



## ПРОИСХОЖДЕНИЕ КРУПНЫХ АЛМАЗОВ В КИМБЕРЛИТАХ

В. С. Шкодзинский

Институт геологии алмазов и благородных металлов СО РАН, Якутск

shkodzinskiy@diamond.ysn.ru

Получены доказательства существования и фракционирования на Земле глобального магматического океана, позволяющие выделить два этапа образования крупных алмазов. Алмазы-гиганты возникали на раннем этапе кристаллизации и фракционирования придонного перидотитового слоя магматического океана, который в это время был перекрыт еще горячими верхними слоями, поэтому остывал и кристаллизовался очень медленно и длительно. Ультрамафит-мафитовый состав этого слоя и низкая вязкость слагающих его магм обусловили октаэдрическую форму алмазов-гигантов. Кристаллизовавшиеся позже ромбододекаэдрические алмазы имеют повышенные размеры за счет процессов роста их на ранних октаэдрических кристаллах.

**Ключевые слова:** генезис алмазов, алмазы-гиганты, магматический океан, горячая аккреция.

## ORIGIN OF LARGE DIAMONDS IN KIMBERLITE

V. S. Shkodzinskiy

Institute of Geology of Diamonds and Noble Metals SB RAS, Yakutsk

The evidence of the existence and fractionation of the global magmatic ocean on the Earth allows us to distinguish two stages of the formation of diamonds of increased size. The largest giant diamonds arose at an early stage of crystallization and fractionation of the peridotite layer of the magmatic ocean, since its bottom layer at that time was blocked by still hot upper ones and therefore cooled and crystallized very slowly and long. The mafic composition of this layer and the low viscosity of its magmas caused mainly octahedral cutting of the formed giant diamonds. Later crystallized mainly rhombododecahedral diamonds have increased coarseness due to the formation mainly by the growth of early octahedral crystals.

**Keywords:** diamond genesis, giant diamonds, magmatic ocean, hot accretion.

### Введение

Ценность крупных алмазов, особенно алмазов-гигантов, несоизмерима с сопоставимыми объемами мелких кристаллов, поэтому выяснение их генезиса весьма важно для эффективного прогноза и поиска алмазосодержащих месторождений. Однако до настоящего времени эта проблема не имела убедительного решения и даже обычно не обсуждалась в публикациях. Например, из более чем полутора тысяч расширенных тезисов докладов в материалах четырех международных кимберлитовых конференций, прошедших за последние 20 лет, нет ни одного, посвященного происхождению таких алмазов. Это в значительной степени обусловлено отсутствием обоснованного решения проблемы генезиса кимберлитов и неэффективностью гипотезы холодной гомогенной аккреции Земли, которая в явной или неявной форме обычно используется при рассмотрении природы глубинных геологических процессов. Полученные доказательства образования Земли путем горячей гетерогенной аккреции создают возможность детального анализа генезиса крупных алмазов.

Доказательствами горячего образования Земли являются расчетные данные об импактном разогреве вещества на 34 000 °С при аккреции [8], существование трендов магматического фракционирования в мантийных ксенолитах и раннедокембрийских кристаллических комплексах, уменьшение температуры формирования и изотопного возраста их различных пород в соответствии с последовательностью возникновения

при фракционировании, проекции ранних геотермических градиентов в область очень высокой температуры (до 1000 °С) на земной поверхности и множество других данных [9, 10]. Содержание в мантийных породах хорошо растворимых в металлическом железе сидерофильных элементов [8] и кислорода [14], в сотни — тысячи раз большее, чем в случае химического равновесия их с железом, распространение на Земле воды и углекислоты, а не  $H_2$  и  $CO$  свидетельствуют, что силикатные и железные частицы никогда не были перемешаны в земных недрах и, следовательно, аккреция могла быть только гетерогенной. При этом ядро образовалось раньше мантии в результате быстрого объединения железных частиц под влиянием мощных магнитных сил [10, 13].

### Происхождение кимберлитов и ранних алмазов-гигантов

При таком формировании Земли после завершения аккреции на ней существовал слоистый магматический океан с максимальной глубиной около 250 км [9]. Длительное остывание и кристаллизация его верхнего кислого и глубинных базит-гипербазитовых слоев привели к образованию соответственно кислой кристаллической коры и литосферы древних платформ. Всплытие остаточных расплавов из этих слоев обусловило формирование сначала различных гранитоидов и кислых вулканитов, затем средних и основных

**Для цитирования:** Шкодзинский В. С. Происхождение крупных алмазов в кимберлитах // Вестник геонаук. 2021. № 1(313). С. 30—34. DOI: 10.19110/geov.2021.1.4.

