

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 552.311:552.323

Природа многообразия алмазов в кимберлитах

В.С. Шкодзинский

В соответствии с современными данными о горячей аккреции Земли алмазы кимберлитов и остаточные кимберлитовые расплавы должны были сформироваться в процессе фракционирования перидотитового слоя магматического океана. Увеличение содержания кремнекислоты в остаточных расплавах обусловило возрастание их вязкости, уменьшение скорости диффузии углерода и рост степени пересыщения их этим компонентом. Это является причиной эволюции кристаллизовавшихся алмазов в последовательности октаэдр–ромбододекаэдр–кубы и гладкогранные октаэдры – занозисто-сноповидные–полицентрические–блоковые–округло-ступенчатые.

Ключевые слова: горячая аккреция, магматический океан, кристалломорфология и генезис алмазов.

According to the modern data of hot Earth's accretion kimberlite diamonds and residual kimberlite melts were a result of a magma ocean fractionation. The increase of content of SiO_2 in residual melts caused the increase of its viscosity, content of C in it and reduced speed of C diffusion. This is the reason of diamond crystallization in the following succession octahedrons–rhombic dodecahedrons–cubes and octahedrons with flat faces – with shading faces–polycentric–blocked–round stepped.

Key words: hot accretion, magma ocean, crystallomorphology and genesis of diamonds.

Алмазы кимберлитовых трубок очень разнообразны по морфологии кристаллов и скульптурам на их поверхности. Выяснение природы этого разнообразия имеет существенное значение для решения проблемы генезиса этого минерала и кимберлитов. К настоящему времени получены доказательства [1, 2] изменения кристалломорфологии алмазов в последовательности октаэдр–ромбододекаэдр–кубы при увеличении степени пересыщения углеродом среды минералообразования. Однако причина изменения степени этого пересыщения остается неясной.

Присутствие округлых кристаллов алмаза и разнообразных скульптур на их поверхности чаще всего связывают с процессами растворения [3]. Некоторые исследователи [4] считают, что они возникали в процессе роста. Дискуссия о природе округлых кристаллов продолжается уже более столетия. Сторонники их образования в результате растворения основываются на получении таких алмазов экспериментальным путем. Однако округлые алмазы получены в экспериментах и в результате антискелетного роста [5]. Поэтому для выяснения генезиса их и других разновидностей необходимо привлечение дополнительных данных.

Принципиально новые возможности для решения этой проблемы открывают полученные в последние десятилетия доказательства горячей аккреции Земли и фракционирования на ней глобального океана магмы. В свете этих данных образование мантийной литосферы древних платформ, алмаза и остаточных кимберлитовых расплавов обусловлено процессами кристаллизации и фракционирования перидотитового слоя постагрегационного магматического океана (рис. 1) [6]. Такое совместное с кимберлитовыми расплавами формирование объясняет сочетание в алмазах, казалось бы, несовместимых их особенностей. С одной стороны, судя по изотопно-

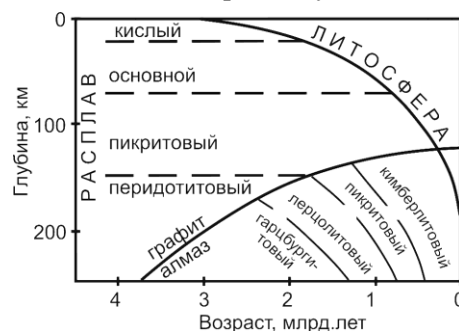


Рис. 1. Последовательность изменения состава остаточных расплавов при фракционировании перидотитового слоя магматического океана от гарцбургитового к кимберлитовому и кристаллизации различных алмазов: О – октаэдрических, Д – ромбододекаэдрических, К – кубических, А – агрегатов

му возрасту включений, алмазы являются значительно более древними, чем вмещающие кимберлитовые трубки. С другой стороны, они обнаруживают признаки зависимости морфологии кристаллов и их содержания от состава кимберлитов [7].

