



УДК 550.42

ПРОИСХОЖДЕНИЕ АВТОНОМНЫХ РОССЫПЕЙ АЛМАЗОВ

В. С. Шкодзинский

Институт геологии алмазов и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

Полученные доказательства горячей аккреции Земли свидетельствуют, что кимберлиты, лампроиты и алмазы сформировались из остаточных расплавов придонных перидотитовых частей глобально-магматического океана, образовавшегося в результате огромного импактного тепловыделения при аккреции. Характерные для автономных россыпей с неизвестным коренным источником ромбододекаэдрические и округлые алмазы возникли в относительно богатых кремнекислотой вязких магмах. Низкое содержание в них углекислоты привело к небольшой глубине вскипания, декомпрессионного затвердевания и взрыва затвердевших частей поднимающихся магматических колонн под влиянием законсервированного затвердеванием высокого внутреннего давления газовой фазы и к образованию незначительных по объему взрывных диатрем. Поэтому продукты взрыва выбрасывались преимущественно на земную поверхность и сформировали алмазоносные тuffы и тuffзиты. Их размыв привел к формированию автономных россыпей алмаза, для которых не удается найти кимберлитовые трубки – предполагаемые коренные источники алмазов.

Ключевые слова: россыпи, алмазы, магматический океан, декомпрессионное затвердевание.

ORIGIN OF AUTONOMOUS DIAMOND PLACERS

V. S. Shkodzinsky

Diamond and Precious Metal Geology Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia

The obtained evidences of the hot accretion of Earth indicates that kimberlites, lamproites and diamonds were formed from residual melts of the bottom peridotite parts in global magmatic ocean generated as a result of the huge impact heat input during accretion. Rhombic-dodecahedron and rounded diamonds, characteristic of autonomous placers with an unknown mother lode, appeared in relatively silicic acid-rich viscous magmas. The low content of carbon dioxide in them led to a small boiling depth, decompression solidification and explosion of solidified parts of rising pyrogeic columns under the influence of the high internal pressure of gas phase preserved by solidification and to the formation of explosive diatremes insignificant in volume. Therefore, explosion products were ejected mainly onto the Earth's surface and formed diamond tuffs and tuffzites. Their wash out has led to the formation of autonomous diamond placers, for which it is not possible to find kimberlite pipes, the supposed mother lodes of diamonds.

Keywords: placers, diamonds, magmatic ocean, decompression solidification.

DOI 10.20403/2078-0575-2022-4-64-69

С древнейших времен россыпи – источники алмазов. Аллювиальной россыпью является, например, Голконда в Индии, где были найдены знаменитые ювелирные алмазы Кох-и-Нур, Орлов, Регент [2]. В настоящее время выделяются две разновидности россыпей. Россыпи ближнего переноса имеют отчетливую пространственную связь с недалеко расположенными (обычно до первых десятков километров) кимберлитовыми трубками и содержат одинаковые с ними алмазы. Они имеют относительно небольшой размер и широко распространены в Якутской кимберлитовой провинции [3]. Россыпи, образование которых связывается с дальним переносом алмазов, имеют множество загадочных особенностей.

Известно, что в водотоках наиболее далеко переносятся мелкие обломки пород и минералов. Например, средний вес алмазов в устье р. Малая Ботубия составляет 23,4 мг, а на участке в 300 км ниже по течению р. Вилюй – 9 мг [3]. Поэтому россыпи дальнего переноса, казалось бы, должны содержать мелкие кристаллы алмазов, однако замечательная их особенность – намного бóльшая средняя крупность алмазов по сравнению с кимберлитовыми трубками. В трубках Якутии средний вес кристаллов

алмаза обычно составляет первые миллиграммы (рис. 1), в россыпях р. Маят и Вишерского Урала он достигает многих десятков мг, а в россыпях юго-западного побережья Африки – 300 мг. Можно предполагать повышение среднего веса алмазов за счет интенсивного выноса самых мелких алмазов и незначительных перемещений крупных. Но в этом случае образование россыпей и отсутствие в них коренных источников вряд ли можно связывать с процессами дальнего переноса.

