

УДК 552.323.6:553.81.078
DOI: 10.52349/0869-7892_2023_96_37-45

В. С. Шкодзинский (ИГАБМ СО РАН)

ПРИРОДА ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗМЕЩЕНИЯ АЛМАЗОНОСНЫХ КИМБЕРЛИТОВ

Полученные доказательства горячей гетерогенной аккреции Земли свидетельствуют о формировании литосферы древних платформ, кимберлитов и алмазов в результате фракционирования слоистого глобального магматического океана, возникшего вследствие огромного импактного тепловыделения при аккреции. Это объясняет приуроченность алмазоносных кимберлитов только к древним платформам. Всеземное распространение магматического океана обусловило присутствие кимберлитов на всех древних платформах. Их придонное остаточное-магматическое происхождение является причиной небольшого объема кимберлитовых тел и их относительно позднего образования. Алмазы кристаллизовались в результате накопления углерода в остаточных расплавах. Очень низкая вязкость придонного перидотитового слоя магматического океана обусловила небольшую скорость диффузии в них углерода и формирование ранних октаэдрических алмазов путем послонного тангенциального роста. Накопление в остаточных расплавах многовалентных элементов при фракционировании привело к увеличению вязкости расплавов в тысячи раз и к образованию ромбододекаэдров и кубов алмазов в результате радиального роста. Уменьшение скорости диффузии углерода при увеличении вязкости расплавов обусловило сокращение площади образующихся слоев на алмазах и возникновение их округлых кристаллов. Медленное снижение температуры в раннем магматическом океане привело к длительной кристаллизации алмазов-гигантов и к их преимущественно октаэдрической огранке.

Ключевые слова: магматический океан, происхождение кимберлитов и алмазов.

V. S. Shkodzinsky (DPAMGI SB RAS)

THE NATURE OF THE DISTRIBUTION FEATURES OF DIAMOND-BEARING KIMBERLITES

The evidence obtained for hot heterogeneous accretion of the Earth indicates the formation of the lithosphere of ancient platforms, kimberlites, and diamonds as a result of the fractionation of a layered global magma ocean, which arose due to the massive impact heat release during accretion. This explains the confinement of diamond-bearing kimberlites only to ancient platforms. The worldwide distribution of the magma ocean determined the presence of kimberlites on all ancient platforms. Their bottom residual magmatic origin is the reason for the small volume of kimberlite bodies and their relatively late formation. Diamonds crystallized as a result of the accumulation of carbon in residual melts. Extremely low viscosity of the bottom peridotite layer of the magma ocean determined the low rate of carbon diffusion in them and the formation of early octahedral diamonds through layer-by-layer tangential growth. The accumulation of multivalent elements in residual melts during fractionation led to an increase in the viscosity of the melts by thousands of times and to the formation of diamond rhombic dodecahedrons and cubes as a result of radial growth. A decrease in the rate of carbon diffusion with an increase in the viscosity of the melts caused a reduction in the area of the formed layers on diamonds and the appearance of their rounded crystals. A slow decrease in temperature in the early magma ocean led to the long-term crystallization of giant diamonds and their predominantly octahedral cut.

Keywords: magma ocean, origin of kimberlites and diamonds.

Для цитирования: Шкодзинский В. С. Природа особенностей размещения алмазоносных кимберлитов // Региональная геология и металлогения. – 2023. – № 96. – С. 37–45.
DOI: 10.52349/0869-7892_2023_96_37-45

Введение. Выяснение природы особенностей размещения алмазоносных кимберлитов необходимо для их успешного прогноза и поисков. Для решения этой задачи важно знать происхождение кимберлитов и алмазов. Чаще всего предполагается,

что кимберлиты образовались в результате отделения расплавов в слабо подплавленных (примерно на 0,1%) мантийных плюмах [8], предварительно обогащенных литофильными элементами путем привноса их из земного ядра флюидными потоками.

Алмазы кристаллизовались в верхней мантии и захватывались поднимающимися кимберлитовыми магмами.

Однако к настоящему времени установлено большое количество данных, противоречащих этим представлениям. Вязкость слабо подплавленных пород составляет около 10^{22} пуаз. При такой огромной вязкости выплавки за всю историю Земли способны всплыть лишь на доли миллиметра [12], что не способно привести к магнообразованию. Это подтверждается автохтонностью анатектического гранитного материала в огромных полях мигматитов на древних щитах. Ничтожное содержание литофильных элементов в железных метеоритах, являющихся обломками ядер мелких планет, и в ксенолитах земного ядра в траппах [13] указывает на то, что в земном ядре нет литофильных и летучих компонентов, необходимых для возникновения их потоков в мантии. Вследствие огромного давления и температуры в ней нет открытых трещин и пор, необходимых для движения флюидов. Таким образом, до настоящего времени нет убедительной модели образования кимберлитов.

Происхождение Земли и геосфер. Полученные в последние десятилетия многочисленные доказательства горячего образования Земли и фрак-

ционирования на ней глобального магматического океана позволяют объяснить все особенности образования алмазоносных кимберлитов. Как известно, падающие метеориты плавятся и даже частично испаряются за счет импактного тепловыделения. Расчеты показали, что под его влиянием вещество Земли при аккреции должно было разогреться до $34\,000\text{ }^\circ\text{C}$ [16]. Это существование трендов магматического фракционирования в мантийных ксенолитах (линия MgO на рис. 1) и ортогнейсах кристаллической коры, полное соответствие температуры кристаллизации и изотопного возраста их различных по составу пород, последовательность образования при фракционировании (линии T, По и BA на рис. 1), проекции наиболее ранних геотермических градиентов в область очень высокой температуры (до $1000\text{ }^\circ\text{C}$) на земной поверхности и другие данные [12] однозначно свидетельствуют о горячей аккреции Земли.

