

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Общая и региональная геология, петрология и вулканология

УДК 550.42

DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-1-7-20

Генезис кимберлитов и алмаза

В.С. Шкодзинский

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия
shkodzinskiy@diamond.ysn.ru

Аннотация. Полученные доказательства горячей гетерогенной аккреции Земли и рассчитанная количественная модель кимберлитовых магм приводят к принципиально новому решению проблемы генезиса кимберлитов и алмаза. По этим данным кимберлитовые магмы образовались из остаточных расплавов придонного перидотитового слоя глобального магматического океана, возникшего в результате импактного тепловыделения при аккреции. Раздвижение продуктов его фракционирования растекавшимся веществом мантийных пломб является причиной отсутствия кимберлитов в океанических областях. Декомпрессионное затвердевание магм на малоглубинной стадии подъема в результате выделения сильных плавней, летучих компонентов приводило к взрыву под влиянием законсервированного затвердеванием высокого давления газовой фазы. Алмазы кристаллизовались в результате накопления углерода в остаточных расплавах. Вследствие низкой вязкости перидотитовых расплавов сначала кристаллизовались идеальные октаэдры с гладкими гранями. Накопление при фракционировании в остаточном расплаве многовалентных элементов привело к резкому возрастанию его вязкости, к смене тангенциального роста алмазов радиальным, к образованию их ромбододекаэдрических и кубических кристаллов и различных скульптур. Накопление в остаточных расплавах расплавофильтральных компонентов обусловило рост содержания примесей в поздних алмазах, в том числе азота.

Ключевые слова: горячая аккреция, магматический океан, фракционирование, кимберлиты, алмазы.

Введение

Кимберлиты являются наиболее изученными магматическими породами вследствие присутствия в них алмаза. Однако, несмотря на наличие огромного количества эмпирических данных, почти все их генетические проблемы не имеют убедительного решения [1] и установление новых эмпирических закономерностей часто лишь увеличивает число неясных вопросов. Это сильно затрудняет прогноз и поиски алмазных месторождений.

Как показал анализ [2], главной причиной такой ситуации является ошибочность положенной в основу всех генетических построений гипотезы холодной гомогенной аккреции Земли, т. е. образования ее в результате объединения одновременно выпадавших холодных железных и силикатных частиц протопланетного диска. Предполагается, что последующее разделение их по

плотности в земных недрах привело к формированию ядра, мантии и земной коры. Эта гипотеза была выдвинута математиком О.Ю. Шмидтом в середине прошлого столетия и не была подтверждена геологическими данными ни при ее выдвижении, ни при последующем массовом использовании. И это не случайно, поскольку к настоящему времени получено большое количество альтернативных данных и доказательств ее ошибочности и, наоборот, доказательств гипотезы горячей гетерогенной аккреции Земли.

Известно, что падающие метеориты плавятся и частично испаряются в результате импактного тепловыделения. Расчеты показали, что аккреция сопровождалась выделением 9000 кал/г, что способно было разогреть вещество нашей планеты на 34000 °C [3]. Горячая аккреция подтверждается присутствием трендов магматического фракционирования в мантийных ксенолитах и

раннедокембрийских ортогнейсах, полным соответствием среднего изотопного возраста и температуры кристаллизации их различных пород, последовательности образования при фракционировании, проекцией наиболее ранних геотермических градиентов в область очень высокой температуры (до 1000 °С) на земной поверхности, идентичностью величины этих градиентов (3,5 град./км) рассчитанному в магматическом океане и множеством других данных [2]. Резкая химическая неравновесность мантийных пород с металлическим железом в отношении содержания хорошо растворимых в нем сидерофильных элементов [3], в 20 000 раз большая фугитивность в них кислорода [4] и другие данные [2] указывают, что железные и силикатные частицы никогда не были перемешаны в земных недрах. Железные частицы объединились и сформировали земное ядро раньше под влиянием сил взаимного магнитного притяжения, поскольку те были в миллиарды раз мощнее гравитационных. Эти частицы после остывания до температуры Кюри сильно намагничились под влиянием магнитного поля Солнца. Оно в это время находилось на эволюционной стадии τ-Тельца и поэтому имело в тысячи раз более мощное магнитное поле, чем современное [5].

Другой причиной нерешенности генетических проблем является отсутствие убедительного физико-химического обоснования предполагаемых процессов. Несмотря на принятые во всех публикациях образование магм путем отделения расплавов в слабо подплавленных (на 0,1–15 %) и, поэтому, очень вязких (порядка 10^{20} – 10^{22} пуаз, рис. 1) породах отсутствуют убедительные обоснования возможности такого отделения. Как показали расчеты [6], в подплавленной на 6 % астеносфере с вязкостью 10^{21} пуаз капля основного расплава радиусом 1 см за всю историю Земли (4,5 млрд лет) способна всплыть менее, чем на 2 мм. Следовательно, магмы не формировались путем отделения выплавок. Широко предполагается метасоматический привнос щелочей и других лиофильных компонентов в мантийные породы. Однако, возможность движения флюидов в сильно сжатых породах, не имеющих открытых трещин и пор, является в высшей степени невероятной. Несмотря на имеющееся большое количество экспериментальных данных магматические процессы до сих пор обычно рассматриваются без привлечения полных количественных моделей магм, описывающих их главные свойства (содержание и состав расплава, флюида и твердых

фаз) при различных температурах и давлении. Отсутствие убедительного физико-химического обоснования обуславливает гипотетичность, а иногда и очевидную нереальность предполагаемых глубинных процессов. Это сильно затрудняет решение практических задач.

Происхождение геосфер и кимберлитовых расплавов

Учет горячей гетерогенной аккреции Земли и рассчитанных количественных моделей магм приводит к принципиально новому решению генетических проблем петрологии, происхождения кимберлитов и алмазов [2]. Он впервые объясняет все имеющиеся данные. При гетерогенной аккреции мантия возникла путем выпадения на ядро силикатных частиц. Мощное импактное плавление их обусловило образование глобального магматического океана на самой ранней стадии аккреции. Придонная часть океана кристаллизовалась под влиянием роста давления образующихся верхних частей. Кумулаты формировали мантию, а остаточные расплавы – магматический океан (рис. 2). Небольшая глубина раннего магматического океана и пониженная сила тяжести на еще небольшой Земле обусловили образование большого количества низкобарических остаточных расплавов от кислых до толеитовых. Это является причиной широкого распространения пород такого состава. Всплытие и последующая кристаллизация кислых расплавов привели к образованию раннедокембрийских кристаллических комплексов и кислой коры континентов. Увеличение интенсивности аккреции и температуры океана обусловили эволюцию состава остаточных расплавов до ультраосновного, возникновение в нем различных слоев и обратного геотермического градиента в мантии. Вследствие такого градиента на ранней Земле отсутствовали конвекция в мантии и современные геодинамические обстановки. Последующие остывание и затвердевание глубинных слоев океана привели к образованию литосферы континентов. Всплытие остаточных расплавов из различных слоев кристаллизовавшегося сверху вниз магматического океана обусловило эволюцию магматизма древних платформ от кислого к щелочно-основному, аортозитовому, щелочно-ультраосновному, карбонатитовому и на завершающей стадии – к кимберлитовому.

Формирование кимберлитовых магм обычно объясняют отделением выплавок в подплавлен-

ГЕНЕЗИС КИМБЕРЛИТОВ И АЛМАЗА

ных на 0,1 % мантийных плюмах, предварительно метасоматически обогащенных либо фильтральными компонентами. Однако, вследствие очень высокого давления в мантии нет путей для движения флюидных потоков и их источников. Летучие компоненты на многие сотни градусов понижают температуру плавления пород при высоком давлении и почти неограниченно растворимы в расплавах. Поэтому в случае появления флюидных потоков мантия почти полностью расплавилась бы, континенты утонули в ней, а флюид полностью растворился бы в расплаве. Вязкость подплавленных на 0,1 % пород больше 10^{22} паз (см. рис. 1). Поэтому выплавки не могли в них всплыть за всю историю Земли. Эти данные и отсутствие кимберлитов в океанических областях, где массово происходит подъем мантийных плюмов, опровергают предположение о возникновении в них кимберлитовых магм. Таким образом, наиболее распространенная гипотеза образования этих магм имеет грубые противоречия со всеми имеющимися данными и является в высшей степени неправдоподобной.