Другой загадочной особенностью является обычно отсутствие богатых кимберлитовых трубок – предполагаемых коренных источников алмазов. Поэтому такие россыпи целесообразно называть автономными. Крупность и высокое содержание ювелирных алмазов в россыпях стимулировало проведение большого объема поисковых работ. Например, в Южной Африке для поиска коренных источников алмазов россыпей из кимберлитовых трубок было отобрано множество тысячетонных проб [5], но найти коренные источники крупных алмазов так и не удалось. В связи с большой площадью распространения россыпей (до сотен тысяч квадратных километров) это совершенно непонятно. Обычно

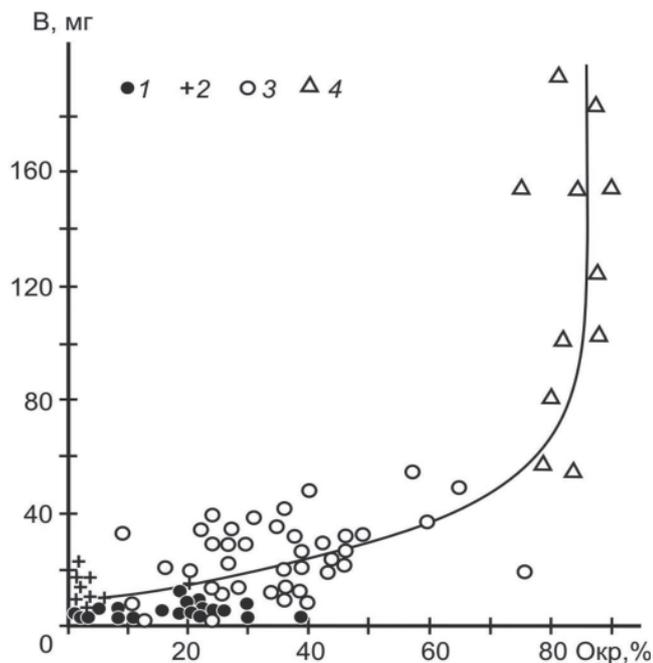


Рис. 1. Соотношение доли округлых (Окр) алмазов с их средним весом (В) в кимберлитовых трубках Якутии (1), в россыпях ближнего переноса (2), в автономных россыпях Якутии (3) и Вишерского Урала (4) [7]

предполагается, что алмазы перемещены на огромное расстояние и коренные источники слишком удалены, однако большая крупность алмазов противоречит этому предположению.

Еще одна особенность автономных россыпей – высокая доля в алмазах додекаэдроидов и округлых кристаллов и очень редкое присутствие октаэдров. Алмазы северных россыпей Якутии и Вишерского Урала по соотношению наиболее распространенных преимущественно октаэдрических ламинарных алмазов с суммой округлых и ромбододекаэдрических кристаллов кардинально отличаются от алмазов кимберлитовых трубок (рис. 2). Это указывает, что типичные кимберлиты не являются коренным источником алмазов рассматриваемых россыпей. Для выяснения их генезиса необходимо установление природы главных разновидностей алмаза. Это позволяют сделать имеющиеся доказательства образования кимберлитов и содержащихся в них алмазов в результате кристаллизации и фракционирования перидотитового слоя глобального магматического океана, возникшего в результате огромного импактного тепловыделения при аккреции Земли [6, 7].

По этим данным железное ядро быстро сформировалось раньше мантии в результате объединения частиц железа в протопланетном диске под влиянием главным образом магнитных сил, поскольку они были в миллиарды раз мощнее гравитационных [6]. Магматический океан образовался на самой ранней стадии аккреции мантии. Его придонная часть кристаллизовалась и фракционировала под влиянием роста давления верхних частей, возникавших при аккреции, и процессов остывания. Постепенное возрастание интенсивности аккреции и температу-