**For citation:** Shkodzinskiy V. S. Origin of large diamonds in kimberlite. Vestnik of Geosciences, 2021, 1(313), pp. 30—34, doi: 10.19110/geov.2021.1.4.



магматических пород различной щелочности и, наконец, щелочно-ультраосновных карбонатитсодержащих магматических серий.

Кимберлиты образовались в результате фракционирования придонного перидотитового слоя. Кристаллизация магматического океана сверху вниз привела к формированию кимберлитов в наиболее поздние циклы (их изотопный возраст в среднем составляет 236 миллионов лет [9, 12]). Раздвижение руденальной для кимберлитов нижних частей континентальной литосферы поднимавшимися мантийными плюмами при формировании океанических областей объясняет отсутствие кимберлитов в этих и складчатых областях (правило Клиффорда). Широко распространенные в кимберлитах мантийные ксенолиты различного состава являются кумулатами фракционировавшихся перидотитовых магм.

Алмаз кристаллизовался в результате накопления углерода в остаточном расплаве придонного перидотитового слоя магматического океана, поскольку этот компонент почти не входил в состав формировавшихся порообразующих минералов. Первые кристаллы алмаза образовались около 3.5 миллиардов лет назад еще при гарцбургитовом составе расплава, что объясняет наиболее древний изотопный возраст включений в них гарцбургитового парагенезиса [10]. В дальнейшем состав остаточного расплава и включений эволюционировал до лерцолитового, пироксенитового, эклогитового и, наконец, кимберлитового (рис. 1). Наиболее низкая вязкость перидотитового расплава (десятые доли пуаз [4, 7]) обусловила большую скорость диффузии углерода в нем. Поэтому большинство его атомов успело достигнуть торцов слоев роста кристаллов алмаза и присоединялась к ним, поскольку именно здесь обнажалась больше ковалентных связей, чем на гранях. Вследствие этого рост кристаллов был послыйным и возникали идеальные плоскогранные островершинные октаэдры алмазов с зеркально-гладкими гранями [11].

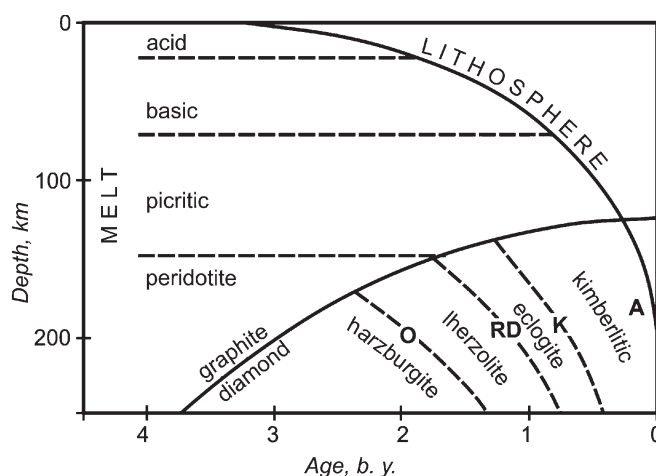
В дальнейшем накопление кремния, алюминия и других многовалентных элементов в остаточном расплаве приводило к увеличению его вязкости в тысячи раз и примерно во столько же раз — к уменьшению скорости диффузии в них углерода. Вследствие этого слои на кристаллах росли все медленнее. Возрастание степени пересыщения расплава углеродом обусловило все более быстрое зарождение новых слоев. В результате этого грани покрывались сокращавшимися по площади слоями и формировались слоистые, полицентрические, блочные и округло-ступенчатые октаэдры. В дальнейшем на месте ребер и вершин октаэдров возникали грани соответственно ромбододекаэдра и куба, формируя, таким образом, кристаллы этих морфологий (рис. 1). Вследствие увеличения степени пересыщения расплава углеродом послыйный рост сменялся радиальным, что привело к образованию разнообразных скульптур на кристаллах и возникновению алмазных агрегатов. Накопление в остаточных расплавах второстепенных компонентов обусловило рост содержания примесей от ранних алмазов к поздним и уменьшение в них величины удельной интенсивности рентгенолюминесценции примерно от 1.8 до 0 условных единиц [9].