В 20 000 раз большая фугитивность кислорода в мантийных породах, чем в металлическом железе [18], резкая химическая неравновесность этих пород с железом в отношении содержания хорошо растворимых в нем сидерофильных элементов [7] и другие данные указывают на то, что силикатные и железные частицы никогда не были перемешаны в земных недрах, как говорится в гипотезе гомогенной аккреции, а выпадали раздельно. Большая скорость объединения магнитных частиц [6] свидетельствует о том, что намагниченные Солнцем железные частицы протопланетного диска объединились раньше силикатных. Они быстро образовали земное ядро, на которое выпадали силикатные частицы, и сформировали мантию. Вследствие гигантского импактного тепловыделения на ранней стадии аккреции мантии возник глобальный магматический океан. Представления о существовании такого океана широко распространены [7, 17 и др.]. Однако при рассмотрении генетических проблем обычно без доказательств предполагается нереально большая его глубина (до несколько тысяч километров) и не учитывается его синаккреционная эволюция, хотя ею образован на порядок больший объем мантии (около 2660 км ее мощности), чем постаккреционной эволюцией (240 км) [12]. Это не позволяет правильно оценить роль магматического океана в образовании и эволюции Земли.

Наибольшее давление, зафиксированное в минеральных парагенезисах мантийных ксенолитов, выносимых придонными остаточными кимберлитовыми расплавами магматического океана, достигает 8 гПа, что указывает на максимальную его глубину около 250 км. Такая глубина полностью объясняет все особенности глобальных геологических процессов [13]. Падение крупных тел при аккреции приводило к образованию импактных углублений на дне магматического океана. Заполнявшие их придонные расплавы океана быстро компрессионно затвердевали и формировали крупные тела эклогитов среди ультраосновных кумулатов. В наиболее ранние из них иногда попадали обломки земного ядра. Последующее всплывание

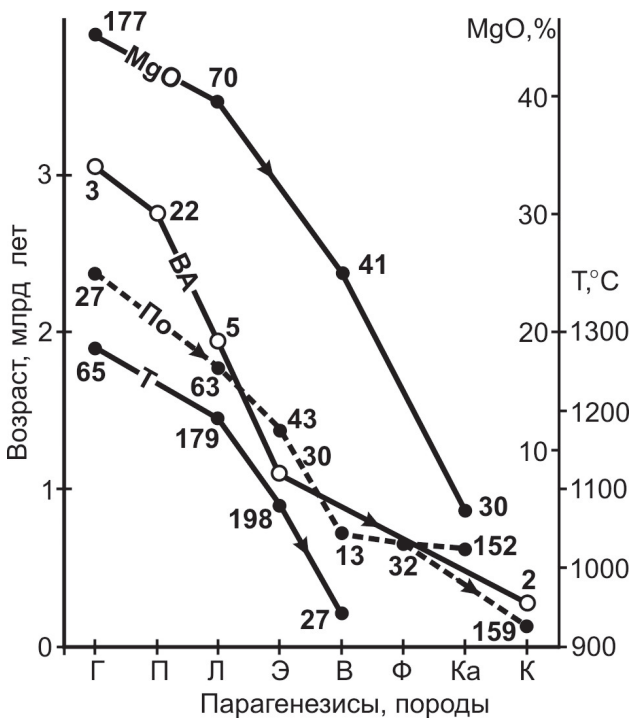


Рис. 1. Средние изотопные возрасты различных мантийных пород из ксенолитов в кимберлитах (линия По), включений в алмазах (линия BA), средняя температура образования при 5 гПа (линия T) и среднее содержание MgO в породах (линия MgO)

Составы включений в алмазах и ксенолитов: Г – гарцбургитовый, П – перидотитовый нерасчлененный, Л – лерцолитовый, Э – эклогитовый, В – верлитовый и вебстеритовый, Ф – флогопитсодержащие породы, Ка – карбонатиты, К – кимберлиты. Числа у точек – количество использованных определений [14]

и декомпрессионное плавление эклогитов обусловило возникновение больших масс траппов с крупными блоками никелистого железа. Придонная часть магматического океана кристаллизовалась и фракционировала под влиянием роста давления формируемых аккрецией его верхних частей. Небольшая еще глубина раннего океана и пониженная сила гравитации на небольшой Земле обусловили относительно низкое давление (менее 0,3 гПа) при его придонном фракционировании и как следствие – формирование кислых остаточных расплавов. Легкие кислые расплавы всплывали, эффективно накапливались в верхней части океана и после завершения аккреции сформировали раннедокембрийские кристаллические комплексы и кислую кору. Это объясняет генезис кислых магм, непонятный с позиций гипотезы холодной аккреции. Предположения об их возникновении путем частичного плавления глубинных основных пород [9] противоречат полному отсутствию кислых обособлений в тысячах ксенолитов эклогитов в кимберлитах и очень большая вязкость слабо подплавленных пород (10^{21} – 10^{22} пуаз), способная привести лишь к незначительному, недостаточному для магнообразования всплыванию выделков на миллиметры за всю историю существования Земли [13].

Постепенное повышение интенсивности аккреции и температуры привели к эволюции состава остаточных расплавов до основного и ультраосновного, к возникновению соответствующих по составу слоев в магматическом океане и обратного геотермического градиента в мантии. Увеличение плотности с глубиной (от 2,3 до 2,8 г/см³) обусловило отсутствие в океане обширной конвекции при остывании и его кристаллизацию сверху вниз. Всплывание остаточных расплавов из различных слоев магматического океана после завершения аккреции объясняет эволюцию магматизма древних платформ от кислого к основному, щелочно-ультраосновному и кимберлитовому (рис. 2). Вследствие горячего образования и последующего длительного остывания геологическая эволюция Земли была направленной, а не циклической, как иногда предполагается [5]. Подтверждением тому служит направленная эволюция состава магматизма на древних платформах.

Генезис кимберлитовых магм и алмазов как ключ к выяснению природы особенностей их распространения. По экспериментальным данным [10], при давлении более 2,5 гПа карбонатитовые расплавы становятся полностью смешиваемыми с силикатными. Поэтому в придонном перидотитовом

