

ОНТОГЕНИЯ АЛМАЗА¹

В. В. Бескрованов



**Виктор Васильевич
Бескрованов,**
доктор геолого-
минералогических наук,
профессор Северо-Восточного
федерального университета
им. М. К. Аммосова.

Онтогенический метод позволяет прояснить многие проблемы алмазоведения, решение которых затруднено или даже невозможно без обсуждения неоднородности кристаллов [1]. Продемонстрируем возможности метода для анализа генезиса природного алмаза. Темпы роста и последующих изменений его кристаллов – одна из наиболее сложных, актуальных и запутанных проблем, решение которой позволит прояснить и связанные с ней другие вопросы.

О трудностях искусственного воспроизведения процесса мы уже рассказывали на страницах нашего журнала [2]. Ещё более сложная история его образования – в природных очагах кристаллизации. Учёные до сих пор не достигли согласия в главном аспекте этого вопроса – о глубинах его образования в недрах Земли. Казалось бы, здесь следует использовать теоретические расчёты О. И. Лейпунского, согласно которым алмаз стабилен при давлении свыше 60 кбар. В таком случае алмазы должны формироваться в стабильных для них условиях, которые создаются в верхней мантии на глубинах более 150 км, а на поверхность их, как на конвейере, должен вынести поток кимберлитовой магмы.

С таким утверждением сторонники конкурирующей гипотезы не согласны. Они убеждены в том, что алмаз кристаллизовался непосредственно в кимберлитовой магме при её движении из мантии на земную поверхность. Сверхвысокие давления, по их мнению, вовсе не обязательны для осуществления кристаллизации алмаза. Надежда на то, что ситуацию прояснит практика синтеза алмазов, не оправдалась. В настоящее время искусственные алмазы получают в широком интервале давлений – от сверхвысоких до атмосферных. Имеются и «промежуточные» представления, согласно которым, кристаллы алмаза зарождаются в мантии, а дорастают до макроразмеров в кимберлитовой магме.

Остаётся единственная возможность разрешения вопроса об условиях образования природных алмазов

путём дешифрирования генетической информации, содержащейся в кристаллах. Алмаз несёт из глубин ценнейшие сведения о физико-химических процессах, некогда происходивших в земных недрах и недоступных непосредственному наблюдению. Знаток драгоценного камня академик А. Е. Ферсман писал о том, что «... кристалл не является просто геометрическим телом, как его представлял Ромэ Делиль или Гаюи; его нельзя оторвать от той обстановки, в которой протекал его рост; он органически связан с бесконечным количеством факторов и явлений, окружающих его в период кристаллизации, и эти факторы и условия налагают на его поверхность свой отпечаток. Кристалл неизбежно несёт на себе следы предыдущих моментов своего существования, и по форме, по скульптуре его граней, мелочам и деталям его поверхности мы можем читать его прошлое» [3, с. 15].

Алмаз – один из немногих известных мантийных минералов, извергшихся из земных глубин практически в неизменном виде, благодаря прочности кристаллической решетки. Другие мантийные минералы, будучи вынесенными на дневную поверхность, разрушились или были метаморфизованы, а зашифрованная в них генетическая информация полностью или частично стёрта. Отсюда понятен интерес к алмазу специалистов широкого геологического профиля, занятых моделированием глубинных процессов. Проникновение в земные недра связано с большими трудностями. Рекордная глубина Кольской скважины составляет только 12 262 м. Но даже этот скромный результат внёс серьёзные коррективы в наши представления о внутреннем строении Земли.

Генетическая информативность алмаза не ограничена кристалломорфологией, как представлял А. Е. Ферсман. Поверхность кристалла отражает только ситуацию на завершающем этапе его развития. Интегральные физические характеристики, содержащие усреднённую

¹ Продолжение. Начало см. в № 1 (14) за 2008 г.

информацию об алмазе, в целом, также не вносят ясность в детализацию его стадийного развития в процессе эволюции.

Наиболее полные сведения о ранних этапах развития содержатся внутри самого кристалла, и проследить его индивидуальную историю (онтогению) становится возможным по последовательно выросшим зонам роста. Последние по генетическому содержанию уподобляются годовым кольцам у деревьев. Каждый годовой слой отличается на срезе по окраске, структурным особенностям древесины и содержанию в ней микроэлементов. Все эти признаки, вместе взятые, фиксируют некогда существовавшие в данной местности климатические условия, которые можно реконструировать при изучении годовых колец. Точно также по особенностям кристаллической решётки и локальным физическим свойствам алмаза в выделенной зоне роста можно судить об условиях кристаллизации в определённый период развития кристалла.