При подобном механизме образования наиболее крупные алмазы-гиганты массой в десятки — сотни карат формировались на самой ранней стадии кристалли-

зации перидотитового слоя. Кристаллизация его происходила вначале медленно, поскольку до рубежа в 1.5 миллиарда лет назад он был перекрыт горячими верхними слоями магматического океана (рис. 1). Вследствие еще небольшого пересыщения расплава углеродом и очень медленного снижения температуры новые зародыши кристаллов возникали редко и происходило преимущественно укрупнение за счет разрастания ранее возникших алмазов. Небольшая вязкость расплава обусловила в это время формирование октаэдрических алмазов, что объясняет резкое преобладание среди алмазов-гигантов кристаллов данной морфологии. Например, из 330 изученных К. П. Аргуновым таких алмазов из месторождений Якутии 227 было представлено октаэдрами и только 3 (около 1 % кристаллов) — ромбододекаэдрами [1, 2].

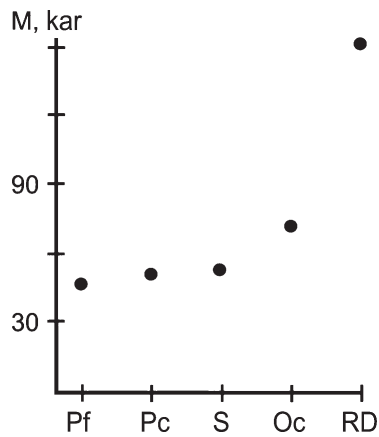
Очевидно, что размер кристаллов-гигантов должен увеличиваться от ранних к поздним. Это подтверждается тем, что в изученных К. П. Аргуновым алмазах-гигантах Якутской кимберлитовой провинции средний вес гладкогранных октаэдров равен 46 каратам, полицентрических октаэдров — 50 каратам, слоистых — 72 каратам, изредка встречающихся среди них ромбододекаэдров — 151 карату (рис. 2). Количественное преобладание среди алмазов-гигантов октаэдров и увеличение их среднего размера от ранних кристаллов к поздним подтверждает их формирование на ранней стадии кристаллизации перидотитового слоя магматического океана.

Среди кимберлитов по составу выделяются две разновидности (рис. 3). В Якутской кимберлитовой провинции они содержат пониженное количество кремнекислоты (23—33 %) и имеют карбонатитовую тенденцию дифференциации. Для африканских кимберлитов характерно более высокое среднее содержание кремнекислоты, достигающее в трубке Премьер 46.78 %, и лампроитовая тенденция фракционирования. Экспериментальными исследованиями установлено, что скорость образования зародышей алмазов в вязкой среде в несколько раз ниже, чем в маловязкой.



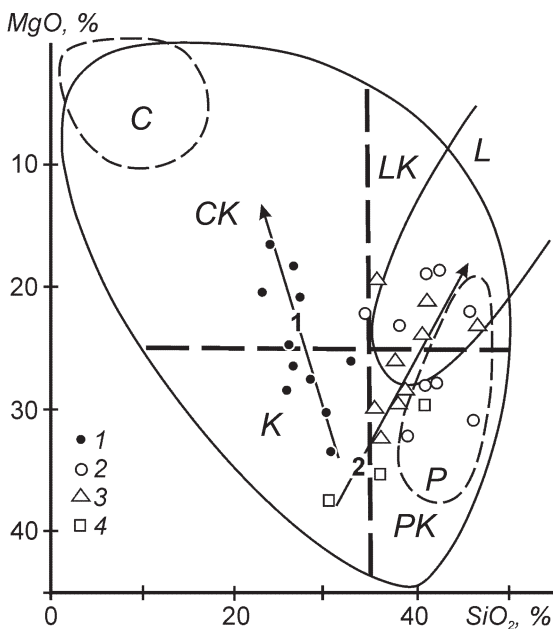
**Рис. 1.** Эволюция магматического океана, состава остаточных расплава его перидотитового слоя и морфологии кристаллизовавшихся в них алмазов от октаэдрической (O) к ромбододекаэдрической (RD), кубической (K) и к агрегатам (A)

**Fig. 1.** The evolution of the magma ocean, the composition of residual melts of its peridotite layer and the morphology of the crystallized diamonds in them from octahedral (O) to rhombododecahedral (RD), cubic (K) and the aggregates (A)