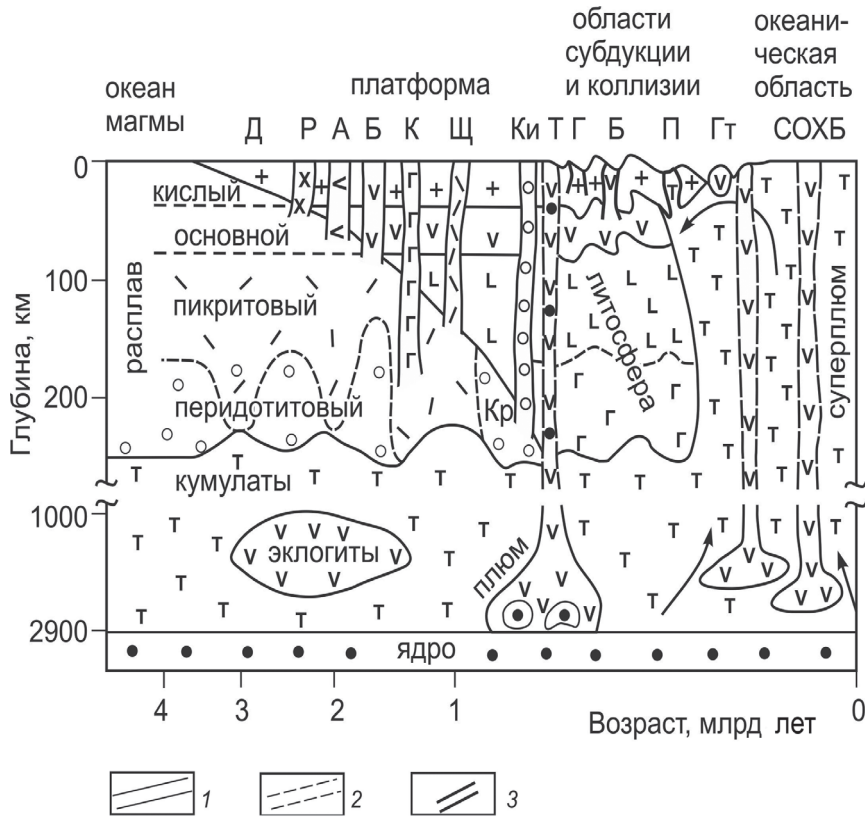


Рис. 2. Схема образования различных геодинамических обстановок и магм
 Д – кислых, Р – рапакиви, А – анортозитовых, Б – основных, К – карбонатитовых, Щ – щелочных, Ки – кимберлитовых, Т – траппов, иногда содержащих ксенолиты ядра, Г – гранитных, П – ультраосновных, Гт – горячих точек, СОХБ – срединно-океанических хребтов. Кр – нижние части кратонов.
 Генетические типы магм: 1 – расплавы магматического океана; 2 – декомпрессионные; 3 – фрикционные

слое магматического океана выше этого давления при процессах остывания и фракционирования должны были формироваться кимберлитовые остаточные расплавы. Такое происхождение полностью объясняет наиболее загадочную особенность кимберлитов – приуроченность их только к древним платформам с мощной древней литосферой, хотя низкая ее современная температура, казалось бы, противоречит возможности зарождения в ней кимберлитовых расплавов. Глубинное положение перидотитового слоя и, поэтому, позднее остывание обусловило наиболее молодой возраст кимберлитов на древних платформах – в среднем 236 млн лет (рис. 1), тогда как, например, средний возраст карбонатитов, формировавшихся преимущественно в вышерасположенном пикритовом слое, равен 677 млн лет. Образование кимберлитов происходило после почти полного затвердевания магматического океана. Последнее привело к появлению возможности подъема через него магм траппов. Это объясняет близость возраста большинства кимберлитов и траппов, хотя исходное вещество последних возникло намного раньше. Раздвижение кимберлитогенерирующей континентальной литосферы растекавшимся веществом мантийных плюмов при образовании океанических областей обусловило отсутствие в них кимберлитов, а также карбонатитов и гранитов.

Образование в результате грандиозных процессов фракционирования глобального магматического океана объясняет огромные масштабы накопления в кимберлитах воды, углекислоты, калия и других расплавофильных компонентов и большое разнообразие составов их и близких к ним пород [5]. Формирование кимберлитовых остаточных расплавов происходило под влиянием двух главных процессов магматического фракционирования: синаккреционного – путем гравитационного осаждения минералов, возникавших в результате роста давления формируемых аккрецией верхних частей магматического океана, и путем постааккреционного остывания и кристаллизации придонного перидотитового слоя. Преимущественно малобарическое осаждение оливина при синаккреционном фракционировании обусловило образование относительно богатых кремнекислотой остаточных расплавов, исходных для лампроитов и близких к ним пород. В случае незначительного участия процессов малобарического фракционирования при осаждении преимущественно граната в перидотитовом слое магматического океана возникали различные кимберлитовые остаточные расплавы. Магматическое фракционирование является единственным реальным процессом глубинной дифференциации. Иногда предполагаемая дифференциация мантии под влиянием гипотетических метасоматических процессов [5] не могла происходить вследствие отсутствия из-за очень высокого давления открытых пор и трещин, необходимых для движения флюида.

Всеземное распространение глобального магматического океана объясняет присутствие кимберлитов на всех изученных древних платформах. Высокое содержание в кимберлитах накапливав-

шихся в остаточных расплавах легких редких земель (до тысячи хондритовых норм) указывает на остаточные расплавы, приобретшие кимберлитовый состав после кристаллизации перидотитового слоя более чем на 99,9%. Поэтому содержание этих расплавов в придонном слое магматического океана было очень небольшим (десятые доли процента). Это объясняет, казалось бы, удивительный очень небольшой объем всех кимберлитовых тел (обычно меньше 1 км³) даже в самых крупных кимберлитовых полях, содержащих многие десятки трубок. Размещение кимберлитов в виде полей и кустов, а не единичных тел, указывает на то, что в основании континентальной литосферы кимберлитовые остаточные расплавы были распределены в виде скоплений.

Подъем крупных объемов магм должен приводить к образованию рифтов вследствие опускания на их место перекрывающих пород. Этим обусловлена связь с рифтами карбонатитосодержащих щелочно-ультраосновных комплексов. В тысячи раз меньший объем кимберлитовых тел по сравнению с этими комплексами обусловил отсутствие отчетливой связи кимберлитовых тел с рифтами и подтверждает образование рифтов в результате подъема больших объемов магм. Вследствие большей линейной скорости вращения верхних частей Земли вокруг своей оси (по сравнению с нижними подъем) глубинных магматических масс сопровождался их давлением на вмещающие породы в западном направлении под влиянием силы Кориолиса, особенно в приэкваториальных низких широтах. Это привело к образованию протяженных субмеридиональных тектонических разломов. По ним должен был преимущественно происходить подъем магм. Это объясняет в 5 раз большую приуроченность на Сибирской платформе кимберлитовых тел к субмеридиональным тектоническим нарушениям по сравнению с субширотными [5].

