz H. M., Shirey S. B.* Diamond formation in the slab and mantle wedge: examples from the Slave craton. In: *10th Int. Kimberlite Conf. Extend. Abstr.* **2012**. N 101KC-038.
- Beskrovvanov V. V.* Diamond ontogeny. Novosibirsk: SB RAS, **2000**. 264 p. (*in Russian*).
- Boyd F. R., Gurney J. J.* Diamonds and the African lithosphere. *Science*. **1986**. Vol. 323. P. 472—477.
- Bulanova G. P.* Formation of diamond. *J. Geochem. Explor.* **1995**. Vol. 53. P. 1—23.
- Grahanov S. A., Shatalov V. I., Shtyrov V. A., Kichkin V. R., Suleimanov A. M.* Diamond placers of Russia. Novosibirsk: SB RAS, **2000**. 457 p. (*in Russian*).
- Haidarov A. A., Gafitdulina K. P., Argunov K. P.* Nuclear-physical methods of control diamonds. Tashkent: FAN, **1986**. 160 p. (*in Russian*).
- Haggerty S. E.* Diamond genesis in a multiply constrained model. *Nature*. **1986**. Vol. 320. P. 34—38.
- Malkovets V., Zedgenizov D., Dak A. I., Griffin W., O'Reilly S. Y., Pokhilenko N. P., Mityukhin S. I.* Diamondiferous microxenoliths and xenocrysts from Nyurbinskaya kimberlite pipe, Yakutia. In: *9th Int. Kimberlite Conf. Extend. Abstr.* No 91KC-A- 00224, **2008**.
- Mysen B. O., Boetcher A. L.* Melting of hydrous mantle. I. Phase relations of natural peridotite at high pressure and high temperature with controlled activities of water, carbon dioxide and hydrogen. *J. Petrol.* **1975**. Vol. 16. P. 520—540.
- Orlov Yu. L.* Diamond mineralogy. Moscow: Nauka, **1973**. 223 p. (*in Russian*).

Persikov E. S. Viscosity of magmatic melts. Moscow: Nauka, **1984**. 160 p. (in Russian).

Ragosin A. L., Shazkiy V. S. Mineralogy and genesis round diamonds from placers of North-East of the Siberian platform. In: *Problems of deposit prediction, prospecting, and study in start of XXI century*. Ed. N. N. Zinchuk, A. D. Savko. Voroneg: VGU, **2003**. P. 245—249 (in Russian).

Ringwood A. E. Origin of the Earth and Moon. New York, Heidelberg, Berlin: Springer—Verlag. **1979**. 294 p.

Rusmaikina T. V. Protoplanetary disk — from idea of capture to theory of genesis. *Physics of the Earth*. **1991**. N 8. P. 5—14 (in Russian).

Shkodzinskiy V. S. Genesis of lithosphere and diamonds. Model of hot heterogenous accretion of the Earth. Saarbrücken: Palmarium academic publishing, **2015**. 687 p. (in Russian).

Shkodzinskiy V. S. Global petrology according to modern data on hot heterogenous accretion of the Earth. Yakutsk: Publisher SVFU, **2018**. 244 p. (in Russian).

Spetsius Z. V., Kovalchuck O. E., Bogush I. N. Properties of diamonds in xenoliths from kimberlites of Yakutia: implication to their origin and exploration. In: *10th Int. Kimberlite Conf. Extend. Abstr.* **2012**. N 101KC-51.

Sunagava I. Materials science of the Earth's interior. Tokio, **1984**. 654 p.

Wyllie P. J., Huang W. L. Carbonation and melting reactions in the system CaO—MgO—SiO₂—CO₂ at mantle pressure with geophysical and petrological applications. *Contr. Miner. Petrol.* **1976**. Vol. 54. N 2. P. 79—107.

Zedgenisov D. A., Araujo D., Ragozin A. L., et al. Carbonatite to hydrous silic growth medium of diamonds from International kimberlite pipe (Yakutia). In: *9th International Kimberlite Conference. Extended Abstract.* **2009**. N 91KCA00108.

Zhang Z., Fedortchouk Y. Mantle-derived morphologies of diamond: records diamond-destroyng mantle metasomatism. In: *10th Int. Kimberlite Conf. Extend. Abstr.* **2012**. N 101KC-095.

Поступила в редакцию
8 февраля 2019 г.