Для дешифрирования генетической информации, записанной в неоднородности кристаллов, необходимо предварительно установить соответствие между кристалломорфологическими и физическими особенностями алмаза, с одной стороны, и конкретными условиями формирования этих особенностей в природе, – с другой. Далее, решая обратную задачу, следует установить физико-химические параметры, при которых произошло образование онтогенетических областей. Кристаллы минералов, согласно выводам Н. Н. Шефталя [4], с совершенной структурой вырастают при минимальном пересыщении с помощью тангенциального механизма в условиях, близких к равновесным. При высоком пересыщении путём нормального механизма образуются кристаллы с несовершенной структурой и повышенным содержанием примесей, а также включений инородных минеральных фаз. Кроме того, для зарождения кристалла и формирования границ раздела жидкой и твёрдой фаз требуется дополнительная энергия, которая, в соответствии с теорией Фольмера, может быть получена системой за счёт флуктуаций.

Термодинамический режим кристаллизации алмаза в природных условиях обычно реконструируют по сведениям, накопленным практикой его синтеза. Установлено, что при низких температурах образуются кубические кристаллы, при средних – кубооктаэдрические и при высоких – октаэдрические. Если влияние температуры сказывается даже при отклонении на 6–12% от средней, то давление на кристалломорфологию существенного воздействия не оказывает. Его роль проявляется в другом – с ростом давления активизируются процессы образования зародышей и повышается скорость кристаллизации алмаза. По наблюдениям М. А. Гневушева, Г. О. Гомона и С. И. Футергендлера, были установлены следующие особенности алмазообразования: 1) нелюминесцирующие плоскогранные остросереберные октаэдры алмаза очень медленно выростали в условиях, близких к равновесным; 2) грубослоистые октаэдры с голубой фотолюминесценцией росли с повышенной скоростью; 3) мелкие неправильно развитые кристаллы с жёлтым свечением, подобно синтетическим, с высокой скоростью формировались в условиях, далеких от термодинамического равновесия [5].

Краткий обзор позволяет составить общее представление о взглядах исследователей на проблему генезиса

алмаза в природных условиях и обратить внимание на то, что в известной литературе освещена недостаточно или не затронута вовсе проблема эволюции условий алмазообразования. Отдельные попытки обсуждения этого вопроса целостной картины не составляют, а плата за его игнорирование приводит к неоправданным упрощениям и, как следствие, к неточным или даже неверным выводам.

Введём термины, позволяющие охарактеризовать генетическую историю алмаза. *Онтогенетический цикл* алмаза – совокупность минералогических событий, включающая зарождение, рост и все последующие изменения кристаллов. Весь цикл делится на дискретные временные интервалы – *этапы*, а последние – на более мелкие отрезки – *стадии*. Стадии соответствуют формированию гомогенных ростовых зон, а этапы – квазиоднородных областей.

Существование в кристаллах алмаза трёх квазиоднородных областей, отличающихся кристалломорфологическими и физическими признаками, наводит на мысль о трёхэтапной истории их роста, где каждый этап характеризуется индивидуальными физико-химическими условиями. Сохраним за этапами буквенную символику соответствующих областей, а временную последовательность отразим в их названиях: ранний α , промежуточный β и заключительный γ . Кристаллы, завершившие эволюцию на каждом из этапов, образовали три семейства алмаза: раннее $\{\alpha\}$, промежуточное $\{\beta\}$ и заключительное $\{\gamma\}$. Символы семейств заключены в фигурные скобки. Каждое семейство объединяет кристаллы со сходными генетическими признаками, с одинаковым сочетанием онтогенетических областей, распределённых в одинаковой объёмной последовательности.

Эволюцию условий в природных очагах кристаллизации алмаза удобно представить графически (рис. 1). Показателем физико-химического состояния среды кристаллизации выберем пересыщение среды углеродом, являющееся сложной функцией химического состава среды и термодинамических параметров. Зависимость от последних состоит в том, что степень пересыщения повышается с понижением температуры и возрастанием давления. Эволюция алмаза особенно наглядно прослеживается по габитусу кристаллов, который часто используется при описании разных алмазных месторождений и позволяет сравнить наши данные с опубликованными.

Изменение пересыщения в течение онтогенетического цикла алмаза показано на схеме сплошной линией. На неё наложены контуры обобщённых внутренних структур кристаллов алмаза, полученные в результате экспериментальных исследований большого числа кристаллов природного генезиса [1]. Справа (позиции а – е) показан предполагаемый облик кристаллов, реконструированный по внутренним структурам.