Подобному тому, как вода диссоциирует с образованием небольшого количества (миллионные доли массы воды) водорода, диссоциация углекислоты и других углеродсодержащих соединений должна была приводить к присутствию в кимберлитовом расплаве небольшого количества химически не связанного углерода. Незначительное его содержание объясняет небольшое количество образовавшихся из него алмазов (обычно меньше грамма на 1 т) даже в самых богатых кимберлитах. В случае иногда предполагаемого гипотетического привноса в мантию углерода погружавшимися в зоны субдукции океаническими осадками или метасоматических процессов количество алмазов в кимберлитах было бы в сотни–тысячи раз большим. Отсутствие очень больших содержаний алмазов в кимберлитах подтверждает отсутствие в мантии флюидных потоков. Формирование алмазов в кимберлитовых магмах объясняет их относительно равномерное распределение в кимберлитовых телах, поскольку при широко распространенном предположении о ксеногенном генезисе они содержались бы преимущественно в краевых

частях трубок. Алмазы начали кристаллизоваться в кимберлитовых расплавах более 3 млрд лет назад (рис. 1) вследствие увеличения концентрации свободного углерода, поскольку он почти не входил в состав кристаллизовавшихся породообразующих минералов, а содержание расплава при кристаллизации магм уменьшалось.

В мантийных плюмах вследствие увеличения количества расплава при процессах декомпрессионного плавления при подъеме концентрация углерода снижалась. Это является причиной обычно отсутствия алмазов в траппах, несмотря на огромное давление на нижнемантийной плюмовой стадии эволюции их вещества [12]. При замедлении подъема в глубинных условиях небольшая часть их магм остывала и кристаллизовалась и в них начинали формироваться алмазы. Однако длительность этих процессов алмазообразования (видимо, тысячи лет) была несопоставимо меньше, чем миллиарды лет в магматическом океане, что объясняет незначительную массу акцессорных алмазов (сотые–десятые доли миллиграмма), иногда встречающихся в щелочных базитах.

Вследствие перидотитового состава ранних расплавов вязкость их была очень небольшой – первые пуазы [12]. Это обусловило большую скорость диффузии в них химических компонентов. Поэтому атомы углерода успевали достигать торцов слоев роста на гранях ранних кристаллов алмаза и присоединялись к ним, поскольку здесь обнажалось наибольшее суммарное количество свободных ковалентных связей (в торце слоя плюс на примыкающей части грани кристалла). Вследствие этого путем послойного тангенциального роста формировались идеальные острые-реберные октаэдры. Отсутствие еще радиального роста обусловило обычное отсутствие скульптур и зеркальную гладкость граней ранних октаэдров. Такое происхождение октаэдров подтверждается существованием обратной корреляции доли их среди алмазов с количеством в кимберлитах кремнекислоты, накапливавшейся при фракционировании (рис. 3), приводившей к резкому возрастанию вязкости остаточных расплавов и к прекращению кристаллизации октаэдров. Судя по возрасту перидотитовых ксенолитов в кимберлитах и включений в алмазах (рис. 1), октаэдры кристаллизовались в среднем до 1 млрд лет назад. Это объясняет их наиболее частое присутствие в ранних кимберлитах. Повышенное давление и количество углерода в богатых магнием придонных перидотитах объясняет обычно большое содержание алмазов (8,57 карата на 1 т в трубке Интернациональная [5]) в образованных в них кимберлитах. Примерно в 2 раза большее максимальное содержание алмазов в кимберлитах Якутии и Канады по сравнению с кимберлитами других регионов, видимо, обусловлено широким распространением в основании их литосферы богатых магнием перидотитов.

В неоднородном магматическом океане наиболее богатые магнием ультраосновные его части вследствие повышенной плотности располага-

лись на дне. Их тугоплавкость и, поэтому, раннее затвердевание привело к образованию протократонов (рис. 2). Повышенное содержание углекислоты в богатых магнием породах и очень большое давление обусловили формирование в протократонах, наиболее богатых алмазами кимберлитов. Пониженное содержание воды в придонных, наиболее мафических расплавах магматического океана привело к пониженной силе взрывов декомпрессионно затвердевших верхних частей магматических колонн, сложенных этими высокоалмазоносными расплавами. Это обусловило часто близкую к дайкам вытянутую форму овальных верхних частей, сформированных при таких взрывах кимберлитовых трубок, и их частую многофазность. Это объясняет повышенную алмазоносность [5] вытянутых многофазных кимберлитовых трубок. Вследствие обратной корреляции доли октаэдрических алмазов с количеством кремнекислоты в кимберлитах (рис. 3) алмазы в типичных протократонах представлены в значительной мере октаэдрами. Очень раннее образование протократонов и литосферы древних платформ полностью объясняет природу правила Клиффорда – присутствие алмазоносных кимберлитов только в регионах с возрастом кристаллического фундамента более 2,5 млрд лет. Наиболее высокое содержание алмазов в кимберлитах, возникших в тугоплавких перидотитах протократонов, объясняет прямую корреляцию

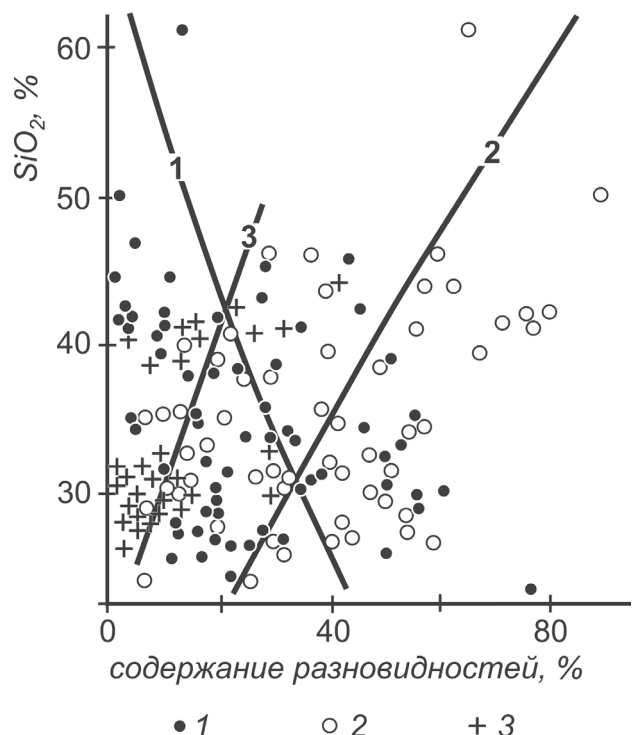


Рис. 3. Соотношение содержания кремнекислоты в кимберлитах и лампроитах с долей октаэдров (1), додекаэдров (2) и с суммой кубов и разновидностей II–VIII, по Ю. Л. Орлову [6] (3) [12]

их количества с хромистостью гранатов и других минералов в кимберлитах.