**Рис. 2.** Средняя масса (M) ромбододекаэдров (RD) и октаэдров плоскогранных (Pf), полицентрических (Pc), со штриховкой (S), округло-ступенчатых (Oc) среди алмазов-гигантов из трубок и россыпей Якутии (по данным [1, 2])

**Fig. 2.** Average weight (M) of the rhombic-dodecahedron (RD) and plane-octahedra (Pf), polycentric (Pc), with shading (S), rounded-step (Oc) among diamond giants of pipes and placers of Yakutia. Built according to data [1, 2]



**Рис. 3.** Поля составов кимберлитов (K), карбонатитов (C), карбокимберлитов (CK), лампроитов (L), лампрокимберлитов (LK), пикритов (P) и пикрокимберлитов (PK) на диаграмме MgO — SiO<sub>2</sub>. Точки — средний состав трубок Якутии (1), Архангельской провинции (2), Африки (3) и Канады (4). Стрелки — карбонатитовый (1) и кимберлитовый (2) тренды фракционирования (по [9])

**Fig. 3.** Fields of compositions of kimberlites (K), carbonatites (C), carbokimberlites (CK), lamproites (L), lamprokimberlites (LK), picrites (P) and picrokimberlites (PK) on the MgO — SiO<sub>2</sub> diagram. Points — average composition of pipes in Yakutia (1), Arkhangelsk province (2), Africa (3), and Canada (4). Arrows — carbonatite (1) and kimberlite (2) fractionation trends [9]

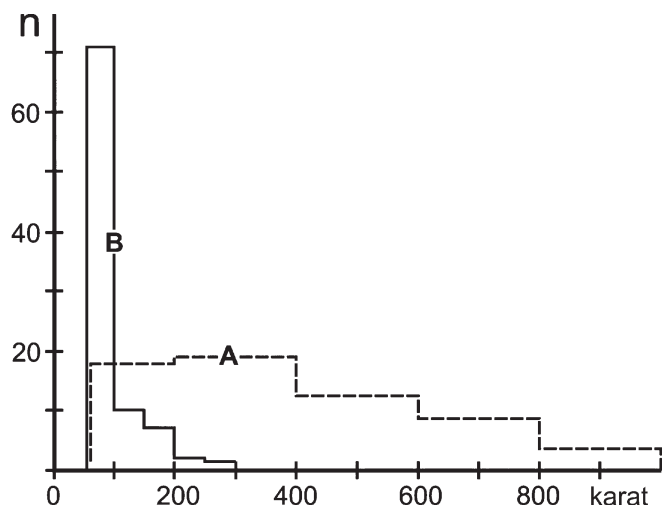
Это указывает на то, что в вязких исходных расплавах богатых кремнекислотой африканских кимберлитов на начальных стадиях алмазообразования возникало меньшее количество зародышей алмазов, чем в бедных кремнекислотой якутских кимберлитах. Дальнейшая кристаллизация возникающих в них алмазов обусло-

вила их повышенную крупность. Это объясняет гораздо больший размер алмазов-гигантов в трубке Премьер (в среднем в несколько раз) по сравнению с якутскими трубками (рис. 4).

### Происхождение поздних крупных алмазов

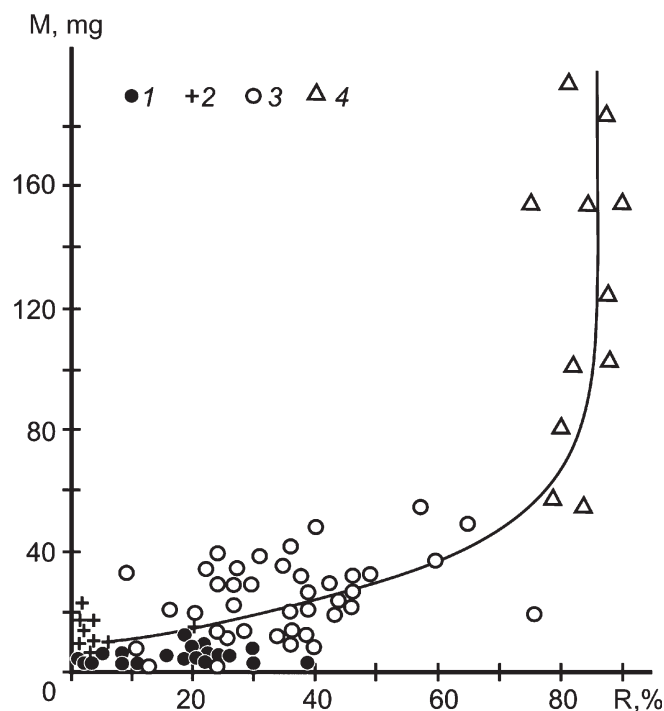
В рассмотренной выше модели поздние алмазы в кимберлитах являются в основном ромбододекаэдрическими и образовались они в значительной мере путем укрупнения октаэдров под влиянием увеличения вязкости остаточных расплавов. Из этого следует, что ромбододекаэдрические кристаллы должны быть в среднем крупнее, чем главная масса октаэдрических алмазов. Это подтверждается статистикой в Якутской кимберлитовой провинции: большим содержанием ромбододекаэдров в крупных фракциях алмазов по сравнению с мелкими в кимберлитах [2, 5], а также большей крупностью ромбододекаэдрических алмазов-гигантов (в среднем 151 карат) по сравнению с октаэдрическими (46—72 карат) (рис. 2).