Обычно предполагается, что алмазы кристаллизовались в результате привноса соединений углерода в мантию путем гипотетических процессов метасоматоза или опускающимися блоками океанической коры в зонах субдукции. Однако в этом случае в мантии существовали бы жилы и линзы алмазов и их количество в кимберлитах могло бы достигать очень больших величин. В действительности же даже в самых богатых кимберлитах алмазов очень мало, обычно менее 1 г/т. В случае существования процессов глобального магматического фракционирования алмазы кристаллизовались вследствие повышения концентрации углерода в остаточном расплаве. Объем последнего при достижении его состава кимберлитов, судя по степени увеличения содержания легких редких земель, уменьшился в тысячи раз по сравнению с объемом исходной перидотитовой магмы. Поскольку углерод практически не входил в состав кристаллизовавшихся порообразующих минералов мантии, фракционирование перидотитового слоя быстро привело к пересыщению остаточного расплава углеродом и к раннему началу кристаллизации алмазов (3,6–3,0 млрд. лет назад). Уменьшение содержания остаточного расплава при фракционировании постоянно поддерживало пересыщение его углеродом и обеспечило очень длительную кристаллизацию алмазов. Небольшая исходная концентрация углерода в перидотитовых магмах и незначительная растворимость ограничивали его накопление в остаточных расплавах и являются причиной низкого содержания алмазов в кимберлитовых трубках.

Фракционирование перидотитовых магм на ранних и средних стадиях приводило к росту содержания кремнекислоты в остаточных расплавах и, следовательно, к сильному (более чем на порядок) увеличению их вязкости. В соответствии с формулой Эйнштейна–Стокса [8], $D = RT / (6\pi\eta r)$, величина коэффициента диффузии в растворах D прямо пропорциональна температуре T и обратно пропорциональна вязкости среды η ($R=8,31 \cdot 10^3$ Дж/кмоль·град, $\pi=3,14$, r – радиус диффундирующих молекул). Формула показывает, что коэффициент диффузии углерода в расплавах сильно уменьшался по мере фракционирования вследствие увеличения их вязкости и понижения температуры. Уменьшение коэффициента диффузии углерода замедляло движение его к формирующимся кристаллам алмаза, что

приводило к возрастанию степени пересыщения им остаточных расплагов, несмотря на постоянное удаление его в кристаллизовавшиеся алмазы.

Таким образом, при фракционировании происходило замедление процессов диффузии углерода в остаточных расплавах и возрастание степени их пересыщения этим компонентом (рис. 2). Это не могло не отразиться на формирующихся алмазах. На ранней стадии фракционирования в маловязких расплавах при тангенциальном послойном росте атомы углерода присоединялись к кристаллам лишь на ступеньках роста, поскольку на них обнажается больше свободных ковалентных связей, чем на плоских гранях. С уменьшением скорости диффузии и увеличением концентрации в расплавах атомы углерода все меньше были способны к длительному перемещению к ступеням роста и все чаще присоединялись кратчайшим путем к граням кристаллов. Поэтому при фракционировании уменьшалась роль тангенциального послойного роста в формировании алмазов и возрастала роль нормального радиального. Это привело к эволюции кристалломорфологии возникавших алмазов в последовательности октаэдры – ромбододекаэдры – кубы. Позже всего образовались алмазные агрегаты в результате их быстрой кристаллизации во флюидных пузырьках, возникших вследствие сильного накопления летучих компонентов в последних остаточных расплавах [7].

Такая последовательность образования этих форм полностью подтверждается тем, что ксе-

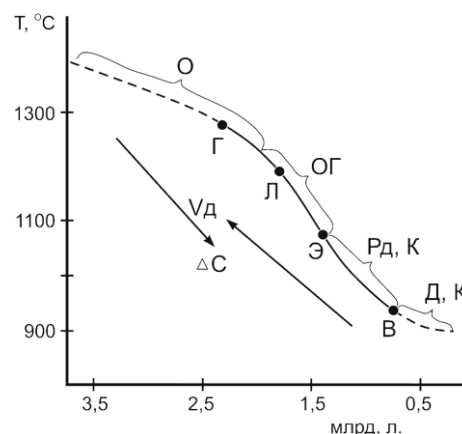


Рис. 2. Постепенное уменьшение температуры мантии древних платформ на глубине 150 км по результатам обобщения опубликованных данных по Р-Т условиям кристаллизации и изотопному возрасту ксенолитов в кимберлитах [6]. Средние возрасты пород: В – верлитов; Г – гарцбургитов, Л – лерцолитов, Э – эклогитов. Условия образования алмазов: О – октаэдрических, ОГ – октаэдрических грубослоистых, Рд – ромбододекаэдрических, К – кубических, Д – округлых додекаэдров. Стрелки показывают направления увеличения скорости диффузии (V_d) и степени пересыщения расплава углеродом (ΔC)

нолиты перидотитов, сформировавшиеся из осаждавшихся порообразующих минералов на самой ранней стадии фракционирования перидотитового слоя магматического океана (рис. 1), содержат только октаэдрические кристаллы алмаза. В эклогитах, возникших на более поздней стадии [6], наряду с октаэдрами часто присутствуют кубы и ромбододекаэдры [9]. Эта последовательность согласуется с преобладанием в октаэдрах включений перидотитового парагенезиса, тогда как в ромбододекаэдрах и кубах чаще встречается эклогитовый парагенезис. Она подтверждается увеличением в среднем от октаэдров к ромбододекаэдрам и далее к кубам и агрегатам содержания азота, легкого изотопа углерода и других компонентов, накапливавшихся в остаточных расплавах [7]. Рассматриваемая последовательность является среднестатистической. Вследствие локальных вариаций состава остаточных расплавов и различий эволюции кристаллов разного размера временные интервалы образования различных алмазов частично перекрывались в одном и том же участке мантии.