По имеющимся экспериментальным данным [7], магматическое фракционирование перidotитовых магм с содержанием углекислоты более 0,6 мольной доли во флюидной составляющей при давлении менее 2,5 ГПа приводит к формированию карбонатитовых остаточных расплавов, а при большем – кимберлитовых, вследствие

достижения полной смесимости силикатных и карбонатитовых расплавов. Поэтому при фракционировании придонного перidotитового слоя магматического океана происходило образование

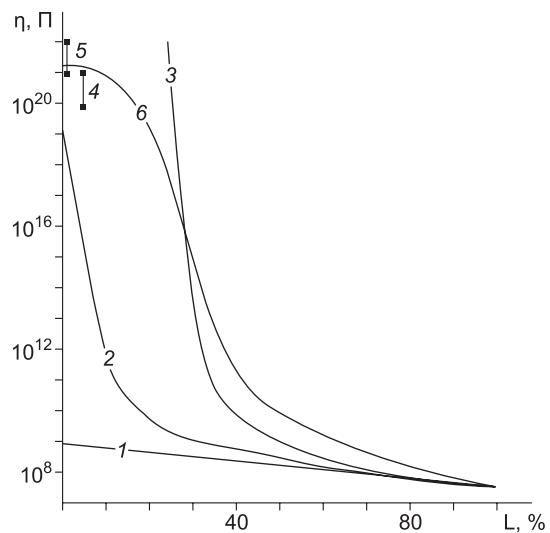


Рис. 1. Вязкость гранитных магм (η): 1 – стекла, 2, 3 – рассчитанная по формулам Эйнштейна–Роскоу при неодинаковых (2) и одинаковых (3) размерах твердых шаров, 4 – астеносфера, 5 – земной коры, 6 – принятая [6]. L – содержание расплава.

Fig. 1. Viscosity of granitic magmas (η): 1 – glass, 2, 3 – calculated according to formula Einstein–Roskou for different (2) and identical (3) size of hard spheres, 4 – asthenosphere, 5 – Earth's crust, 6 – accepted [6]. L – melt content.

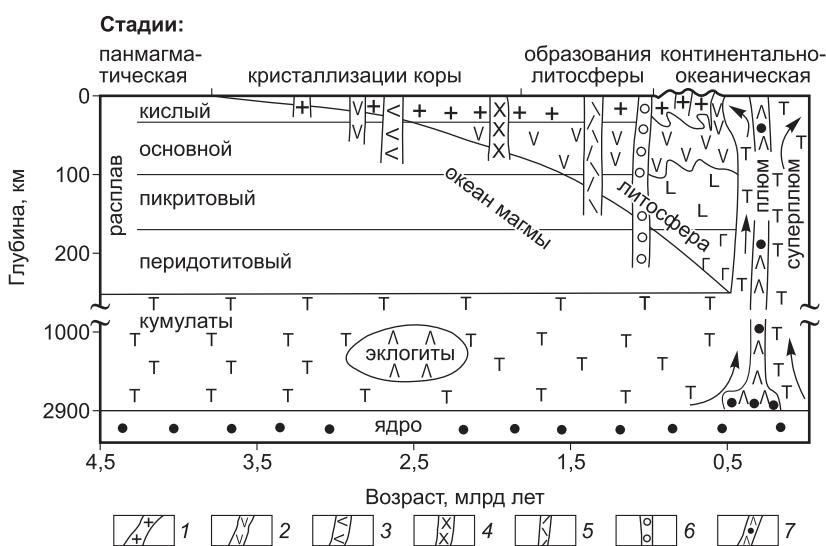


Рис. 2. Схема образования различных геодинамических обстановок и магм: 1 – кислых, 2 – основных, 3 – аортозитовых, 4 – щелочно-основных, 5 – щелочно-ультраосновных карбонатитов, 6 – кимберлитовых, 7 – океанических и траппов, иногда содержащих ксенолиты ядра.

Fig. 2. Scheme of formation of the various geodynamic setting and magmas: 1 – acidic, 2 – basic, 3 – anorthositic, 4 – alkaline-basic, 5 – alkaline-ultrabasic with carbonatites, 6 – kimberlitic, 7 – oceanic and trap sometimes with core xenoliths.

кимберлитовых остаточных расплавов. Вязкость магм (до десятков пузаз) в сектамильоны раз меньше вязкости слабо подплавленных пород (порядка 10^{21} пузаз). Во столько же раз быстрее происходило отделение кимберлитовых расплавов во фракционировавших магмах по сравнению с подплавленными породами. Вследствие кристаллизации магматического океана сверху вниз наиболее глубинные кимберлитовые магмы формировались на платформах значительно позже (в среднем 236 млн лет назад [2]) по сравнению с карбонатитовыми (688 млн лет) и другими.

Судя по резкому усилению интенсивности тектонических процессов, длительное прогревание мантии изначально на тысячи градусов более горячим ядром привело в конце протерозоя к возникновению в ней прямого геотермического градиента, к появлению конвекции и плюмов. Небольшие ядра не смогли прогреть мантии на других планетах земной группы. Это объясняет отсутствие на них признаков проявления плитной тектоники и современного вулканизма. Подъем плюмов обусловил образование океанических областей. При этом литосфера древних платформ была раздвинута растекавшимся мантийным веществом. Это является причиной отсутствия в этих и складчатых областях кимберлитов (правило Клиффорда). Повсеместное распространение магматического океана обусловило присутствие кимберлитов на всех изученных древних платформах. Судя по высокому содержанию легких редких земель (до тысячи хондритовых норм) объем кимберлитовых остаточных расплавов составлял менее тысячной доли перидотитового слоя. Это объясняет очень небольшой объем кимберлитовых тел (десятие–сотые доли кубического километра). Формирование ими обширных кимберлитовых полей позволяет предполагать неравномерное распределение кимберлитовых расплавов в основании литосферы.

Часто линейное размещение кимберлитовых полей указывает на большую роль в подъеме кимберлитовых магм тектонического выжимания по возникшим в литосфере зонам растяжения. Формирование таких зон в результате глобальных плитнотектонических процессов, видимо, является причиной образования кимберлитов в регионах в определенные возрастные эпохи. Чаще всего связь кимберлитов с субмеридиональными тектоническими разломами обусловлена существованием западного дрейфа континентов, вызванного отклонением к западу под

влиянием силы Кориолиса всплывающих плюмов и магм. Небольшой объем кимберлитовых магм, видимо, чаще всего не приводил к возникновению в литосфере значительных опусканий для компенсации уменьшения объема, обусловленного их подъемом. Это объясняет расположение кимберлитов на бортах рифтов, чем они отличаются от в тысячи раз более крупных карбонатитов содержащих магматических комплексов.

Мантийные ксенолиты в кимберлитах являются не остатками родоначального субстрата кимберлитовых магм, как обычно предполагается, а кумулатами фракционировавших перидотитовых магм при образовании кимберлитовых остаточных расплавов. Это подтверждается постоянным присутствием их в кимберлитовых трубках, наличием в них иногда ураганных содержаний алмазов и постепенным приближением состава наиболее поздних пород ксенолитов к кимберлитам [2]. Присутствие в мантийных ксенолитах, в отличие от кимберлитов, очень высоких (до целых процентов) содержаний алмаза свидетельствует об участии последнего в процессах гравитационной отсадки наряду с породообразующими минералами. Отсутствие мантийных ксенолитов в карбонатитах обусловлено несмесимостью их расплавов с силикатными и ликвационным отделением их от фракционировавших магм. Значительно большая однородность состава кимберлитов по сравнению с карбонатитами комплексами связана с невозможностью подъема ранних дифференциатов перидотитового слоя через еще жидкие верхние слои океана.