Направленный характер изменения конституции и свойств алмаза, отражённый в онтогенетических областях, позволяет предполагать следующие минералогические события. На раннем этапе произошло массовое зарождение кристаллов. Необходимая для этого дополнительная энергия, в соответствии с гипотезой Фольмера, была получена системой в результате скачкообразного возрастания (флуктуации) пересыщения среды углеродом. При достижении зародышами критического размера снижалась вероятность их разрушения и появлялась возможность свободного роста при меньших пересыщении-

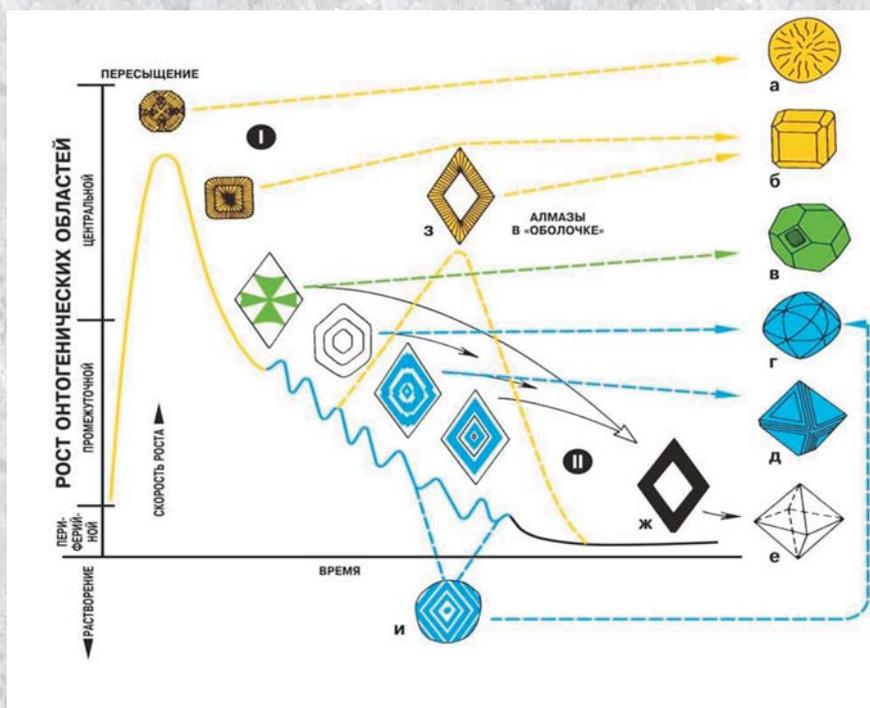


Рис. 1. Кристалломорфологическая эволюция природных алмазов.
 а – сферокристалл; б – куб с небольшими гранями ромбододекаэдра;
 в – кубооктаэдр; г – округлая форма; д – грубослоистый, е – остросереберный
 октаэдр; ж – рост периферийной области; з – регрессивное образование
 алмазов в оболочке; и – образование округлых кристаллов в результате час-
 тичного растворения. I – преимущественно нормальный, II – преиму-
 щественно тангенциальный механизмы роста.

колебания условий кристаллизации, отражённые в тонкой октаэдрической зональности соответствующей области. Иногда эти колебания были настолько значительными, что достигались условия стабильности центральной области (см. рис. 1, з). Этим мы объясняем генезис алмазов в «оболочке» (coated diamonds). У таких монокристаллов зональная неоднородность выражена прозрачным бесцветным ядром октаэдрической формы и оболочкой, имеющей вид мутной непрозрачной зоны молочно-белого, серого или жёлтого цвета. Алмазное вещество оболочки имеет свойства центральной области, а ядра – промежуточной. В пользу регрессивного изменения эволюционного процесса свидетельствует установленная для алмазов в оболочке тенденция смены октаэдрического габитуса на кубический по мере увеличения толщины оболочки (рис. 2). Эта тенденция подтверждена нами в результате исследований кубического образца 3130 [2, см. рис. 1, з и рис. 2].

Флуктуации в среде кристаллизации алмаза происходили не всегда в сторону увеличения пересыщения. Равноправны были процессы с уменьшением пересыщения (см. рис. 1, и), и тогда достигались условия, при которых энергетически был выгоден уже не рост, а растворение. В результате частичного растворения плоскогранные октаэдры преобразовывались в кривогранные додекаэдриды и октаэдриды. Округлая форма природных алмазов могла возникнуть как в результате роста (см. рис. 1, з) на промежуточном этапе, так и изменения плоскогранных кристаллов при падении пересыщения (см. рис. 1, и).