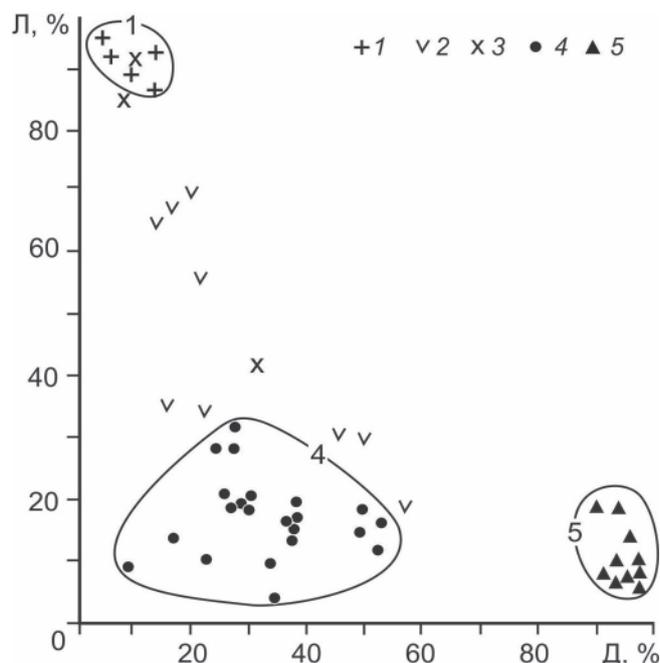


Рис. 2. Соотношение долей ламинарных (Л) алмазов с суммой ромбододекаэдрических и округлых (Д) в кимберлитах Малоботубинского поля Якутии (1), северных трубок (2), в россыпях ближнего переноса (3), автономных россыпях Якутии (4) и Вишерского Урала (5) [3]

ры магматического океана обусловило эволюцию состава его придонных остаточных расплавов от низкотемпературных кислых к высокотемпературным основным и перидотитовым, образование в магматическом океане соответствующих по составу слоев, обратного геотермического градиента в мантии, отсутствие в ней конвекции и современных геодинамических обстановок на ранней Земле.

Вследствие слоистости и сильного возрастания плотности с глубиной (от 2,2 до 2,8 г/см³) остывание магматического океана не сопровождалось широкомасштабной конвекцией расплавов. Поэтому он длительно кристаллизовался сверху вниз в результате преимущественно кондуктивных теплопотерь. Затвердевание верхнего кислого слоя привело к формированию раннедокембрийских кристаллических комплексов и континентальной коры. Всплытие остаточных расплавов из различных слоев обусловило эволюцию магматизма древних платформ от кислого к основному, ультраосновному и кимберлитовому.

Вследствие глубинного положения перидотитового слоя и кристаллизации магматического океана сверху вниз большинство кимберлитовых остаточных расплавов сформировалось в фанерозое. Это объясняет относительно молодой возраст кимберлитов (в среднем 236 млн лет). Алмазы начали кристаллизоваться при еще гарцбургитовом составе перидотитового слоя около 3,5 млрд лет назад вследствие накопления свободного углерода в расплаве, поскольку он почти не входил в состав кристаллизовавшихся породообразующих минералов. Очень небольшая вязкость перидотитовых расплавов (де-

сытые доли пуаза) обусловила большую скорость диффузии углерода. Поэтому он успевал достигать торцов слоев роста на кристаллах и присоединялся преимущественно к ним, поскольку здесь обнажалось максимальное количество свободных ковалентных связей углерода. В результате путем послойного роста формировались идеальные остросереберные октаэдры алмаза с зеркально гладкими гранями. Слоистое строение обусловило их ламинарность. Вследствие еще высокой температуры верхних слоев магматического океана кристаллизация октаэдров была очень длительной (более миллиарда лет). Это обусловило образование встречающихся в кимберлитах алмазов-гигантов и их преимущественно (в 99 % случаев) октаэдрическую огранку [6].

Декомпрессионное плавление вещества всплывавших плюмов (и потому отсутствие в них процессов накопления углерода) объясняет отсутствие в их породах алмазов, несмотря на огромное давление на глубинной стадии эволюции. Относительная кратковременность процессов накопления углерода в иногда кристаллизовавшихся в глубинных условиях основных магмах обычно является причиной очень небольшой массы (доли миллиграмма) кристаллов алмаза, встречающихся в щелочных базитах.

Накопление в магматическом океане при фракционировании многовалентных элементов (Si, Al, Ti) привело к увеличению вязкости расплавов в тысячи раз, к уменьшению в них скорости диффузии углерода и площади возникавших слоев роста на алмазах. Постепенное уменьшение размера слоев обусловило формирование выпуклых граней и округлых кристаллов. Послойный рост алмазов сменялся на радиальный, и возникали сначала кристаллы переходной морфологии, а затем ромбододекаэдры, кубы и агрегаты. Это подтверждается существованием прямой корреляции в кимберлитах доли ромбододекаэдров, кубов (рис. 3) и округлых алмазов (рис. 4) с содержанием кремнекислоты, обычно накапливающейся при фракционировании. Обратная корреляция наблюдается для октаэдров с кремнекислотой и округлых кристаллов с величиной структурного фактора расплавов, поскольку эта величина уменьшалась при процессах фракционирования [4]. Существование этих корреляций – важное доказательство реальности полученной модели алмазообразования.