Изменение состава расплавов при фракционировании приводило к реакции его с более ранними минералами и к частичному их замещению в кимберлитах и мантийных ксенолитах более низкотемпературными минералами. Присутствие таких замещений не свидетельствует о протекании в мантии процессов метасоматоза, как часто предполагается [8]. Как отмечалось, в мантии не может существовать самостоятельная флюидная фаза, вследствие интенсивного плавления пород в ее присутствии и полного растворения в возникшем расплаве. Изредка присутствие включений флюида в минералах обусловлено отделением его от затвердевших расплавных включений.

В районах распространения кимберлитов по всему миру обычно присутствуют чаще всего близкие к ним по возрасту траппы [8]. Эти породы образовались в результате всплыивания и деком-

ГЕНЕЗИС КИМБЕРЛИТОВ И АЛМАЗА

прессионного переплавления линз основных пород в мантии, возникших путем заполнения придонными расплавами импактных углублений на дне магматического океана при аккреции (см. рис. 2). При еще жидком состоянии постаккреционного океана он был барьером для формировавшихся в мантии магм траппов. При подъеме они размещались в нем и поэтому не поднимались к земной поверхности. Они начали достигать ее после почти полного затвердевания магматического океана. Возникновение кимберлитовых остаточных расплавов после кристаллизации его придонного слоя более чем на 99,9 % отражают время затвердевания океана, начало неограниченного подъема

магм траппов и является причиной относительной близости возраста кимберлитов и траппов. Очень широко распространенный палеозойский возраст кимберлитов и траппов указывает, что кристаллизация магматического океана под большинством континентов в основном завершалась в это время. Подъем некоторых основных магм из самых нижних линз основных пород в мантии, захвативших ксенолиты ядра при образовании (см. рис. 2), объясняет присутствие в наиболее бедных расплавофильтральными компонентами трапах крупных (до десятков тонн) тел никелистого (до 7 %) самородного железа. Толеитовый состав траппов обусловлен не выплавлением их в относительно

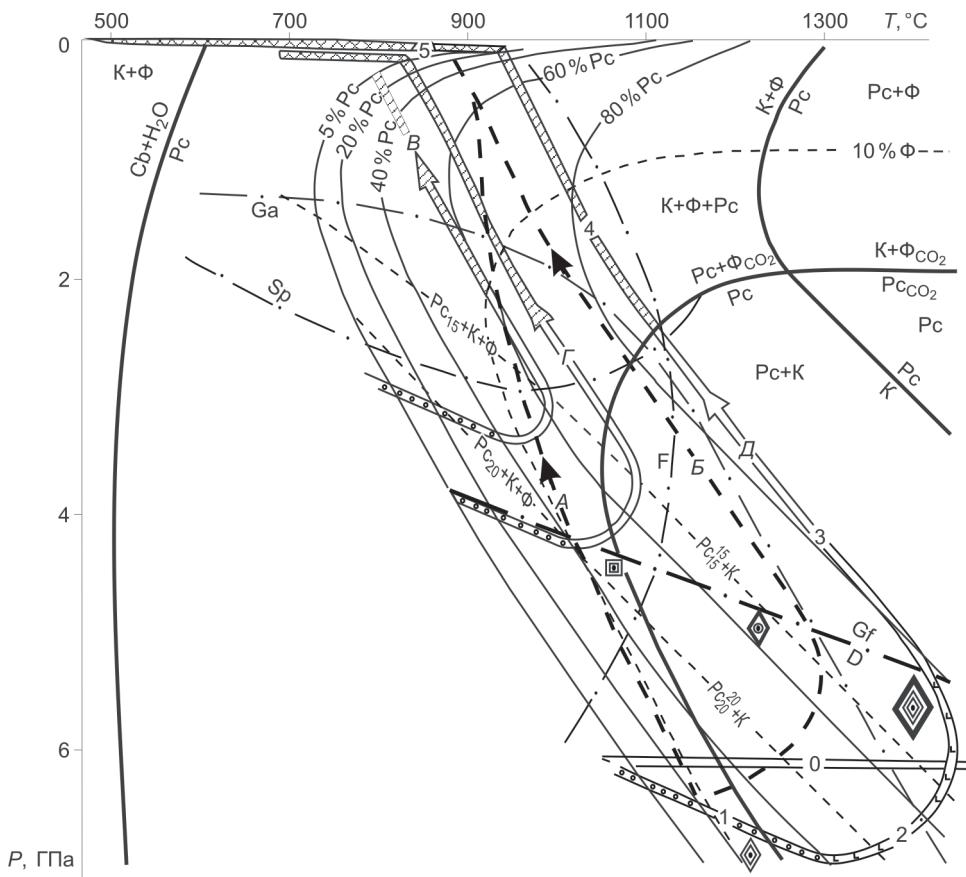


Рис. 3. P - T -диаграмма фазового состава и эволюции кимберлитовых магм (линии со стрелками A – D) с содержанием 10 % H_2O и CO_2 . Сб – карбонат, Д – алмаз, Га – гранат, Гф – графит, Сп – шпинель. Φ – флюид, К – твердые фазы кимберлита, Pc_{20}^{20} – расплав и содержание в нем H_2O (нижний индекс) и CO_2 (верхний). На линиях эволюции: 0 – образование мантии; 1 и 2 – этапы интенсивного соответственно фрикционного и декомпрессионно-фрикционного плавления; 3, 4 и 5 – этапы соответственно декомпрессионного плавления, декомпрессионного затвердевания и эксплозивной дезинтеграции. Рисунки кристаллов – морфология возникавших алмазов [6].

Fig. 3. P - T -diagram of the phase composition and evolution of kimberlite magmas (lines with arrows A – D) with H_2O and CO_2 10 % content. Сb – carbonate, D – diamond, Ga – garnet, Gf – graphite, Sp – spinel. Φ – fluid, K – hard phases of kimberlite, Pc_{20}^{20} – melt and content in it H_2O (lower index) and CO_2 (top). On evolution lines: 0 – mantle formation; 1 and 2 – stages of intensive correspondingly friction and decompression-friction melting; 3, 4 and 5 – stages of correspondingly decompression melting, decompression solidification and explosive disintegration. Drawings of crystals – morphology of formed diamonds [6].

малоглубинных частях мантии [8], а формированием их исходных пород при фракционировании раннего малоглубинного магматического океана.

Алмазоносные кимберлиты в отличие от карбонатитов размещаются чаще всего на удалении от краев континентов, что обусловлено присутствием здесь наиболее мощной литосферы. В связи с этим отсутствие или редкость алмазов в кимберлитах крайних северных частей Сибирской платформы должны быть связаны с пониженной мощностью здесь литосферы, а не с мезозойским возрастом большинства присутствующих кимберлитов. Это согласуется с отсутствием алмазов и в иногда встречающихся здесь палеозойских кимберлитах. Карбонатиты содержащие щелочно-ультраосновные магмы формировались в менее глубинных частях ультраосновного слоя магматического океана, что объясняет присутствие их в районах распространения кимберлитов.

На рис. 3 приведена количественная $P-T$ -диаграмма фазового состава и эволюции кимберлитовых магм, рассчитанная на основании опубликованных экспериментальных данных [6]. Она иллюстрирует существование в магмах обычно не учитывающихся явлений – отсутствие самостоятельной флюидной фазы при повышенных давлениях и температуре, резкое возрастание содержания твердых фаз в бесфлюидных магмах с увеличением давления и с его падением во флюидосодержащих относительно низкотемпературных.

Вследствие остаточно-магматического происхождения и поэтому относительной низкотемпературности кимберлитовых магм их вскипание на малоглубинной стадии подъема обуславливало декомпрессионное затвердевание верхних частей магматических колонн и взрыв их под влиянием законсервированного затвердеванием высокого давления газовой фазы (см. рис. 3). Это объясняет чаще всего формирование кимберлитовыми магмами трубок взрыва, большое содержание в них эксплозивных брекчий и обычно отсутствие на земной поверхности кимберлитовых лав.