Вследствие возрастания содержания кремнекислоты и вязкости в большинстве поздних остаточных расплавов магматического океана при фракционировании на гранях ромбододекаэдров происходило образование уменьшающихся по площади центральных частей и они становились выпуклыми, а кристаллы округлыми. Дискуссия о формировании округлых алмазов в кимберлитах путем антискелетного роста или растворения длится уже более ста лет. Полученные результаты указывают на образование алмазов в результате антискелетного роста. Такой генезис подтверждается присутствием в них иногда округлых ростовых зон, увеличением среднего размера алмазов по мере возрастания в них доли округлых кристаллов (рис. 5), прямой корреляцией содержания округлых алмазов с количеством кремнекислоты в кимберлитах (рис. 6) и обратной — с величиной структурного фактора расплава. Величина структурного параметра уменьшается при фракциони-



**Рис. 4.** Гистограмма частоты встречаемости алмазов-гигантов различного размера в кимберлитах Африки (A) и Якутии (B). По данным [1, 2]

**Fig. 4.** Histogram of the frequency of occurrence of giant diamonds of various sizes in the kimberlites of Africa (A) and Yakutia (B). Built according to data [1, 2]



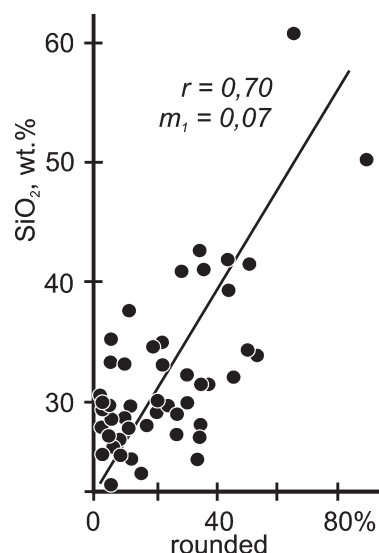
**Рис. 5.** Соотношение доли округлых кристаллов (R) среди алмазов с их средним весом (M): в кимберлитовых трубках (1), в россыпях в районе кимберлитовых полей (2), в россыпях, удаленных от кимберлитовых трубок Якутии (3), в россыпях Вишерского Урала (4). По данным [1, 5]

**Fig. 5.** The ratio of the proportion of rounded crystals (R) among diamonds with their average weight (M) in kimberlite pipes (1), in placers in the area of kimberlite fields (2), in placers remote from the kimberlite pipes of Yakutia (3), in placers of the Vishersky Urals (4). Constructed from data [1, 5]

ровании магм [7], то есть обратно изменению содержания в них кремнекислоты.

При рассматриваемом механизме образования наиболее глубокие кимберлитовые магмы должны содержать повышенное количество химических компонентов ультраосновных пород (магния, хрома, никеля) и пониженное количество литофильных компонентов (кремнекислоты, глинозема, щелочей). Поэтому в возникших из них кимберлитах должны присутствовать повышенное количество октаэдрических алмазов и пониженное количество всех других их морфологических разновидностей. Средний размер алмазов в них должен быть пониженным, а содержание — повышенным. Именно из таких магм сформировалось большинство продуктивных кимберлитов Якутской провинции.