Вследствие высокой температуры верхних частей раннего магматического океана остывание и кристаллизация его придонного перидотитового слоя сначала происходили очень медленно и длительно. Продолжительный медленный рост не захороненных в кумулатах кристаллов привел к образованию алмазов-гигантов. Такое происхождение объясняет резкое преобладание среди них октаэдров (около 99%) в Якутской кимберлитовой провинции [1]. Относительная редкость алмазов-гигантов указывает, что большинство рано сформировавшихся алмазов захоронялось среди кумулатов и поэтому прекращало свой рост. Это согласуется с присутствием алмазов в мантийных ксенолитах, являющихся преимущественно кумулатами, возникшими при образовании кимберлитовых остаточных расплавов. Такое происхождение объясняет обычно большое содержание этих ксенолитов в трубках, эволюцию их состава во времени (линия По на рис. 1) и содержание в них алмазов. Участие процессов гравитационной отсадки является причиной изредка встречающегося уникально высокого весового содержания алмазов в мантийных ксенолитах и подтверждает их кумулативное происхождение.

Происходившее при магматическом фракционировании возрастание концентрации кремния, алюминия, титана и других многовалентных элементов привело к увеличению вязкости остаточных расплавов в тысячи раз. Примерно во столько же раз уменьшилась скорость диффузии

углерода и увеличилась степень пересыщения им расплава. Последнее обусловило быстрое образование новых центров кристаллизации и появление новых слоев роста. Постепенное уменьшение площади образующихся слоев роста вследствие падения скорости диффузии привело к возникновению выпуклых граней и округлых кристаллов путем антискелетного роста. Такое происхождение подтверждается существованием прямой корреляции их доли с содержанием кремнекислоты в кимберлитах. Их в среднем в десятки раз большая масса по сравнению с плоскогранными алмазами (рис. 4) противоречит иногда предполагаемому образованию путем процессов растворения.

При дальнейшем увеличении вязкости остаточных расплавов послойный тангенциальный рост алмазов сменялся радиальным. Атомы углерода кратчайшим путем присоединялись к кристаллам, в первую очередь к их выпуклым частям, поскольку диффузионный подток углерода к ним был более обширным. Поэтому на месте ребер и вершин октаэдров возникали грани, соответственно, ромбододекаэдра и куба. Существование прямой корреляции доли ромбододекаэдров и кубов среди алмазов с содержанием кремнекислоты в кимберлитах (рис. 3) подтверждает такое их происхождение. Накопление в остаточных расплавах расплавофильных элементов привело к возрастанию содержания примесей в поздних алмазах в сотни–тысячи раз и к образованию их окрашенных разновидностей.

Разобщенность полей распространения алмазоносных кимберлитов и редкометалльных карбонатитов на платформах свидетельствует о том, что в основании литосферы поля распространения их исходных субстратов в плане также разобщены. В залегающих между меланократовыми протократонами богатых кремнекислотой частях магматического океана формировались остаточные расплавы, переходные по составу к лампроитам. Они содержали преимущественно ромбододекаэдрические, кубические, переходные к ним и округлые алмазы. Вследствие более высокого положения в магматическом океане богатые кремнекислотой перидотитовые магмы начинали кристаллизоваться раньше, чем большинство более глубоких, менее кремнекислотных. Это обусловило более длительный рост округлых алмазов и объясняет в среднем в десятки раз больший их размер по сравнению с плоскогранными (рис. 4). Более широкое распространение на большинстве континентов кимберлитов с округлыми и ромбододекаэдрическими алмазами, чем с октаэдрическими, указывает на сложение основания континентальной литосферы чаще всего перидотитами с относительно повышенным содержанием кремнекислоты. Разрушение краевых нижних частей континентальных плит при движении их по мантийным кумулатам обусловило обычно отсутствие высокоалмазоносных кимберлитов с октаэдрическими алмазами на краях континентов и широкое распространение здесь россыпей с округлыми алмазами. Низкое

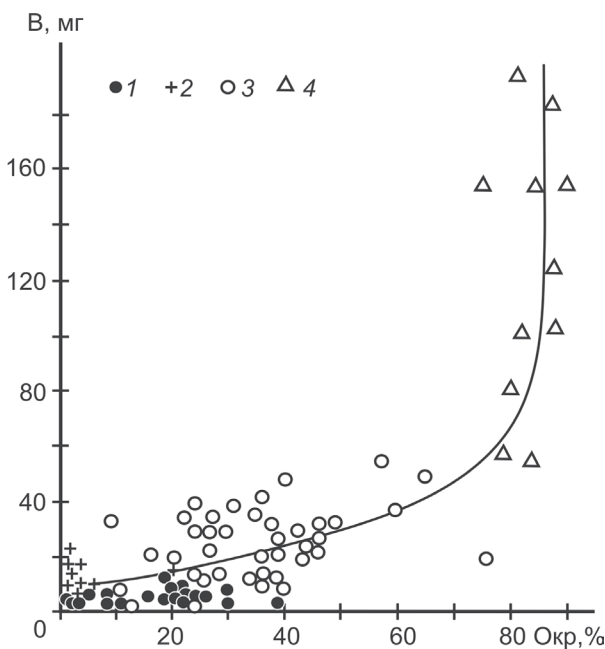


Рис. 4. Соотношение доли округлых кристаллов среди алмазов с их средним весом (В) в кимберлитовых трубках Якутии (1); в россыпях в районе кимберлитовых полей (2); в россыпях, удаленных от кимберлитовых трубок Якутии (3); в россыпях Вишерского Урала (4) [12]

содержание алмазов в мезозойских трубках северных частей Сибирской платформы обусловлено их положением на краю платформы, а не мезозойским возрастом, как часто предполагается [5].