Быстрое декомпрессионное затвердевание магм обусловило отсутствие в трубках отсадки мантийных ксенолитов, алмаза, граната и других высокоплотных минералов. Давление во взрывающихся верхних частях магматических колонн было равно таковому в магмах. Оно было во много раз меньше, чем необходимо для образования алмаза. Это противоречит иногда предполагавшемуся образованию алмазов в процессе взрыва.

Вследствие значительного объема кимберлитовых магм сила эксплозий при их декомпрессионном затвердевании была в тысячи раз больше атомных взрывов [7]. Это объясняет дробление ими мощных перекрывающих толщ и большую протяженность трубок. В искусственных взрывах взрывчатое вещество обычно размещается компактно. Это приводит к возникновению широких воронок при поверхностных взрывах или изолированных от поверхности полостей при очень глубинных. Отличия кимберлитовых взрывов от искусственных привели к представлениям об отсутствии взрывов при формировании кимберлитовых трубок и об их возникновении в результате подъема флюидизитов, представлявших смесь флюида с обломками пород и кристаллов. Однако в этих представлениях не учитывается, что при формировании трубок взрывался не компактный глубинный заряд, а протяженная затвердевавшая колонна, что приводило к возникновению крупных расширяющихся вверх полостей, к которым принадлежат кимберлитовые трубы. Сохранение около некоторых кратеров кимберлитовых туфов вполне определенно указывает на характерный для взрывов выброс раздробленного материала за пределы трубок.

Вследствие примерно в 5 раз большей растворимости воды в расплаве, чем углекислоты, богатые водой магмы вскипали и декомпрессионно затвердевали лишь в приповерхностных условиях и не формировали протяженные трубы, как богатые углекислотой кимберлитовые магмы. Продукты их взрыва размещались в основном не в диатремах, а на земной поверхности и формировали слои туфов, иногда большой протяженности. Например, карнийский горизонт высокоалмазоносных туффизитов в приуставьевой части р. Лена имеет протяженность около 500 км при мощности менее 0,5 м [9]. Вследствие повышенной кремнекислотности их магмы содержали преимущественно округлые додекаэроиды алмазов. Поэтому в формировавшихся из туфов россыпях присутствуют в основном такие алмазы. Их обычно повышенный средний размер (до 200–300 мг в россыпях Африки и Вишерского Урала) приводил во всем мире к многочисленным попыткам найти интрузивные коренные источники этих россыпей. В Африке для этого из кимберлитовых тел отбирались многие тысячетонные пробы [10]. Однако найти их не удалось. Это обусловлено чаще всего сильным распылением и разбросом на большие расстояния продуктов приповерхностных взрывов богатых водой магм, что

иллюстрирует огромная протяженность горизонта карнийских туффизитов в Якутии. Поэтому в районе россыпей могут отсутствовать такие коренные источники или они имеют незначительный размер.

Коренные источники удалось найти на Вишерском Урале [11]. Здесь в районе россыпей алмазов обнаружены штокверки, секущие и согласные тела и диатремы, сложенные туффизитами. Диатремы имеют большую ширину (до первых километров), связанную с возникновением их при поверхностных взрывах. Вертикальная протяженность их и штокверков обычно 50–100 м. Значительно меньшая ее величина, чем у кимберлитовых трубок (до первых километров), также подтверждает взрывы их магм в приповерхностных условиях вследствие незначительного содержания в них малорастворимой в расплавах углекислоты. Они имели состав, переходный к лампроитам. Их расплавы возникали в переходной верхней обогащенной кремнекислотой части перидотитового слоя. Это объясняет размещение на Сибирской платформе россыпей округлых алмазов севернее полей продуктивных кимберлитовых трубок. Здесь нижние части перидотитового слоя, видимо, были эродированы мантийными течениями.

Генезис алмазов

Чаще всего предполагается, что алмаз в кимберлитах является ксеногенным, захваченным из архейской мантии. Однако, как показало обобщение опубликованных данных [2], более 60 % включений в алмазах являются постархейскими и иногда фанерозойскими, потому этот минерал не захватывался из древней мантии. Предполагалось метасоматическое образование алмазов в мантии и из углерода погруженных при субдукции углеродистых осадков. Но процессы метасоматоза не могут происходить в мантии вследствие плавления пород в присутствии флюида и полного растворения его в расплаве. В зонах субдукции нет кимберлитов и алмазов, что противоречит их субдукционному происхождению. Доказательством субдукционного генезиса обычно считается характерный для земной коры легкий изотопный состав углерода некоторых алмазов. Однако четкая прямая корреляция содержания легкого углерода в алмазах с количеством в них накапливавшихся в остаточных расплавах примесей [2] и более высокое содержание в магматических породах легких редких земель по

сравнению с тяжелыми указывают на накопление легкого изотопа углерода в остаточном расплаве при фракционировании. Это подтверждается сильным обогащением легким углеродом преимущественно поздних алмазов – кубов и агрегатов.

При горячей аккреции Земли алмаз формировался в перидотитовом слое магматического океана вследствие накопления углерода в остаточном расплаве, поскольку этот элемент почти не входил в состав кристаллизовавшихся породообразующих минералов. Небольшое количество углерода присутствовало в расплаве вследствие диссоциации углеродсодержащих соединений. Алмаз начал формироваться примерно 3,5 млрд л.н. при еще преимущественно гарцбургитовом составе придонного перидотитового слоя. Это объясняет присутствие включений такого состава в алмазах и их наиболее древний возраст. Низкое содержание свободного углерода в расплавах обусловило относительно небольшое количество алмазов (обычно первые караты на тонну) даже в самых богатых кимберлитах. В случае иногда предполагаемого приноса углерода флюиидами или погружающимися при субдукции океаническими осадками содержание алмазов было бы в сотни–тысячи раз большим.

В поднимавшихся мантийных плюмах происходило плавление вещества под влиянием снижения давления. Возрастание количества расплава при этом приводило к уменьшению в нем концентрации углерода. Поэтому в плюмах обычно не кристаллизовались алмазы, хотя вещество плюмов на глубинной стадии подъема находилось при очень высоком давлении. Это объясняет отсутствие алмазов почти во всех связанных с плюмами магматических породах. Алмазы могли возникать лишь при протекании процессов кристаллизации и фракционирования плюмовых магм при остывании их в условиях высокого давления. Это является причиной присутствия ультраакцессорных алмазов в щелочных базитах, лампрофирах, минеттах. Однако длительность кристаллизации их магм в условиях большого давления была несопоставимо меньше, чем длительность кристаллизации родоначального для кимберлитов и лампроитов перидотитового слоя магматического океана (2–3 млрд лет). Это объясняет в сотни–тысячи раз меньший размер алмазов в не кимберлитовых породах (десяти–сотые доли миллиметра).

Очень низкая вязкость перидотитовых расплавов (первые пузы) обусловила в них большую скорость диффузии углерода. Поэтому он успевал достигать торцов слоев роста кристаллов алмаза и присоединялся к ним, поскольку здесь обнажалось больше свободных ковалентных связей углерода, чем на гранях. В результате путем послойного тангенциального роста формировались идеальные острореберные октаэдры алмаза с зеркально гладкими гранями. При фракционировании содержание кремния, алюминия и других многовалентных элементов в остаточных расплавах возрастало. Это приводило к увеличению их вязкости в тысячи раз, к примерно такому же уменьшению скорости диффузии углерода и к возрастанию степени пересыщения им расплава. Вследствие увеличения скорости возникновения новых центров кристаллизации уменьшалась площадь образующихся слоев роста на гранях и формировались выпуклые поликентрические, блочные, слоистые и округло-ступенчатые октаэдры. При дальнейшем уменьшении площади формирующихся слоев на гранях на месте ребер и вершин возникали грани соответственно ромбододекаэдра и куба и формировались кристаллы переходной морфологии. Затем формировались ромбододекаэдрические и кубические алмазы. Тангенциальный послойный рост сменялся на радиальный, и возникали многочисленные скульптуры на кристаллах [7].