На поздних стадиях фракционирования на кристаллах формировались разнообразные скульптуры. Вследствие накопления расплавофильных компонентов в остаточных расплавах в сотни раз возрастало содержание примесей, особенно азота в поздних алмазах. Опускание и подъем алмазов локальными нисходящими и восходящими потоками расплавов в разные по составу слои магматического океана обусловили существование нарушений единой зональности в распределении примесей в кристаллах. Эволюция морфологии и состава алмазов при кристаллизации перидотитового слоя магматического

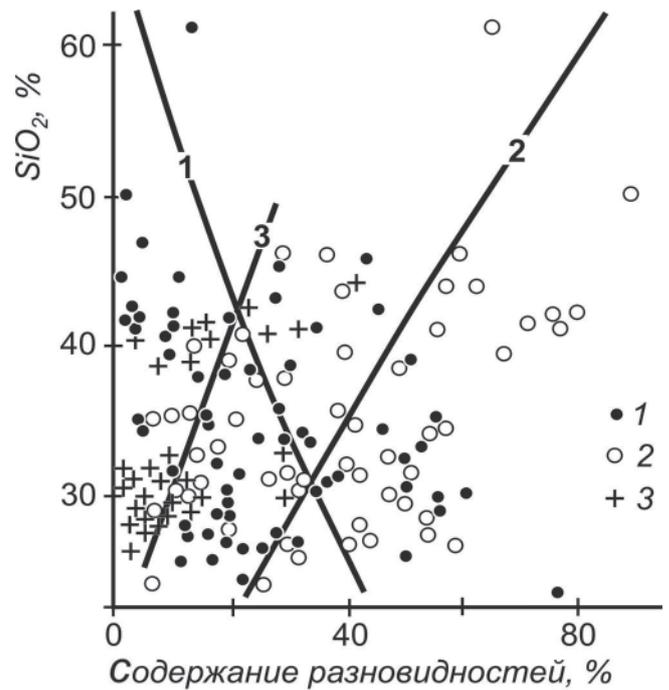


Рис. 3. Соотношение содержания кремнекислоты в кимберлитах с долей октаэдрических (1), ромбододекаэдрических (2) и кубических (3) кристаллов алмаза [7]

океана объясняет значительное разнообразие алмазов в каждой кимберлитовой трубке.

Вследствие увеличения содержания кремнекислоты и расплавофильных компонентов снизу вверх доля поздних ромбододекаэдров и округлых кристаллов в магматическом океане увеличивалась в этом направлении. Подъем из различных частей магматического океана объясняет частое сонахождение в одних и тех же полях кимберлитов с разными алмазами и неалмазоносных. Выклинивание на северном краю Сибирской платформы нижних наиболее мафических частей континентальной литосферы под влиянием механического воздействия подстилающей астеносферы при перемещениях континента является причиной резкого уменьшения в этом направлении количества кимберлитов с преимущественно октаэдрическими алмазами и возрастания в них доли ромбододекаэдрических и округлых кристаллов.

При доле октаэдров среди алмазов 20 % среднее содержание кремнекислоты в материнских магматических породах северных россыпей Якутии должно составлять около 42 % (линия 1 на рис. 3) и они должны иметь состав лампрокимберлитов (рис. 5). При типичной для Вишерского Урала доле октаэдров среди алмазов (первые проценты) их материнские магмы должны содержать около 60 % кремнекислоты, но они имели состав, близкий к типичным лампроитам. Лампрокимберлитовый и лампроитовый состав материнских магм позволяет понять причину отсутствия богатых кимберлитов – гипотетических коренных источников алмазов автономных россыпей.