Уменьшение роли послыйного роста алмазов по мере фракционирования обусловило формирование округлых кристаллов. При их кристаллизации площадь возникавших слоев роста все больше уменьшалась. Это привело к образованию выпуклых граней путем антискелетного роста. Такое происхождение округлых кристаллов подтверждается существованием прямой зависимости их содержания в кимберлитовых трубках от среднего количества в них кремнекислоты. Оно согласуется с повышенным размером округлых кристаллов по сравнению с плоскогранными в кимберлитах и россыпях, с прямой зависимостью средней массы кристаллов алмаза от доли среди них округлых разновидностей, с присутствием округлой внутренней зональности в некоторых кристаллах [6]. Эти результаты подтверждают представления сторонников ростового генезиса округлых алмазов.

Сторонники противоположных взглядов обычно не рассматривают природу предполагаемых процессов растворения. Между тем, судя по результатам обобщения опубликованных данных по условиям кристаллизации и изотопному возрасту ксенолитов из кимберлитов (рис. 2), температура в литосферной мантии древних платформ на глубине 150 км за последние 2 миллиарда лет понизилась на 400°C. Это подтверждается массовым развитием структур замещения высокотемпературных минералов более низкотемпературными в мантийных ксенолитах и отсутствием в них противоположных явлений. Снижение температуры сильно увели-

чивало стабильность алмаза в изохимических условиях, поэтому в мантии не могли возникать процессы его растворения. В случае иногда предполагаемого появления метасоматизирующих флюидных потоков и аллохимичности процессов алмазообразования верхняя мантия почти полностью расплавилась бы, так как присутствие флюидной фазы сильно понижает температуру плавления пород при высоком давлении (на 400–500°C, [6]). Поэтому геофизические доказательства преимущественно твердофазного состояния мантии и многие другие данные не позволяют принять гипотезу аллохимичности.

Особенностью типичных округлых алмазов уральского (бразильского) типа является их обычно тонколаминарное строение, тогда как плоскогранные октаэдрические алмазы часто являются грубослоистыми. Очевидно, что это явление обусловлено относительно быстрым сокращением площади образующихся слоев роста, вследствие чего толстые пакеты одинаковых по размеру слоев не успевали формироваться. То есть причина возникновения округлых алмазов и их тонколаминарного строения одна и та же – уменьшение площади формирующихся слоев роста, обусловленное изменением температуры и состава остаточного расплава.

Таким образом, по мере фракционирования образование плоскогранных кристаллов сменялось формированием округлых. Такая эволюция начиналась еще при грубослоистом росте и выражалась в сокращении площади пакетов слоев. В результате формировались округло-ступенчатые октаэдры. Они особенно характерны для ксенолитов эклогитов [9], в которых появляются кубы и ромбододекаэдры. То есть округло-ступенчатые кристаллы возникали на поздней стадии роста октаэдров. При тонкослоистом росте на краях выпуклых граней октаэдров образовалась штриховка, отражающая следы выхода слоев роста. Сохранение их выходов обусловлено сокращением площади более поздних слоев. При одинаковом сокращении расстояния до различных участков ребер формировалась параллельная штриховка, а при значительно большем сокращении расстояния до вершин возникала сноповидная штриховка.

В округлые преобразовывались в первую очередь наиболее крупные кристаллы, так как в них возникавшие уменьшавшиеся слои раньше всего переставали дорастать до краев граней. Это объясняет обычно более крупный размер округлых кристаллов по сравнению с плоскогранными и является одной из причин сонахождения в кимберлитах округлых и плоскогранных алмазов. Другой причиной является захоронение ранних плоскогранных алмазов в кумулатах и замедле-

ние или прекращение их роста. При подъеме смеси остаточного расплава с кумулатами наименее затвердевшие из них разрушались под влиянием декомпрессионного и фрикционного плавления с высвобождением ранних алмазов и ксенокристаллов породообразующих минералов.