Кимберлиты Якутской провинции по сравнению с зарубежными и архангельскими содержат меньше кремнекислоты (35.21 % в среднем по 30 трубкам [9]) и образуют карбонатитовый тренд фракционирования, на котором не происходило накопление кремнекислоты в поздних остаточных расплавах (рис. 3). Таким образом, эти магмы формировались из расплавов самого нижнего максимально фемического перидотитового слоя магматического океана. Этим объясняется резкое преобладание октаэдрических алмазов в высокопродуктивных якутских кимберлитах (75.4 % — в трубке Интернациональной, 61.1 % — в трубке Мир), их повышенное содержание (8.57 карат на тонну в среднем по трубке Интернациональной [3]) и небольшая крупность кристаллов (обычно это первые миллиграммы).



**Рис. 6.** Соотношение доли округлых кристаллов среди алмазов с содержанием кремнекислоты в кимберлитах:  $r$  — величина коэффициента корреляции,  $m_r$  — ошибка этого коэффициента. По данным [1, 2, 6]

**Fig. 6.** Ratio of the proportion of rounded crystals among diamonds with the content of silicic acid in kimberlites [1, 2, 6]

В Якутской кимберлитовой провинции этот слой имел большую мощность, поскольку в продуктивных полях относительно малоглубинные неалмазоносные кимберлиты являются также низкокремнекислотными и имеют близкий к карбонатитам состав.

Судя по повышенному содержанию кремнекислоты, архангельские (41.16 %  $\text{SiO}_2$  в среднем по 9 трубкам) и африканские (38.94 %  $\text{SiO}_2$  в среднем по 9 трубкам) [9] продуктивные кимберлиты образовались из более вязких частей перидотитового слоя магматического океана, чем кимберлиты Якутской провинции. Это объясняет более низкое содержание в них октаэдрических алмазов (5.1–32.3 % в архангельских и 5–50 % в африканских) и пониженную алмазоносность (чаще всего десятые доли карата на тонну). В этих кимберлитах наблюдается лампроитовый тренд фракционирования с накоплением кремнекислоты в поздних дифференциатах (рис. 3).

В кимберлитах северных частей Якутской провинции в среднем содержится повышенное количество литофильных компонентов, уменьшается содержание алмазов и увеличивается среди них доля ромбододекаэдрических кристаллов. Это указывает на пониженную глубину образования их магм, видимо вследствие эрозии глубинных частей литосферы астеносферными течениями на окраине Сибирской платформы.

### Заключение

Таким образом, в свете полученных доказательств существования и фракционирования на Земле глобального магматического океана выявлены два этапа образования алмазов повышенного размера.

Самые крупные алмазы-гиганты возникали на раннем этапе кристаллизации и фракционирования перидотитового слоя, поскольку глубинные части магматического океана в это время были перекрыты еще горячими верхними, остывали очень медленно и кристаллизовались весьма длительно.



Насыщенный мафический состав этого слоя и низкая вязкость его расплава обусловили преимущественно октаэдрическую огранку алмазов-гигантов.

Кристаллизовавшиеся позже ромбододекаэдрические алмазы имеют повышенную крупность вследствие того, что образовались в значительной мере путем разрастания ранних октаэдрических кристаллов.

## Литература

1. *Аргунов К. П.* Дефектные алмазы и их диагностика. Якутск: Изд. СО РАН, 2004. 216 с.
2. *Аргунов К. П.* Алмазы Якутии. Новосибирск: Изд. СО РАН, 2006. 402 с.
3. *Белов С. В., Лапин А. В., Толстов А. В., Фролов А. А.* Минералогия платформенного магматизма (траппы, карбонаты, кимберлиты). Новосибирск: Изд. СО РАН, 2008. 537 с.
4. *Воларович М. П., Корчемкин П. И.* Связь между вязкостью расплавленных горных пород и кислотностью по Ф. Ю. Левинсон-Лессингу // Доклады АН СССР. 1937. Т. 17. № 8. С. 413—418.
5. *Граханов С. А., Шаталов В. И., Штыров В. А. и др.* Россыпи алмазов России. Новосибирск: ГЕО, 2007. 457 с.
6. *Зинчук Н. Н., Коптиль В. И.* Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. М.: Недра, 2003. 603 с.
7. *Персиков Э. С.* Вязкость магматических расплавов. М.: Наука, 1984. 160 с.
8. *Рингвуд А. Е.* Происхождение Земли и Луны. М.: Недра, 1982. 294 с.
9. *Шкодзинский В. С.* Генезис литосферы и алмазов. Модель горячей гетерогенной аккреции Земли. Saarbrücken: Palmarium academic publishing, 2015. 687 с.
10. *Шкодзинский В. С.* Глобальная петрология по современным данным о горячей гетерогенной аккреции Земли. Якутск: Изд. СВФУ, 2018. 244 с.
11. *Шкодзинский В. С., Бескрованов В. В.* Природа разнообразия алмазов в кимберлитах // Записки РМО. 2019. № 4. С. 100—114.
12. *Шкодзинский В. С., Толстов А. В.* Генезис кимберлитовых магм и алмазов по результатам корреляции их кристалломорфологии с составом вмещающих кимберлитов // Записки РМО. 2009. № 103. С. 1—14.
13. *Harris P. G., Tozer D. C.* Fractionation of iron in the Solar system // Nature. 1967. V. 215. № 5109. P. 1449—1451.
14. *O'Neill H. S.* Oxygen fugacity and siderophile elements in the Earth's mantle: implications for the origin of the Earth // Meteoritics. 1990. V. 25. № 4. P. 395.