Линии солидуса в присутствии флюидной фазы на P-T диаграммах для магм имеют отрицательный

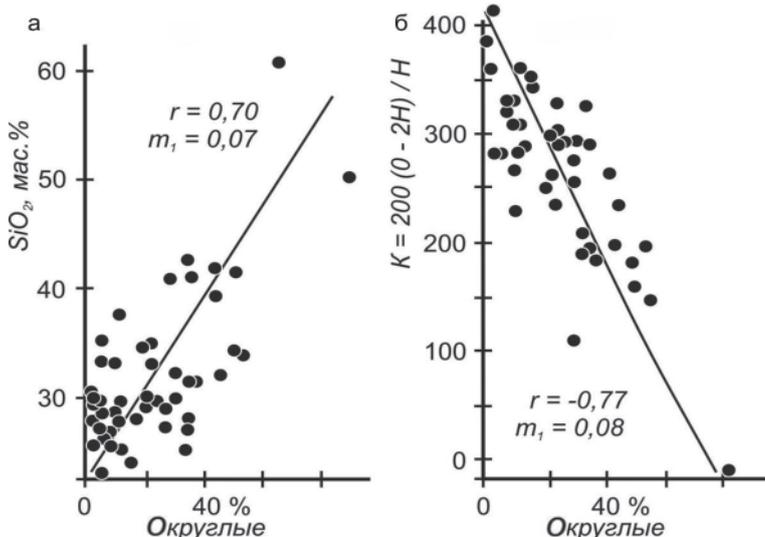


Рис. 4. Соотношение доли округлых кристаллов алмаза в кимберлитах с содержанием кремнекислоты (а) и величиной структурного фактора (К) их расплавов (б); r и m_1 – коэффициент корреляции и его ошибка, H и O – суммарные количества грамм-ионов сеткообразователей и кислорода соответственно [7]

наклон при низком давлении. Из такого наклона следует, что на диаграммах линии подъема магм пересекают линии солидуса (рис. 6). Поэтому в магмах после вскипания на малоглубинной стадии подъема резко увеличивалось содержание твердых фаз при медленном движении или происходило остеклование расплава при быстром. Огромная глубина зарождения и поэтому большая скорость всплывания приводили сначала к остеклованию кимберлитовых расплавов на малоглубинной стадии подъема.

Последующая реакция стекла с выделяющимися водой и углекислотой обусловили замещение его

серпентином, карбонатами и другими низкотемпературными минералами. Декомпрессионное затвердевание препятствовало расширению выделившейся газовой фазы и приводило к консервации ее высокого давления при дальнейшем подъеме. Под влиянием нарастающей разницы между высоким внутренним давлением газовой фазы и уменьшающимся внешним происходила взрывная дезинтеграция верхних частей магматических колон, образование брекчий, туфов и взрывных диатрем. Это на физико-химической основе объясняет природу взрывов кимберлитовых магм и вулканических диатрем. Несмотря на очевидность рассматриваемого декомпрессионно-флюидного происхождения вулканических взрывов, оно обычно не учитывается, что затрудняет выяснение природы многих особенностей кимберлитового магматизма. Такое происхождение взрывов позволяет понять причину отсутствия вы-

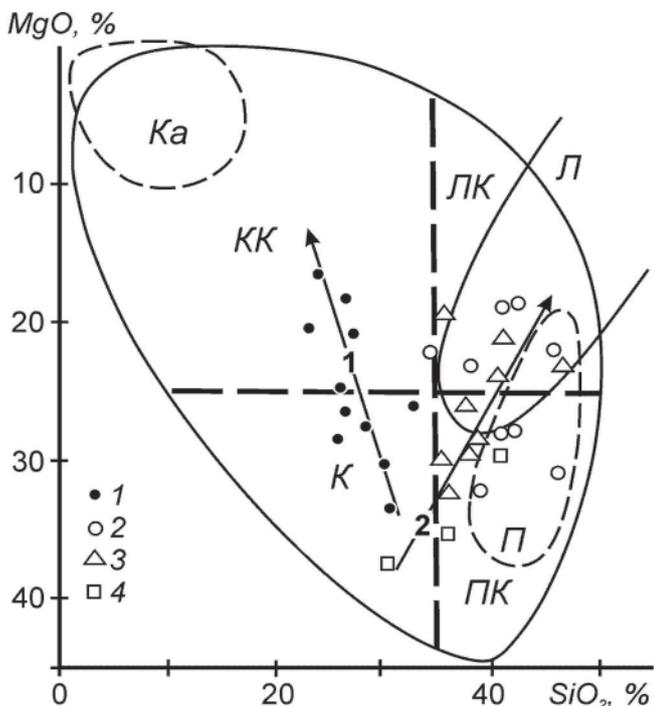


Рис. 5. Соотношение содержаний SiO_2 и MgO в щелочноультраосновных породах: 1–4 – средний состав трубок продуктивных кимберлитов Якутии (1), Архангельской провинции (2), Африки (3), Канады (4); тренды фракционирования: 1 – карбонатитовый, 2 – лампроитовый; поля составов: Ка – карбонатитов, КК – карбокимберлитов, Л – лампроитов, ЛК – лампрокиберлитов, ПК – пикрокимберлитов, П – пикритов [7]