С возрастанием степени пересыщения остаточных расплавов углеродом и сокращением тангенциального послойного роста начинал проявляться нормальный радиальный рост, при котором атомы углерода присоединялись к поверхности кристаллов. Сначала они присоединялись к отдельным участкам следов выхода слоев роста на гранях с образованием занозистой штриховки, черепитчатой структуры и различных по форме бугорков. При сочетании нормального радиального и послойного тангенциального роста должны были возникать полицентрические и блоковые кристаллы и пирамиды на их гранях. В промежутках между послойно разрастающимися блоками могли образоваться пирамидальные и неправильные по форме углубления.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что различные по морфологии и скульптуре кристаллы алмаза в кимберлитах в значительной мере формировались последовательно. Это полностью подтверждает рис. 3. Он показывает, что замеренные К.П. Аргуновым [9] величины удельной интенсивности рентгенолюминисценции (интенсивность рентгенолюминисценции, деленная на массу кристалла) равномерно уменьшаются в последовательности октаэдр – ромбододекаэдр – кубы и среди октаэдров с различными скульптурами: гладкогранные – занозисто-сноповидные – полицентрические – блоковые – округло-ступенчатые.

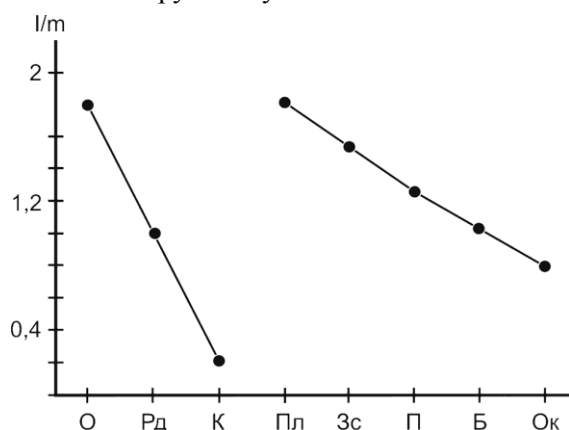


Рис. 3. Уменьшение средней величины удельной интенсивности рентгенолюминисценции (I/m) в алмазах в последовательности октаэдров (О) – ромбододекаэдров (Рд) – кубов (К) и плоскогранных октаэдров (Пл) – занозисто-сноповидных (Зс) – полицентрических (П) – блоковых (Б) – округло-ступенчатых (Ок). I – интенсивность рентгенолюминисценции, m – масса кристалла [9]

Примерно такая же последовательность наблюдается по мере увеличения средней массы различных алмазов-гигантов в кимберлитах и россыпях Якутии. Судя по 330 изученным К.П. Аргуновым [9] кристаллам, средняя масса их увеличивается следующим образом: гладкогранные октаэдры – 46 карат; полицентрические – 50 карат; со штриховой на гранях – 53 карата; округло-ступенчатые октаэдры – 72 карата; ромбододекаэдры – 151 карат [10]. Эти последовательности примерно соответствуют таковым, полученным выше на основании анализа эволюции свойств остаточного расплава, что подтверждает справедливость полученных выводов об их генезисе. Величины удельной интенсивности рентгенолюминисценции определяются только количеством примесей и дефектов в алмазном веществе, уменьшаясь с ростом их содержания. Поэтому рис. 3 показывает, что свойства этого вещества однонаправленно эволюционировали при алмазообразовании и являются различными в рассмотренных разновидностях алмаза. Это указывает на последовательное формирование данных разновидностей. В случае образования их путем наложения поздних процессов растворения алмазное вещество в них было бы чаще всего одинаковым и отсутствовала бы связь его свойств с кристалломорфологией алмазов. Поэтому существование показанных на рис. 3 зависимостей противоречит предположениям о формировании рассмотренных разновидностей алмаза путем растворения.

Большинство алмазов из кимберлитов имеет форму, отличающуюся от идеальных кристаллов. Это свидетельствует о росте только части алмазов в среде гомогенного расплава. Многие из них захоронялись в кумулатах породообразующих минералов и в дальнейшем росли в стесненных условиях полужидкой среды, что является причиной искаженной формы большинства кристаллов. С изменением состава остаточных расплавов на уже существующие в нем алмазы нарастали зоны другой кристалломорфологии, что приводило к укрупнению кристаллов. В захороненных среди кумулатов алмазах вследствие ограниченности диффузионного подтока углерода новые зоны часто не формировались и захороненные кристаллы мало увеличивались в размере. Поэтому возрастание средней доли какой-либо разновидности алмаза среди крупных кристаллов должно быть связано с более поздним формированием этой разновидности и наоборот. По данным [9], в продуктивных кимберлитовых трубках Архангельской провинции средняя доля октаэдров уменьшается в крупных классах алмазов, а в округлых, ламинарных, ромбододекаэдрических и кубических

кристаллах разновидности II увеличивается. Это подтверждает более раннее формирование октаэдров. Особенно ярко позднее образование округлых кристаллов V+VII разновидности иллюстрирует возрастание в 4–5 раз доли этих кристаллов в классе –4+2 по сравнению с классом –1+0,5 в трубках Архангельской кимберлитовой провинции по данным Н.Н. Зинчука и др. [11].