С началом интенсивного радиального роста связано нарастание мутных фибрillлярных оболочек на октаэдрические округлые прозрачные кристаллы в алмазах IV разновидности по Ю.Л. Орлову. В алмазах V разновидности радиальные волокна начинались в центре кристаллов и, расширяясь, продолжаются к периферии. Для алмазов этих разновидностей характерно присутствие множества полостей (шрамов), протягивающихся обычно параллельно волокнам. Их обычно связывают с протеканием гипотетических процессов растворения. Однако циркуляция растворяющегося вязкого расплава в узкой заканчивающейся внутри кристалла полости практически не возможна. Эти шрамы, видимо, образовались вследствие радиального роста кристаллов, когда уменьшающаяся скорость диффузии углерода переставала обеспечивать рост расширяющихся к периферии волокон и между ними возникали пустые промежутки. Подобное происхождение, видимо, имеют шрамы и в блочных кристаллах.

Позднее образование IV и V разновидностей подтверждается часто высоким содержанием в

них накапливающегося в остаточных расплавах легкого изотопа углерода и обычно пониженной степенью рентгенолюминесценции, указывающей на большое количество примесей. Высокое их содержание, видимо, обуславливает окрашенность большинства поздних кристаллов и их низкое ювелирное качество. Радиальный рост интенсивно проявлен в относительно богатых кремнекислотой магмах, содержащих преимущественно додекаэдрические алмазы. Например, кристаллы V разновидности присутствуют в архангельских кимберлитах, содержащих в среднем 41,16 % кремнекислоты, но отсутствуют в якутских кимберлитах с ее количеством в среднем 35,21 %. Вследствие большого содержания кремнекислоты доля круглых додекаэдров в архангельских кимберлитах составляет около 80 %, тогда как в промышленных якутских трубках они почти отсутствуют.

Повышенное содержание воды в кремнекислотных магмах обусловило формирование ими россыпей с разрушенным при взрыве коренным источником и объясняет присутствие в этих россыпях алмазов IV и V разновидностей. Характерные для кимберлитов с повышенным содержанием кремнекислоты и глинозема круглые кристаллы алмаза образовались под влиянием сокращения площади возникавших граней вследствие уменьшения скорости диффузии углерода во фракционировавших магмах. То есть они являются результатом антискелетного роста, а не растворения, как часто предполагается. Это подтверждается обычно более крупным размером круглых алмазов по сравнению с плоскогранными в одних и тех же кимберлитах и россыпях и присутствием круглых внутренних зон роста в некоторых кристаллах. Причина гипотетического растворения обычно не рассматривается. В остающихся магмах процессы растворения алмазов не могли существовать, поскольку в них происходило накопление углерода в расплавах и уменьшалась скорость его диффузии, а это приводило к антискелетному росту.

Такое происхождение алмазов подтверждается эволюцией состава минеральных включений в них от перидотитового парагенезиса к эклогитовому, пироксенитовому и далее к кимберлитовому (карбонатсодержащему) [2] и возрастанием в тысячи раз от ранних алмазов к поздним содержания примесей, накапливавшихся в остаточных расплавах химических компонентов, в том числе азота и легкого изотопа углерода. Примеси поглощают рентгенолюминесценцию.

ГЕНЕЗИС КИМБЕРЛИТОВ И АЛМАЗА

Поэтому в поздних алмазах удельная интенсивность рентгенолюминесценции снижена почти до нуля, ее величина является показателем последовательности формирования алмазов в процессе эволюции магм.

В переходной верхней части перидотитового слоя изначально повышенное содержание кремния и алюминия приводило к ромбододекаэдрической и кубической огранке даже ранних алмазов. Их опускание под влиянием повышенного удельного веса в нижние части обусловило включение их в центральные части возникавших здесь позже октаэдрических кристаллов.

Вследствие присутствия различных по составу слоев и минералов в магматическом океане его придонное фракционирование не сопровождалось полным разделением твердых фаз и расплава. Часть последнего захоронялась среди кумулаторов. Поэтому после завершения акреции в подстилавших магматический океан кумулатах на различной глубине находились тела расплавов. При остывании в них также формировались алмазы, которые отличались от алмазов магматического океана присутствием более глубинных включений. Иногда всплытие таких расплавов приводило к привносу в магматический океан ультравысокобарических алмазов. Видимо, этим объясняются находки в кимберлитах алмазов с включениями ферропериклаза, бриджманита. Эти минералы формировались на глубине до 600 км, тогда как магматический океан имел максимальную глубину около 250 км. Присутствие в таких включениях карбонатов, а также рингвудита с содержанием воды более 1 % подтверждает кристаллизацию ультравысокобарических алмазов в остаточных расплавах. Подобное происхождение алмазов согласуется с очень небольшим их содержанием и присутствием в кимберлитах с преобладающими менее глубинными алмазами.

На начальных стадиях остывание придонного перидотитового слоя было медленным, поскольку он был перекрыт еще горячими верхними слоями. Поэтому длительная (более миллиарда лет) кристаллизация привела к возникновению здесь алмазов-гигантов массой до многих сотен карат, иногда присутствующих в кимберлитах. Такое происхождение подтверждается резким преобладанием (более чем в 99 % [12]) среди них октаэдров и увеличением их размера в последовательности кристаллизации – для гладкогранных октаэдров он равен в среднем 46 каратам, для

полицентрических октаэдров – 50 карат, слоистых – 72 караты, для изредка встречающихся ромбододекаэдров (3 из 330) он составляет 151 карат.

Природа критериев алмазоносности кимберлитов

На основе гипотезы ксеногенного происхождения алмазов, т. е. не зависимого от кимберлитов их образования, некоторые исследователи отрицали существование петрохимических критериев алмазоносности. Однако в настоящее время эти критерии широко используются при прогнозно-поисковых работах. Судя по высокому содержанию углекислоты в кимберлитах и ультраосновных дифференциатах магматического океана (до десятков процентов) и низкому (десятые доли процента) в кислых магматических породах, содержание углерода в магматическом океане возрастало сверху вниз. В этом направлении увеличивалось и давление. Поэтому наиболее глубинные части магматического океана были самыми благоприятными для процессов алмазообразования. Это подтверждается на 1,5 ГПа более высоким максимальным давлением при образовании гранатов высокопродуктивной (6,75 кар./т) Нюрбинской кимберлитовой трубки по сравнению с близко расположенной менее алмазоносной (0,26–0,51 кар./т) Сюльдюкарской [13]. Следовательно, повышенное содержание в кимберлитах химических компонентов ультраосновных магм должно положительно коррелироваться с их алмазоносностью.

Для перидотитов типичны большая величина MgO/FeO и повышенное содержание Cr_2O_3 . Как иллюстрирует рис. 4, A, содержание алмазов в кимберлитах действительно резко увеличивается от десятков у. е. (условных единиц) при величине MgO/FeO менее 2 до 1600 у. е. при величине его от 4 до 4,5. Возрастание в гранате содержания Cr_2O_3 от 2–7 % до 12–17 % сопровождается увеличением алмазоносности кимберлитов в среднем от 40 до 720 у. е., то есть в 18 раз (рис. 4, B). Возрастание алмазоносности с увеличением содержания магния и хрома в кимберлитах отмечали многие исследователи [14]. Алмазоносность в среднем увеличивается и при росте содержаний в кимберлитах CaO и CO_2 , TiO_2 , SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O и K_2O в повышенных количествах содержатся в основных магматических породах. Поэтому их содержания в перидотитовом слое магматического океана должны были в среднем увеличиваться снизу вверх и поэтому отрицательно коррелируются с алмазоносностью кимберлитов (рис. 4, B).