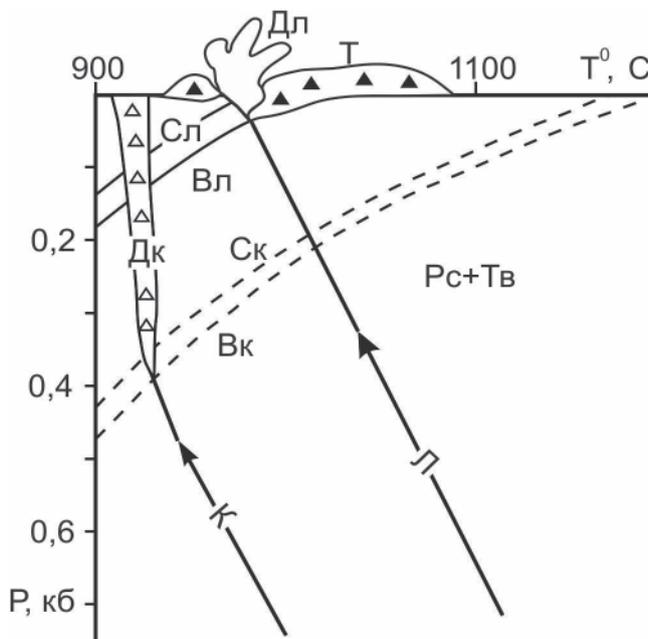


Рис. 6. Малоглубинная эволюция кимберлитовых (К) и лампроитовых (Л) магм: В – начало вскипания магм, Д – диатремы, Пс – расплав, С – солидус магм, Т – туфы, Тв – твердые фазы



скопродуктивных кимберлитов – предполагаемых коренных источников алмазов в автономных россыпях.

Лампроиты в отличие от кимберлитов обычно содержат очень небольшое количество (в среднем меньше 1 %) углекислоты, тогда как в кимберлитах ее содержание достигает 16 %. Данный компонент примерно в 5 раз менее растворим в расплаве, чем вода. Из этого следует, что при прочих равных условиях флюидная фаза в наиболее бедных углекислотой лампроитовых магмах начинала выделяться на значительно меньшей глубине, чем в кимберлитовых. Высокое содержание воды и большое количество выделявшегося флюида приводили к взрыву декомпрессионно затвердевших частей магматических колонн. Взрыв происходил в приповерхностных условиях, и диатремы имели небольшую глубину (см. рис. 6) или вообще не формировались. Обычно это подтверждается отсутствием четко выраженных диатрем в районах распространения мощных толщ игнимбритов, являющихся продуктом взрыва бедных углекислотой кислых магм. Из приведенных данных следует важный вывод: продукты взрывов богатых кремнекислотой магм размещались преимущественно на земной поверхности и формировали тела туфов и туффизитов. Этим они резко отличаются от богатых углекислотой кимберлитовых магм. Вследствие взрывов в глубинных условиях кимберлитовые магмы формировали протяженные (до первых километров) трубки. В них размещалась большая часть кимберлитового материала.

Ярким примером размещения продуктов взрывов богатых кремнекислотой магм на земной поверхности является Северная Якутия. Здесь вдоль побережья Северного Ледовитого океана на расстоянии более 500 км в карнийских отложениях триаса прослеживается тонкий (менее 50 см) слой высокоалмазоносных туффизитов [2]. Алмазы этого слоя морфологически идентичны содержащимся в многочисленных более молодых россыпях. Поэтому есть все основания предполагать, что в россыпи алмазы поступали из карнийских туфов и туффизитов. Их существование – важное подтверждение реальности полученной модели взрывов родоначальных магм алмазов автономных россыпей.

В декомпрессионно остеклованных расплавах газовые пузырьки были очень мелкими и равномерно распределялись в породе. Это привело к очень тонкому дроблению затвердевших пород при взрыве. Мелкие обломки разносились восходящими горячими потоками и ветром на большие расстояния, что иллюстрируют современные вулканические взрывы. Так можно объяснить размещение карнийских туффизитов и связанных с ними более молодых россыпей на огромной площади (сотни тысяч квадратных километров).