Таким образом, полученные результаты вполне определенно свидетельствуют о последовательном ростовом формировании главных разновидностей кристаллов алмаза под влиянием эволюции состава и физических свойств остаточного расплава в процессе фракционирования перидотитового слоя постаккреционного магматического океана. С учетом этого образование иногда встречающихся каверн и каналов в алмазах должно быть обусловлено окислительным растворением его кристаллов под влиянием флюидных пузырьков, выделявшихся при декомпрессии на малоглубинной стадии подъема кимберлитовых магм при давлении меньшем, чем в поле термодинамической стабильности алмаза. На много порядков более высокая скорость диффузии углерода и других компонентов во флюиде, чем в расплаве, обусловила существенное проявление процессов растворения кристаллов даже за относительно небольшое время подъема. Незначительный диаметр пузырьков согласуется с небольшим размером этих каналов и каверн. Существование значительных расстояний между этими пузырьками в поднимавшихся магмах видимо было причиной обычно присутствия следов растворения лишь на отдельных кристаллах.

Литература

1. Sunagava I. Materials science of the Earth's interior. – Tokio, 1984. – 653 p.
2. Бартошинский З.В., Квасница В.Н. Кристалломорфология алмазов из кимберлитов. – Киев: Наукова думка, 1991. – 172 с.
3. Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. – М.: Наука, 1973. – 223 с.
4. Гневушев М.А., Шеманин В.И., Шеманина Е.И. Еще раз о происхождении округлых алмазов // Мин. сб. Львовск. ун-та. – 1964. – № 18, вып. 3. – С. 361–367.
5. Чепуров А.И., Пальянов Ю.Н., Хохряков А.Ф. Антискелетные кристаллы алмаза // Доклады АН СССР. – 1983. – Т. 270, № 1. – С. 213–215.
6. Шкодзинский В.С. Происхождение мантии, магм, кимберлитов и алмаза. Модель горячей аккреции Земли. – Saarbücken: Palmarium Academic Publishing, 2012. – 578 с.
7. Шкодзинский В.С. Генезис кимберлитов и алмаза. – Якутск: Медиа-холдинг Якутия, 2009. – 352 с.
8. Таблицы физических величин. Справочник / Аверин В.Г., Аронзон Б.А., Бабев Н.С. и др. – М.: Атомиздат, 1976. – 1006 с.
9. Арзунов К.П. Алмазы Якутии. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 402 с.
10. Шкодзинский В.С. Происхождение крупных алмазов кимберлитов // Отечественная геология. – 2012. – № 5. – С. 90–95.
11. Зинчук Н.Н., Коптиль В.И., Махин А.И. Типоморфные особенности алмазов из кимберлитов Северо-Востока Сибирской и Архангельской алмазоносных провинций // Вестн. Воронеж. ун-та. Геология. – 2001. – Вып. 11. – С. 106–115.

Поступила в редакцию 06.05.2013

УДК 549.514.84+549.27+549.283(571.56)

Минералы редких и радиоактивных элементов в комплексных золото-платина-алмазоносных россыпях бассейна р. Анабар на северо-востоке Сибирской платформы

А.В. Округин, А.Л. Земнухов, П.О. Иванов

Рассматриваются типохимические особенности благородных металлов и их включений, а также минералов редких элементов из комплексных алмазоносных россыпей. Обсуждается возможная связь попутных полезных компонентов данных россыпей с фанерозойскими комплексами ультрабазитов, пикритов, щелочных пород и карбонатитов, частично погребенными под мезозойскими толщами Лено-Анабарского прогиба. Показаны краткие минералого-геохимические аспекты образования серии щелочных базит-ультрабазитовых магматитов Анабарской провинции из меймечитового расплава.

ОКРУГИН Александр Витальевич – д.г.-м.н., г.н.с. ИГАБМ СО РАН, a.v.okrugin@diamond.ysn.ru; ЗЕМНУХОВ Алексей Леонидович – начальник минералогического отдела ООО «Алмазы Анабара»; ИВАНОВ Петр Олегович – главный геолог ОАО «Алмазы Анабара».