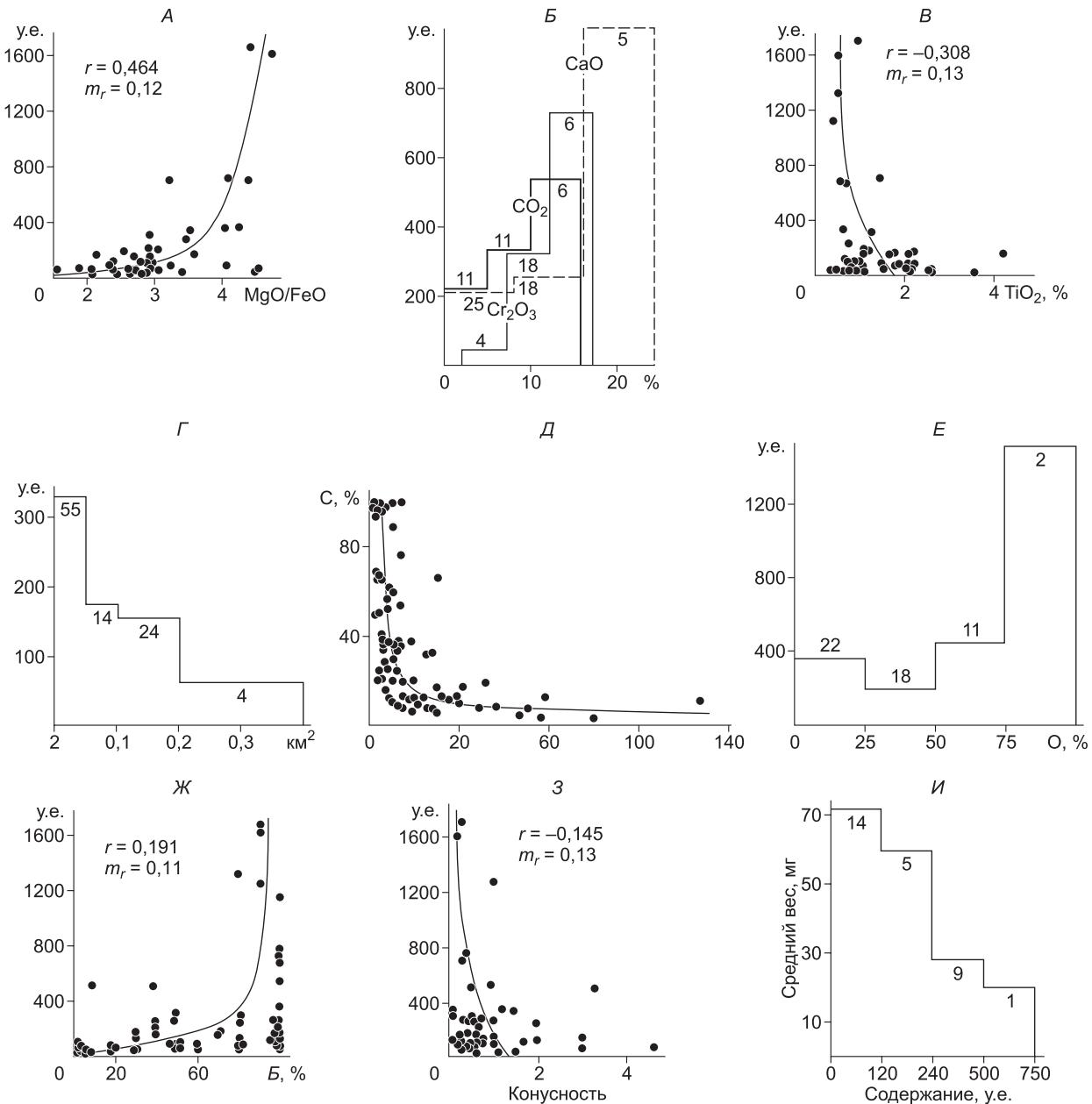


Рис. 4. Соотношение алмазоносности кимберлитов (у.е.) с их магнезиальностью (*А*), содержанием в них углекислоты, извести, оксида хрома (*Б*), оксида титана (*В*), с сечением трубок (*Г*), доли алмазоносных трубок (*Д*) с общим их числом (*н*) в кимберлитовых полях (*Д*), соотношение алмазоносности с долей октаэдров (*О*) среди алмазов (*Е*), с содержанием брекчий в трубках (*Ж*), с конусностью трубок (*З*), со средним весом алмазов (*И*). r – коэффициент корреляции, m_r – ошибка этого коэффициента. Построен по данным [12, 14–18, 20, 21].

Fig. 4. Relationship of diamond-bearing kimberlites (y.e.) with their magnesia (*A*), the content of carbon dioxide, lime, chromium oxide (*B*), titanium oxide (*B*), with the cross section of tubes (*Г*), the proportion of diamond-bearing tubes (*Д*) with their total number (*n*) in kimberlite fields (*Д*), the ratio of diamond-bearing with the proportion of octahedra (*О*) among diamonds (*Е*), with the content of breccias in tubes (*Ж*), with taper tubes (*З*), with the average weight of diamonds (*И*). r is the correlation coefficient, m_r is the error of this coefficient. Built according to [12, 14–18, 20, 21].

В участках с пониженной глубиной магматического океана его перidotитовый слой мог располагаться на небольшой глубине, не благоприятной для кристаллизации алмазов. Поэтому полу-

жительная связь алмазоносности с содержанием компонентов ультраосновных магм [14, 15] не всегда выдерживается. Присутствие высокого содержания алмазов в лампроитах, расплавы кото-

ГЕНЕЗИС КИМБЕРЛИТОВ И АЛМАЗА

рых формировались при кристаллизации пикрического слоя магматического океана, видимо, обусловлено аномально глубинным расположением некоторых участков этого слоя.

Очевидно, что критериями алмазоносности могут быть не только особенности состава кимберлитов. С возрастанием глубины зарождения кимберлитовых магм и мощности перекрывающей литосферы все большее количество этих магм не достигало земной поверхности, поскольку расходовалось на формирование глубинных кимберлитовых тел по пути подъема. Поэтому, по нашему мнению, алмазоносность кимберлитовых тел должна иметь обратную корреляцию с их размером и количеством в кимберлитовых полях. Действительно, как показывает рис. 4, Г, алмазоносность кимберлитовых трубок с сечением меньше $0,05 \text{ км}^2$ в среднем в 6 раз больше, чем сечением $0,2\text{--}0,4 \text{ км}^2$. При количестве тел в кимберлитовых полях менее 10 до 90 % их могут быть алмазоносными. При количестве тел в кимберлитовом поле более 100 лишь 10 % из них содержат алмазы (рис. 4, Д).

Наиболее глубинные кимберлитовые магмы формировались в бедных кремнекислотой нижних частях перидотитового слоя магматического океана, где кристаллизовались октаэдрические алмазы. Поэтому между долей октаэдров и общей алмазоносностью, по нашему мнению, должна существовать положительная корреляция. Действительно, в самых высокоалмазоносных кимберлитах с содержанием алмазов более 1500 у. е. доля октаэдров составляет 75–90 % (рис. 4, Е). Подобная положительная корреляция отмечалась многими исследователями [17, 18]. По нашему мнению, вследствие образования ромбододекаэдров и возникших путем антискелетного роста округлых додекаэдроидов в богатых кремнекислотой вязких магмах наиболее богатые ими кимберлитовые остаточные расплавы должны были чаще всего возникать в относительно малоглубинных частях перидотитового слоя. Поэтому между содержаниями додекаэдроидов и общим содержанием алмазов в кимберлитах должна существовать обратная корреляция, отмечавшаяся некоторыми исследователи [17].