Содержание углекислоты в среднем уменьшается с ростом количества кремнекислоты в магмах. Бедные углекислотой магмы декомпрессионно затвердевали и взрывались на значительно меньшей глубине, чем богатые. Вследствие повышенной вязкости их расплавов выделявшиеся при вскипании летучие компоненты почти не объединялись и оставались относительно равномерно распределенными в затвердевавшем веществе в виде многочисленных микропузырьков. При приповерхностных взрывах это приводило к очень тонкому дроблению, распылению и к рассеиванию затвердевшего вещества и содержащихся в нем алмазов на очень большой площади. Данное явление объясняет огромную протяженность (около 500 км) и незначительную мощность (менее 50 см) слоя карнийских туффзитов с преимущественно округлыми алмазами в приустьевой части р. Лена [2]. Мелкие силикатные частицы часто быстро выветривались и выносились. Это приводило к образованию россыпей с крупными округлыми алмазами, широко распространенных в Юго-Западной Африке и на других континентах. В богатых углекислотой менее вязких кимберлитовых магмах дробление их декомпрессионно затвердивших разностей происходило в трубках на значительной глубине под перекрывающими породами. Поэтому оно было более грубым, что объясняет значительную крупность обломков в брекчиях кимберлитовых трубок. При приповерхностных взрывах алмазосодержащие породы сильно распылялись, и кимберлитовые коренные источники алмазов не возникали или были очень небольшими. Это объясняет безуспешность многочисленных попыток найти кимберлитовые коренные источники крупных россыпных округлых алмазов в Африке, на севере Якутии и в других регионах. Такие россыпи являются автономными и, вопреки многочисленным оптимистическим прогнозам, малоперспективны для поиска кимберлитовых коренных источников их алмазов.

Полученные результаты указывают на то, что нарастание фибриллярных оболочек на октаэдрические кристаллы в алмазах IV разновидности, по Ю. Л. Орлову [6], обусловлено их радиальным ростом на поздней стадии. В алмазах VI разновидности фибриллярное строение имеет весь объем кристаллов. Это указывает на их образование позже кристаллов IV разновидности. Между фибруллами существуют полости, формирование которых обычно связывают с протеканием процессов растворения. Однако циркуляция растворяющего расплава в узких полостях, заканчивающихся в центре кристаллов, практически невероятна. Эти полости формировались в результате возникновения недостатка поступавшего путем диффузии углерода, поскольку промежутки между фибруллами расширяются с удалением от центра кристаллов.

Поздние кимберлитовые остаточные расплавы сформировались при степени кристаллизации перидотитового слоя более чем на 99,9%. При такой высокой степени кристаллизации содержание летучих компонентов в остаточных расплавах достигало десятков процентов. Поэтому они иногда формировали небольшое количество выделений самостоятельной флюидной фазы. Вследствие более низкой вязкости флюида в 1000 раз скорость диффузии углерода в нем была несоизмеримо выше, чем в расплаве. Это обусловило быстрое зарождение множества кристаллов алмаза во флюидных выделениях, их небольшой размер и объясняет образование мелкозернистых алмазных агрегатов (борта, карбонадо) в кимберлитах. Такое происхождение подтверждается существованием прямой корреляции количества алмазных агрегатов с содержанием летучих компонентов в кимберлитах и с величиной их потерь при прокаливании [13]. Преимущественно октаэдрическая форма кристаллов алмаза в агрегатах согласуется с их ростом в маловязком флюиде. Обычно овальная форма алмазных агрегатов, видимо, является унаследованной от формы флюидных пузырьков в расплавах. Позднее образование агрегатов подтверждается иногда встречающимся их нарастанием на кристаллы алмаза [9]. Наличие пустот и самое высокое содержание примесей подтверждают рассматриваемый механизм образования алмазных агрегатов [12]. Вследствие преимущественного формирования в богатых летучими компонентами поздних кимберлитовых остаточных расплавах повышенное количество алмазных агрегатов должно содержаться в богатых кремнекислотой кимберлитах краевых частей древних платформ.

Рассчитанные количественные модели природных магм [12; 13] выявили существование в них малоизвестного и обычно не учитываемого явления – декомпрессионного затвердевания наиболее низкотемпературных магм после вскипания на малоглубинной стадии подъема. На Р-Т диаграмме для кимберлитовых магм (рис. 5) это выражается в уменьшении значений изоконцентрат расплава (20%Pc, 5%Pc и др.), пересекаемых линиями подъема магм. Без учета этого явления трудно понять природу эволюции кимберлитовых магм.

Вследствие остаточно-магматического происхождения эти магмы были относительно низкотемпературными и содержали значительное количество (десятки процентов) летучих компонентов. Это приводило к их вскипанию при подъеме и к затвердеванию расплава (путем остеклования и кристаллизации) вследствие уменьшения в нем концентрации выделявшихся летучих компонентов. Химически активное стекло под влиянием летучих компонентов замещалось низкотемпературными минералами, что объясняет их высокое содержание в кимберлитах. Глубина вскипания и затвердевания уменьшалась с падением содержания труднорастворимой в расплаве углекислоты. Быстрое декомпрессионное затвердева-

ние обусловило консервацию высокого давления выделившихся газов и при дальнейшем подъеме привело к взрывной дезинтеграции верхних частей кимберлитовых колонн и вмещающих пород под влиянием избыточного давления захороненной газовой фазы. Мощность эксплозий в тысячи раз превосходила атомные взрывы за счет значительного объема взрывающегося вещества [12]. Это объясняет формирование кимберлитовыми магмами протяженных трубок взрыва и разнообразных брекчий, отсутствие кимберлитовых лав даже в самых крупных кимберлитовых полях и гравитационной отсадки в трубках высокоплотных алмаза, граната и мантийных ксенолитов. Явление осаждения с образованием богатых алмазами кумулатов можно ожидать в длительно остывавших декомпрессионно не затвердевавших глубинных интрузивных кимберлитах. Это подтверждается изредка присутствием ураганных весовых содержаний алмазов в мантийных ксенолитах, являющихся преимущественно глубинными кумулатами кимберлитовых магм.

Особенности состава демонстрируют существование в кимберлитах карбонатитовой и лампроитовой серий магматического фракционирования. В якутских продуктивных кимберлитах большинство точек среднего состава трубок нахо-

дится около карбонатитового тренда, на котором содержание извести увеличивалось по мере фракционирования. Это согласуется с присутствием в таких трубках карбонатных жил. Точки среднего состава трубок Архангельской провинции, Африки и Канады располагаются около лампроитового тренда, вдоль которого содержание кремнекислоты возрастает [12].