Очень низкая алмазоносность северных кимберлитовых трубок свидетельствует, что материнские магмы алмазов распространенных здесь россыпей формировались в более глубинных условиях.

Это указывает на значительную неоднородность состава магматического океана, размещавшегося в основании континентальной литосферы. Наряду с меланократовыми перидотитовыми магмами здесь на одной и той же глубине присутствовали менее мафические участки, фракционирование которых привело к образованию расплавов, близких к лампроитам. Вследствие большей низкотемпературности и более позднего затвердевания последние из данных расплавов формировались и внедрялись позже кимберлитовых, что объясняет более молодой возраст туффизитов (216–233 млн лет) по сравнению с высокоалмазоносными промышленными кимберлитами (358–367 млн лет) [3]. Если бы эти расплавы формировались выше в литосфере, чем кимберлитовые, то они внедрялись бы раньше вследствие кристаллизации слоистого магматического океана сверху вниз. Образование магм выше перидотитового слоя объясняет протерозойский возраст лампроитовой трубки Аргайл в Австралии. Распространение почти на всех древних платформах крупных автономных россыпей алмазов свидетельствует о существовании самостоятельного магматизма, близкого по составу к лампроитовому, который был источником многих крупных ювелирных алмазов. Вследствие низкого содержания углекислоты и высокого – воды эти магмы взрывались в приповерхностных условиях, что приводило к рассеиванию их материала на земной поверхности.

В кимберлитовых трубках самая мелкая фракция алмазов (0,5–1 мм) содержит наибольшее количество кристаллов. Число их уменьшается с ростом размера (рис. 7). В автономных россыпях мелкая фракция содержит очень небольшое количество кристаллов. Значит, ее малочисленность и повышенный средний размер кристаллов в автономных россыпях обусловлены сильным выносом наиболее транспортабельных мелких зерен алмаза водными потоками. Это подтверждается малочисленностью и средней фракции (1–2 мм) в автономных россыпях Вишерского Урала (см. рис. 7). Средний вес кристаллов алмаза в них и, следовательно, масштабы их выноса были намного выше, чем в северных россыпях Якутии. Относительно близкое число кристаллов в крупных фракциях в различных участках автономных россыпей Якутии указывает на незначительные перемещения и вынос алмазов крупных фракций. В россыпях ближнего переноса обеднение алмазами мелкой фракции менее выражено [2].

Из полученных результатов следует важный вывод о размещении автономных россыпей преимущественно на месте подъема магм, выносивших их алмазы. Это уменьшает перспективы открытия гипотетических богатых кимберлитовых тел, но приводит к экономии труда и средств, направляемых на их поиски. Ни на одном континенте такие тела не были обнаружены. При подобном генезисе автономных россыпей возникает проблема поисков остатков диатрем, в результате эксплозивного образования ко-

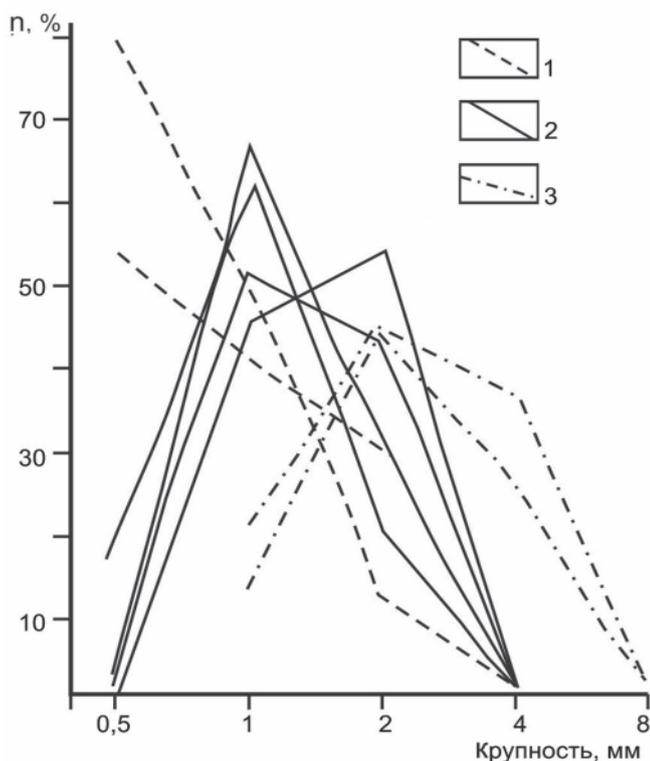


Рис. 7. Распределение алмазов по крупности: 1 – кимберлиты Малоботуобинского поля; автономные россыпи: 2 – северной Якутии, 3 – Вишерского Урала (по [3])