Вследствие образования алмазов почти на всех стадиях фракционирования перидотитового слоя их содержание в кимберлитах, сформировавшихся из поздних остаточных расплавов, должно быть выше, чем в возникших из ранних. Показателем большой степени фракционирова-

ния является высокое содержание летучих компонентов, поскольку они накапливались в остаточных расплавах. При подъеме кимберлитовых магм должны быть особенно сильно проявлены процессы декомпрессионного затвердевания и взрыва затвердевших верхних частей колонн с формированием брекчий. Это может объяснить наличие положительной корреляции между содержаниями брекчий и алмазов в кимберлитах (рис. 4, Ж). Максимальной алмазоносностью характеризуются автолитовые кимберлитовые брекчии, возникшие, по-видимому, при дезинтеграции полу затвердевших относительно глубинных частей магматических колонн, что отмечали Н.Н. Зинчук, В.И. Коптиль [17].

С увеличением содержания летучих компонентов кимберлитовые магмы должны вскипать и взрываться на более глубинных стадиях подъема, что приводило к пониженной конусности возникавших трубок. Вследствие повышенной алмазоносности богатых углекислотой кимберлитов это должно обусловить существование отрицательной корреляции конусности трубок с содержанием в них алмазов. Действительно, слабо выраженные конусные трубы с величиной падения среднего диаметра с глубиной порядка 0,4 имеют алмазоносность до 1700 у. е., тогда как при конусности 4,8 содержание алмазов составляет около 50 у. е. (рис. 4, З).

Формировавшиеся на ранних стадиях фракционирования октаэдрические алмазы имеют меньший размер, чем возникшие на поздних стадиях ромбододекаэдры, поскольку последние в значительной степени образовались в результате разрастания октаэдров. Но ромбододекаэдры присутствуют больше всего в малоалмазоносных менее глубинных частях перидотитового слоя, так как магмы здесь были изначально богаче кремнекислотой и имели повышенную вязкость. Это должно было обусловить обратную корреляцию между крупностью и содержанием алмазов в кимберлитах. И действительно, содержание алмазов при средней массе 71 мг меньше 120 у. е., тогда как при массе 20 мг алмазоносность превышает 500 у. е. (рис. 4, И).

Кимберлиты Якутской алмазоносной провинции по сравнению с архангельскими и зарубежными содержат меньше кремнекислоты (35,21 % в среднем по 30 трубкам [2]) и образуют карбонатитовый тренд фракционирования, на котором не происходило накопления кремнекислоты в поздних остаточных расплавах. Поэтому их магмы

формировались из расплавов самого нижнего максимального фемического перидотитового слоя магматического океана. Это объясняет резкое преобладание октаэдрических алмазов в наиболее продуктивных кимберлитах (75,4 % в трубке Интернациональная, 61,1 % в трубке Мир), их повышенное содержание (8,57 карат на тонну в среднем по трубке Интернациональная [19]) и небольшую крупность (первые миллиграммы). Этот слой в Якутской кимберлитовой провинции имел большую мощность, так как в продуктивных полях относительно малоглубинные неалмазоносные кимберлиты являются также низко кремнекислотными и имеют близкий к карбонатитам состав.

Судя по повышенному содержанию кремнекислоты, архангельские (41,16 % SiO_2 в среднем по девяти трубкам) и африканские (38,94 % в среднем по девяти трубкам) продуктивные кимберлиты образовались из более вязких верхних частей перидотитового слоя магматического океана, чем кимберлиты Якутской провинции [20]. Это объясняет более низкое содержание в них октаэдрических алмазов (5,1–32,3 % в архангельских и 5–50 % в африканских) и их пониженную алмазоносность (чаще всего десятые доли карата на тонну). В этих кимберлитах наблюдается лампроитовый тренд фракционирования с накоплением кремнекислоты в поздних дифференциатах [21]. Вследствие формирования в частях магматического океана с повышенной кремнекислотностью для лампроитов обычно не характерны высокохромистые гранаты.

Заключение

Таким образом, полученные доказательства горячей аккреции Земли и построенная количественная модель кимберлитовых магм объясняют природу многочисленных особенностей кимберлитов и алмаза. Главной причиной высокого содержания алмазов в кимберлитах является повышенная глубинность фракционирования перидотитового слоя магматического океана при формировании их родоначальных расплавов. Она обусловила благоприятное для алмазообразования большое давление и максимальное содержание углерода в наиболее бедных кремнекислотой нижних частях перидотитового слоя. Показателем формирования кимберлитовых расплавов в этих частях являются повышенные магнезиальность кимберлитов и хромистость их минералов, высокое содержание в них углекислоты, пони-

женное количество кремнекислоты, глинозема, титана и щелочей. Большое содержание среди алмазов октаэдров и пониженное – ромбододекаэдров также связано с образованием родоначальных для кимберлитов остаточных расплавов в самых мафических придонных частях перидотитового слоя магматического океана. Положительная корреляция алмазоносности с количеством брекций в трубках и отрицательная – с величиной их конусности обусловлена более полным процессом алмазообразования в богатых летучими кимберлитах. Отрицательная корреляция алмазоносности с величиной трубок и их количеством в кимберлитовых полях связана с повышенным захоронением наиболее глубинных магм при длительном подъеме через мощную литосферу.

Литература

1. Люхин А.М. Вопрос о происхождении кимберлитов и алмазов – основа эффективности их поисков // Материалы ХIII Всероссийского Петрографического совещания. Т. 4. Иркутск, 2021. С. 297–301.
2. Шкодзинский В.С. Генезис литосферы и алмазов. Модель горячей гетерогенной аккреции Земли. Saarbrücken: Palmarium academic publishing, 2015. 687 с.
3. Рингвуд А.Е. Происхождение Земли и Луны. М.: Недра, 1982. 294 с.
4. O'Neil H.S. Oxygen fugacity and siderophile elements in the Earth's mantle: implications for the origin of the Earth // Meteoritics. 1990. N 25 (4). P. 395.
5. URL: wikichi.ru/wiki/protoplanetary/disk.
6. Шкодзинский В.С. Фазовая эволюция магм и петрогенезис. М.: Наука, 1985. 232 с.
7. Шкодзинский В.С. Глобальная петрология по современным данным о горячей гетерогенной аккреции Земли. Якутск: Изд. СВФУ, 2018. 244 с.
8. Sobolev N.V., Sobolev A.V., Tomilenko A.A., Batanova V.G., Tolstov A.V., Logvinova A.M., Kuz'min D.V. Unique compositional peculiarities of olivine phenocrysts from the post flood basalt diamondiferous Malokuonapskaya Kimberlite pipe, Yakutia // Doklady Earth Sciences. 2015. Т. 463, № 2. С. 828–832.
9. Граханов С.А., Коптиль В.И. Триасовые палеороссыпи алмазов северо-востока Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2003. Т. 44, № 11. С. 1191–1201.
10. Харьков А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.Н. Коренные месторождения алмазов Мира. М.: Недра, 1998. 554 с.
11. Рыбальченко А.Я., Рыбальченко Т.М., Силавет В.И. Теоретические основы прогноза и поисков коренных месторождений алмазов туффизитового типа // Изв. Карельского научного центра УрО РАН. 2018. Вып. 1 (5). С. 54–56.
12. Аргунов К.П. Алмазы Якутии. Новосибирск: Изд. ЯНЦ СО РАН, 2005. 406 с.