В якутских кимберлитах содержится в среднем на 9% меньше кремнекислоты, чем в кимберлитах других регионов. Эта разница определила главные различия их алмазов. Небольшое содержание кремнекислоты обусловило низкую вязкость кимберлитовых расплавов в Центральной Якутии, что является причиной высокой доли октаэдров среди алмазов. В наиболее продуктивных трубках Мир и Интернациональная она составляет соответственно 61,6 и 52,5%. В трубках Африки эта доля равна в среднем 20,2%, Канады – 40,1%, Австралии – 6%, в россыпях Вишерского Урала – 8% [1]. Характерное для бедных кремнекислотой перидотитов повышенное содержание углерода является причиной примерно в 2 раза больше среднего содержания алмазов в продуктивных трубках Центральной Якутии. Повышенное начальное содержание углерода обусловило образование большего количества зародышей кристаллов алмаза. Это привело к меньшему размеру возникших алмазов, объясняет находки крупных алмазов обычно в малопродуктивных трубках и примерно в 4 раза меньшую среднюю массу алмазов-гигантов якутских трубок по сравнению с африканскими.

Заключение. Таким образом, учет данных о горячей гетерогенной аккреции Земли позволяет объяснить генезис и многочисленные особенности распространения алмазоносных кимберлитов. Приуроченность их к древним платформам обусловлена образованием из остаточных расплавов глобального магматического океана, сформировавшего литосферу древних платформ. Фракционирование и кристаллизация магматического океана на ранней стадии эволюции Земли объясняет природу правила Клиффорда – присутствие алмазоносных кимберлитов только в регионах с возрастом кристаллического основания более 2,5 млрд лет. Главными двигателями ранних глобальных эндогенных геологических процессов были кристаллизация и фракционирование магматического океана, а не гравитационная дифференциация преимущественно твердофазной мантии. Это обусловлено в триллионы раз меньшей вязкостью магматического океана.

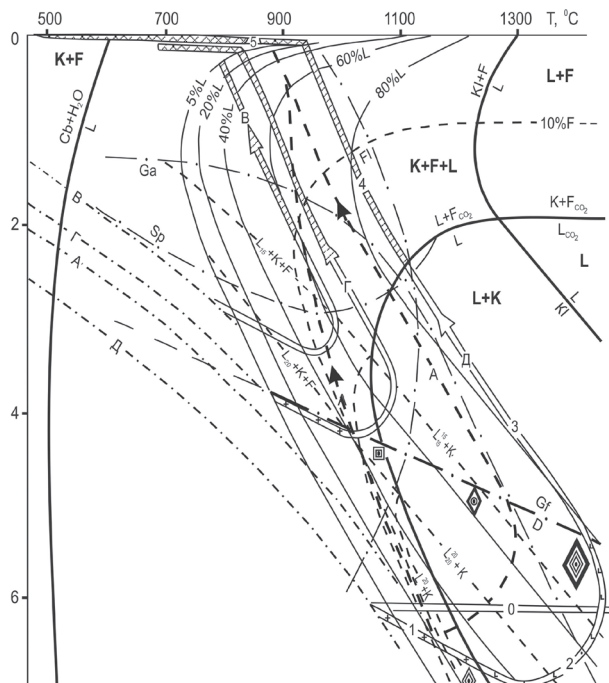


Рис. 5. P-T диаграмма фазового состава и эволюции кимберлитовых магм (линии со стрелками А–Д) с содержанием по 10% H₂O и CO₂

Сб – карбонат, D – алмаз, Ga – гранат, Gf – графит, Sp – шпинель. Ф – флюид, К – твердые фазы кимберлита, Pс2020 – расплав и содержание в нем H₂O (нижний индекс) и CO₂ (верхний). На линиях эволюции: 0 – образование мантии; 1, 2 – этапы интенсивного плавления; 3–5 – этапы соответственно декомпрессионно-фрикционного плавления, декомпрессионного затвердевания и эксплозивной дезинтеграции. Рисунки кристаллов – морфология возникших алмазов [12]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аргунов К. П. Алмазы Якутии. – Новосибирск : Изд-во АН СССР, 2005. – 402 с.
2. Добрецов Н. Л. Введение в глобальную петрологию. – Новосибирск : Наука, 1980. – 240 с.
3. Зинчук Н. Н., Коптиль В. И. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. – М. : Недра, 2003. – 603 с.
4. Изотопно-геохимические свидетельства протолитов алмазоносных пород кокчетавской субдукционно-

коллизонной зоны (Северный Казахстан) / В. С. Шацкий, А. Л. Рагозин, С. Ю. Скузоватов, О. А. Козменко, Э. Ягоуц // Геология и геофизика. – 2021. – № 5. – С. 678–689. – DOI: 10.15372/GiG2020200

5. Минерагеня латформенного магматизма (траппы, карбонатиты, кимберлиты) / С. В. Белов, А. В. Лапин, А. В. Толстов, А. А. Фролов. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2008. – 537 с.

6. Орлов Ю. Л. Минералогия алмазов. – М. : Наука, 1973. – 223 с.

7. Рингвуд А. Е. Происхождение Земли и Луны. – М. : Недра, 1982. – 294 с.

8. Россыпи алмазов России / С. А. Граханов, В. И. Шаталов, В. А. Штыров, В. Р. Кычкин, А. М. Сулейманов. – Новосибирск : ГЕО, 2007. – 240 с.

9. Смелова Г. Б. Генезис агрегатов алмазов из кимберлитовых трубок Якутии. – Якутск : Изд-во ЯНЦ СО РАН, 1994. – 88 с.

10. Состав флюида восстановленной мантии по экспериментальным данным и результатам изучения флюидных включений в алмазах / А. Г. Сокол, А. А. Томиленко, Т. А. Бульба, И. А. Сокол, П. А. Заикин, Н. В. Соболев // Геология и геофизика. – 2020. – № 5–6. – С. 810–825. – DOI: 10.15372/GiG2020103

11. Сурков Н. В., Зинчук Н. Н. Устойчивость глубинных парагенезисов, процессы магнообразования и происхождения кимберлитов // Проблемы алмазной геологии и некоторые пути их решения. – Воронеж : Изд-во ВГУ, 2000. – С. 101–128.