торых начали формироваться автономные россыпи. В современных вулканах после взрывов часто возникают кальдеры, частично заполненные вулканическими породами. В случае размещения в карбонатных толщах циркуляция в них воды, подкисленной вулканическими газами, должна была приводить к их преобразованию в карстовые полости. Подобные полости широко распространены на левобережье р. Маят в Якутии и на Вишерском Урале в участках размещения богатых автономных россыпей. Иногда высокие содержания алмазов в карстовых полостях [3] подтверждают, что они могут быть измененными остатками диатрем, в которых формировался материал алмазоносных туфов и туффизитов.

Выводы

Таким образом, доказательства существования на Земле глобального магматического океана приводят к новому решению проблемы генезиса автономных россыпей алмазов. По указанным данным кимберлиты и лампроиты возникли из остаточных расплавов придонных частей этого океана. Типичные для автономных россыпей ромбододекаэдрические и округлые алмазы кристаллизовались в наиболее богатых кремнекислотой разностях расплавов вследствие их повышенной вязкости. Низкое содержание углекислоты обусловило небольшую глубину их вскипания и декомпрессионного затвердевания и возникновение незначительных по размеру диа-

трем в результате взрыва затвердевших разностей под влиянием высокого внутреннего давления за консервированной газовой фазы. Поэтому продукты взрыва выбрасывались преимущественно на земную поверхность и сформировали алмазоносные туфы и туффизиты. Их размыв привел к образованию автономных россыпей, для которых не удается найти богатые кимберлитовые трубки – обычно предполагаемый источник алмазов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аргунов К. П. Алмазы Якутии. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 216 с.
2. Бэлфор И. Знаменитые алмазы. – Якутск: ПНУЛ «Минералы», 1999. – 355 с.
3. Россыпи алмазов мира / В. М. Подчасов, В. Н. Евсеев, В. Е. Минорин, В. Г. Черников. – М.: Геоинформарк, 2005. – 747 с.
4. Россыпи алмазов России / С. А. Граханов, В. И. Шаталов, В. А. Штыров и др. – Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2007. – 457 с.
5. Персиков Э. С. Вязкость магматических расплавов. – М.: Наука, 1984. – 160 с.
6. Шкодзинский В. С. Глобальная петрология по современным данным о горячей гетерогенной аккреции Земли. – Якутск: СВФУ, 2018. – 244 с.
7. Шкодзинский В. С. Петрология литосферы и кимберлитов (модель горячей гетерогенной аккреции Земли). – Якутск: СВФУ, 2014. – 452 с.

REFERENCES

1. Argunov K.P. *Almazы Yakutii* [Yakutia diamonds]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2005. 216 p. (In Russ.).
2. Belfor I. *Znamenityye almazы* [Famous diamonds]. Yakutsk, PNUL "Mineraly" Publ., 1999. 355 p. (In Russ.).
3. Podchasov V.M., Evseev V.N., Minorin V.E., Chernikov V.G. *Rosсыпи almazov mira* [Placers of diamonds of the world]. Moscow, Geoinformark Publ., 2005. 747 p. (In Russ.).
4. Grakhanov S.A., Shatalov V.I., Shtyrov V.A., et al. *Rosсыпи almazov Rossii* [Diamond placers of Russia]. Novosibirsk, Geo Publ., 2007. 457 p. (In Russ.).
4. Persikov E.S. *Vyazkostь magmaticheskikh rasplavov* [Viscosity of magmatic melts]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 160 p. (In Russ.).
7. Shkodzinsky V.S. *Globanaya petrologiya po sovremennym dannym o goryachey geterogennoy akkretsii Zemli* [Global petrology according to modern data on the hot heterogeneous accretion of Earth]. Yakutsk, NEFU Publ., 2018. 244 p. (In Russ.).
6. Shkodzinsky V.S. *Petrologiya litosfery i kimberlitov (model goryachey geterogennoy akkretsii Zemli)* [Petrology of lithosphere and kimberlites (model of the hot heterogeneous accretion of Earth)]. Yakutsk, NEFU Publ., 2014. 452 p. (In Russ.).