## References

1. *Argunov K. P.* *Defectivnye almasy i ih diagnostika* (Defective diamonds and their diagnostics). Yakutsk: SB RAS, 2004, 216 p.
2. *Argunov K. P.* *Almasy Yakutii* (Yakutia diamonds). Novosibirsk: SB RAS, 2006, 402 p.
3. *Belov S. V., Lapin A. V., Tolstov A. V., Frolov A. A.* *Mineralogia platformennogo magmatizma (trappy, karbonatity, kimberlity)* (Mineralogy of platform magmatism: traps, carbonatites, kimberlites). Novosibirsk: SB RAS, 2008, 537 p.
4. *Volarovith M. P., Korchemkin M. I.* *Svjas megu vjaskostju rasplavlennyh gornyh porod i kislotnostju po F.Ju. Levinson-Lessingu* (Relation between viscosity and acidity of melted rocks according to Levinson-Lessing). Doklady AS USSR, 1937, V. 17, No. 8, pp. 413—418.
5. *Grahanov S. A., Shatalov V. I., Shtyrov V. A. et al.* *Rosypyi almasov Rossii* (Diamond placers of Russia). Novosibirsk: GEO, 2007, 457 p.
6. *Sinchuk N. N., Koptil V. I.* *Tipomorfizm almasov Sibirskoj platfortmy* (Typomorphism of diamonds of the Siberian platform). Moscow: Nedra, 2003, 603 p.
7. *Persikov E. C.* *Vjaskocst magmaticeskikh rasplavov* (Viscosity of magmatic melts) Moscow: Nauka, 1984, 160 p.
8. *Ringwood A. T.* *Proishogdenie Semli i Luny* (Genesis of the Earth and Moon). Moscow: Nedra, 1982, 294 p.
9. *Shkodzinskiy V. S.* *Genesis litosfery i almasov. Model gorjachei akkrezii Semli.* (Genesis of lithosphere and diamonds. Model of hot heterogeneous accretion of the Earth). Saarbrücken: Palmarium academic publishing, 2015, 687 p.
10. *Shkodzinskiy V. S.* *Globalnaja petrologija po sovremennym dannym o gorjachei akkrezii Semli* (Global petrology according modern data about hot heterogeneous accretion of the Earth). Yakutsk: SVFU, 2018, 244 p.
11. *Shkodzinskiy V. S., Beskrovanov V. V.* *Priroda raznobrazija almasov v kimberlitah* (Genesis of different diamonds in kimberlites). Proceedings of RMS, 2019, No. 4, pp. 100—114.
12. *Shkodzinskiy V. S., Tolstov A. V.* *Genesis kimberlitovyh magm i almasov po rezultatam korrelyazii ih kristallomorfologii s sostavom vmeshchajushchih kimberlitov* (Genesis of kimberlite magmas and diamonds as a result of analysis of correlation of diamond crystal morphology with kimberlite composition). Proceedings of RMS, 2009, No. 103, pp. 1—14.
13. *Harris P. G., Tozer D. C.* Fractionation of iron in the Solar system. Nature, 1967, V. 215, No. 5109, pp. 1449—1451.
14. *O'Neill H. S.* Oxygen fugacity and siderophile elements in the Earth's mantle: implications for the origin of the Earth. Meteoritics, 1990, V. 25, No. 4, pp. 395.

Поступила в редакцию / Received 12.11.2020