12. Шкодзинский В. С. Генезис литосферы и алмазов. Модель горячей гетерогенной аккреции Земли. – Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2015. – 687 p.

13. Шкодзинский В. С. Петрология литосферы и кимберлитов (модель горячей гетерогенной аккреции Земли). – Якутск : Изд-во СВФУ, 2014. – 452 с.

14. Шкодзинский В. С. Фазовая эволюция магм и петрогенезис. – М. : Наука, 1985. – 232 с.

15. Шмидт О. Ю. Происхождение Земли и планет. – М. : Изд-во АН СССР, 1962. – 132 с.

16. Harris P. G., Tozer D. C. Fractionation of iron in the Solar system // Nature. – 1967. – Vol. 215, no. 5109. – Pp. 1449–1451.

17. Hofmeister A. M. Effect of hadean terrestrial magma ocean on crust and mantle evolution // Journal of Geophysical Research. – 1983. – Vol. B88, no. 6. – Pp. 4963–4983.

18. O'Neil H. S. Oxygen fugacity and siderophile elements in the mantle: implications for the origin of the Earth // Meteoritics. – 1990. – Vol. 25, no. 4. – Pp. 395.

4. Schackii B. S., Ragozin A. L., Skusovатов C. Yu., Kosmenko O. A., Jagoutz E. Iztopno-geokhimicheskie svidelet'stva protolitov almazonosnykh porod kokchetavskoy subduksionno-kollizionnoy zony (Severnyy Kazakhstan) [Izotopno-geochemical evidences of protoliths of rocks of kokchetav zone (Nord Kazakhstan)]. *Geology and Geophysics*, 2021, no. 5, pp. 678–689, DOI: 10.15372/GiG2020200

5. Belov C. V., Lapin C. V., Tolstov A. V., Frolov A. A. Minerageniya latformennogo magmatizma (trappy, karbonatity, kimberlity) [Mineragenia of platform magmatizm (trapps, carbonatites, kimberlites)]. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2008, 537 p.

6. Orlov Yu. L. Mineralogiyaalmazov [Mineralogy of diamonds]. Moscow, Nauka, 1973, 223 p.

7. Ringvud A. E. Proiskhozhdenie Zemli i Luny [Genesis of the Earth and Moon]. Moscow, Nedra, 1982, 294 p.

8. Grakhanov S. A., Shatalov V. I., Shtyrov V. A., Kychkin V. R., Suleymanov A. M. Rossyipialmazov Rossii [Diamond placeris of Russia]. Novosibirsk, GEO, 2007, 240 p.

9. Smelova G. B. Genезis agregatovalmazov iz kimberlitovykh trubok Yakutii [Genesis of diamond agregates from kimberlites of Yakutia]. Yakutsk, Izd-vo YaNTs SO RAN, 1994, 88 p.

10. Sokol A. G., Tomilenko A. A., Bul'ba T. A., Sokol I. A., Zaikin P. A., Sobolev N. V. Sostav flyuida vosstanovlennoy mantii po eksperimental'nym dannym i rezul'tatam izucheniya flyuidnykh vklucheniyy v almazakh [Composition of fluid in restoration mantle on experimental data and results of study of inclusions in diamonds]. *Geology and Geophysics*, 2020, no. 5–6, pp. 810–825, DOI: 10.15372/GiG2020103

11. Surkov N. V., Zinchuk N. N. Ustoychivost' glubinnykh paragenezisov, protsessy magmoobrazovaniya i proiskhozhdenie kimberlitov [Stability of deep paragenezis, processes of magma origin and genesis of kimberlites]. *Problems of diamond geology and theirs solutions*. Voronezh, Izd-vo VGU, 2000, pp. 101–128.

12. Shkodzinskiy V. S. Genезis litosfery ialmazov. Model' goryachey geterogennoy akkretsii Zemli [Genesis of lithosphere and diamonds. Model of hot heterogeneous akkretion of the Earth]. Saarbrücken, Palmarium Academic Publishing, 2015, 687 p.

13. Shkodzinskiy V. S. Petrologiya litosfery i kimberlitov (model' goryachey geterogennoy akkretsii Zemli) [Petrology of lithosphere and kimberlites (model of hot heterogeneous akkretion of the Earth)]. Yakutsk, Izd-vo SVFU, 2014, 452 p.

14. Shkodzinskiy V. S. Fazovaya evolyutsiya magm i petrogenезis [Phase evolution of magmas and petrogenesis]. Moscow, Nauka, 1985, 232 p.

15. Shmidt O. Yu. Proiskhozhdenie Zemli i planet [Genesis of the Earth and planet]. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1962, 132 p.

16. Harris P. G., Tozer D. C. Fractionation of iron in the Solar system. *Nature*, 1967, vol. 215, no. 5109, pp. 1449–1451.

17. Hofmeister A. M. Effect of hadean terrestrial magma ocean on crust and mantle evolution. *Journal of Geophysical Research*, 1983, vol. B88, no. 6, pp. 4963–4983.

18. O'Neil H. S. Oxygen fugacity and siderophile elements in the mantle: implications for the origin of the Earth. *Meteoritics*, 1990, vol. 25, no. 4, pp. 395.

REFERENCES

1. Argunov K. P. Almazы Yakutii [Yakutia diamonds]. Novosibirsk, Izd-vo AN SSSR, 2005, 402 p.

2. Dobretsov N. L. Vvedenie v global'nuyu petrologiyu [Introduction in global petrology]. Novosibirsk, Nauka, 1980, 240 p.

3. Zinchuk N. N., Koptil' V. I. Tipomorfizmalmazov Sibirskoy platformy [Tipomorfism of diamonds of Siberian platform]. Moscow, Nedra, 2003, 603 p.

Шкодзинский Владимир Степанович – доктор геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук (ИГАБМ СО РАН). Пг. Ленина, 39, Якутск, Республика Саха (Якутия), Россия, 677000. <shkodzinskiy@diamond.yasn.ru>

Shkodzinsky Vladimir Stepanovich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (DPAMGI SB RAS). 39 Prospect Lenina, Yakutsk, Respublika Sakha (Yakutiya), Russia, 677000. <shkodzinskiy@diamond.yasn.ru>