ГЕНЕЗИС КИМБЕРЛИТОВ И АЛМАЗА

13. Тарский О.В., Шахурдина Н.К. Латеральная неоднородность верхней мантии территории Якутской кимберлитовой провинции (на примере Мирнинского, Накынского и Сюльдюканского кимберлитовых полей) // Материалы XIII Всероссийского петрографического совещания. Т. 4. Иркутск, 2021. С. 195–199.
14. Vasilenko V.B., Kuznetsova L.G., Minin V.A., Tolstov A.V. Petrochemical Evaluation of the Diamond potentials of Yakutian Kimberlite fields // Geochemistry International. 2010. Vol. 48, No. 4. P. 346–354.
15. Lapin A.V., Tolstov A.V., Vasilenko V.B. Petrogeochemical characteristics of the Kimberlites from the Middle Markha Region with application to the problem of the geochemical heterogeneity of Kimberlites // Geochemistry International. 2007. Vol. 45, No. 12. P. 1197–1209.
16. Ваганов В.И. Алмазные месторождения России и Мира. М.: Геоинформмарк, 2000. 371 с.
17. Зинчук Н.Н., Контиль В.И. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. М.: Недра, 2003. 603 с.
18. Илупин И.П., Каминский Ф.В., Францесон Е.Н. Геохимия кимберлитов. М.: Недра, 1978. 352 с.
19. Lapin A.V., Tolstov A.V., Antonov A.V. Sr and Nd isotopic compositions of kimberlites and associated Rocks of the Siberian craton // Doklady Earth Sciences. 2007. Vol. 414, No. 1. P. 557–560.
20. Gurney J.J., Hildebrand P.B., Carlson J.A. The morphological characteristics of diamonds from the Ecate property, Canada // 8th International Kimberlite Conference. Selected Papers. Vol. 2. 2004. P. 21–38.
21. Mittchel R.H. Kimberlites, arangites, and related rocks. NY: Plenum Press, 1995. 410 p.

Поступила в редакцию 27.10.2021
Принята к публикации 20.01.2022

Об авторе

ШКОДЗИНСКИЙ Владимир Степанович, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов, Сибирское отделение Российской академии наук, 677980, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия,
<https://orcid.org/0000-0001-7749-1264>, e-mail: shkodzinskiy@diamond.ysn.ru

Информация для цитирования

Шкодзинский В.С. Генезис кимберлитов и алмаза // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022, Т. 27, № 1. С. 7–20. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-1-7-20>

DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-1-7-20

Genesis of kimberlites and diamond

V.S. Shkodzinskiy

Institute of Diamond and Precious Metals Geology SB RAS, Yakutsk, Russia
shkodzinskiy@diamond.ysn.ru

Abstract. The obtained evidence of hot heterogeneous accretion of the Earth and the calculated quantitative model of kimberlite magmas has led to a fundamentally new solution to the problem of the genesis of kimberlites and diamond. According to this data, kimberlite magmas were formed from residual melts of the bottom peridotite layer of the global magmatic ocean, which arose as a result of impact heat release during accretion. The expansion of its fractionation products by the spreading matter of mantle plumes is the reason for the absence of kimberlites in oceanic regions. Decompression solidification of magmas at the shallow stage of ascent as a result of the release of strong fluxes, volatile components, led to an explosion under the influence of the high pressure of the gas phase preserved by solidification. Diamonds crystallized as a result of carbon accumulation in residual melts. Due to the low viscosity of peridotite melts, ideal octahedra with smooth faces crystallized first. The accumulation of multivalent elements during fractionation in the residual melt led to a sharp increase in its viscosity, to a change in the tangential growth of diamonds to radial, to the formation of their rhombododecahedral and cubic crystals and various sculptures. The ac-

cumulation of lithophilic components in the residual melts caused an increase in the content of impurities in late diamonds, including nitrogen.

Keywords: hot accretion, magmatic ocean, fractionation, kimberlites, diamonds.

References

1. *Luhin A.M. Vopros o proishodjenii kimberlitov i almaza – osnova effektivnogo prognosa i poiskov // Materialy XIII Vserossijskogo Petrograficheskogo soveschaniya. Vol. 4. Irkutsk, 2021. P. 297–301.*
2. *Shkodzinskiy V.S. Genesis lithosphere i almaza. Model gorjachei geterogennoi akkrezii Zemli. Saarbrücken: Palmarium academic publishing, 2015. 687 p.*
3. *Ringwood A.E. Sostav i proishodzenie Zemli. M.: Nauka, 1982. 294 p.*
4. *O’Neil H.S. Oxygen fugacity and siderophile elements in the Earth’s mantle: implications for the origin of the Earth // Meteoritics. 1990. No. 25 (4). P. 395.*
5. URL: wikichi.ru/wiki/protoplanetary/disk.
6. *Shkodzinskiy V.S. Fasovaja evolutsia magm i petrogenesis. M.: Nauka, 1985. 232 p.*
7. *Shkodzinskiy V.S. Globalnaja petrologia po sovremennym dannym o gorjachei geterogennoi akkretsii Zemli. Yakutsk: SVFU, 2018. 244 p.*
8. *Sobolev N.V., Sobolev A.V., Tomilenko A.A., Batanova V.G., Tolstov A.V., Logvinova A.M., Kuz’miin D.V. Unique compositional peculiarities of olivine phenocrysts from the post flood basalt diamondiferous Malokuonapskaya Kimberlite pipe, Yakutia // Doklady Earth Sciences. 2015. Vol. 463, No. 2. P. 828–832.*
9. *Grahanov S.A., Koptil V.I. Triasovaja paleorossyp almasov Severo-Vostoka Sibirskoi platformy // Geologia i geofizika. 2003. Vol. 44, No. 11. P. 1151–1201.*
10. *Harkiv D.V., Sinchuk N.N., Kruchkov A.N. Korennye mestorozhdenija almazov Mira. M.: Nedra, 1998. 554 p.*
11. *Rybalchenko A.Ja., Rybalchenko T.M., Silaev V.I. Teoreticheskie osnovy prognosa i poiskov korennyh mestorozhdenii almazov tuffisitovogo tipa // Izvestija Karelskogo nauchnogo zentra UrOAN. 2018. Iss. 1 (5). P. 54–56.*
12. *Argunov K.P. Korennye mestorozhdenija almazov Yakutii. Novosibirsk: YaNC SO RAN, 2005. 406 p.*
13. *Tarskii O.B., Shahurdina N.K. Lateralnaja neodnorodnost verhnei mantii territorii Yakutskoi kimberlitovoi provinziy // Materialy XIII Vserossijskogo Petrograficheskogo soveschaniya. Vol. 4. Irkutsk, 2021. P. 54–56.*
14. *Vasilenko V.B., Kuznetsova L.G., Minin V.A., Tolstov A.V. Petrochemical Evalution of the Diamond potentials of Yakutian Kimberlite fields // Geochemistry International. 2010. Vol. 48, No. 4. P. 346–354.*
15. *Lapin A.V., Tolstov A.V., Vasilenko V.B. Petrogeochemical characteristics of the Kimberlites from the Middle Markha Region with application to the problem of the geochemical heterogeneity of Kimberlites // Geochemistry International. 2007. Vol. 45, No. 12. P. 1197–1209.*
16. *Vaganov V.I. Almaznye mestorozhdenija Rossii i Mira. M.: Geoinformmark, 2000. 371 p.*
17. *Sinchuk N.N., Koptil V.I. Tipomorfism almazov Sibirskoi platformy. M.: Nedra, 2003. 603 p.*
18. *Ilupin I.P., Kaminskii F.V., Francesson E.N. Geomija kimberlitov. M.: Nedra, 1978. 357 p.*
19. *Lapin A.V., Tolstov A.V., Antonov A.V. Sr and Nd isotopic compositions of kimberlites and associated Rocks of the Siberian craton // Doklady Earth Sciences. 2007. Vol. 414, No. 1. P. 557–560.*
20. *Gurney J.J., Hildebrand P.B., Carlson J.A. The morphological characteristics of diamonds from the Ecay property, Canada // 8th International Kimberlite Conference. Selected Papers. Vol. 2. 2004. P. 21–38.*
21. *Mitchel R.H. Kimberlites, arangites, and related rocks. NY: Plenum Press, 1995. 410 p.*

Submitted 27.10.2021

Accepted 20.01.2022

About the author

SHKODZINSKIY, Vladimir Stepanovich, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), leading researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 39 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia,
<https://orcid.org/0000-0001-7749-1264>, e-mail: shkodzinskiy@diamond.ysn.ru

Citation

Shkodzinskiy V.S. Genesis of kimberlites and diamond // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2022, Vol. 27, No. 1. P. 7–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-1-7-20>