И, наконец, третий, заключительный этап осуществлялся в спокойных и свободных условиях, близких к термодинамическому равновесию. Гомогенность зон и

ях. Кристаллизация центральных областей происходила вдали от термодинамического равновесия при высоком пересыщении, о чём свидетельствует структурная дефектность кристаллов, отклонение их от правильной октаэдрической огранки и жёлто-зелёная фотолюминесценция. Быстрая кристаллизация сопровождалась образованием многочисленных структурных дефектов и захватом микрочастиц инородных минеральных фаз (менее 10 мкм). Более крупные включения (затравки) имеют протогенетическую природу. Часть образцов оборвала свою эволюцию после формирования центральной области и целиком сложена только алмазами этой области.

На промежуточном этапе β степень пересыщения снизилась, но оставалась выше равновесной. Кристаллы, оборвавшие эволюцию на промежуточном этапе, обладают кристалломорфологическими и физическими свойствами, которые обычно приписывают природному алмазу как минеральному виду в целом. Индивиды, выделившиеся на этом этапе, преобладают в общей массе алмазного сырья известных месторождений, из чего следует, что промежуточный этап был самым продуктивным.

Отличительной чертой промежуточного этапа были периодические

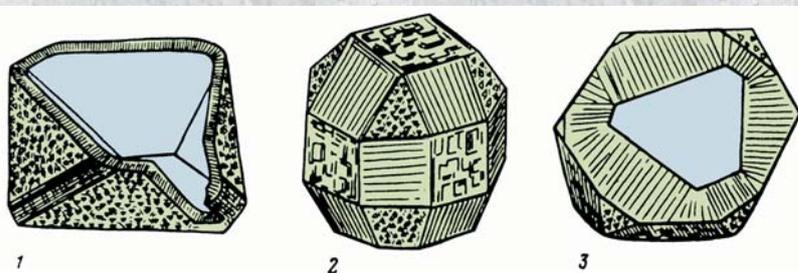


Рис. 2. Изменение габитуса кристаллов алмаза в оболочке с увеличением её толщины (по Ю. Л. Орлову):
 1, 2 – октаэдр: 1 – с узкими гранями ромбододекаэдра, 2 – с гранями ромбододекаэдра и куба; 3 – куб с небольшими гранями октаэдра и ромбододекаэдра.

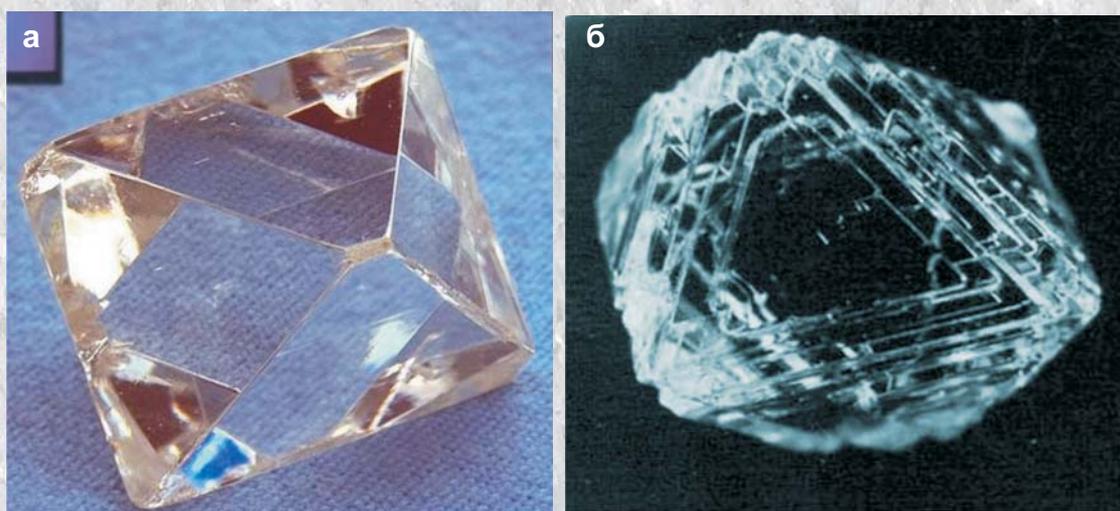


Рис. 3. Октаэдрические кристаллы алмаза разных семейств:
а – острореберный октаэдр заключительного семейства { γ } (кимберлитовая трубка «Мир»);
б – грубослоистый октаэдр промежуточного семейства { β } (кимберлитовая трубка «Удачная»).

совершенство кристаллической структуры алмаза периферийной области подтверждают это.

Для объяснения генезиса алмазов в оболочке, а также кривогранных кристаллов, потребуется использование двух дополнительных этапов – регрессивного η и деструктивного (изменённого) ω , по окончании которых выделились группы кристаллов, образовав соответственно регрессивное $\{\eta\}$ и деструктивное $\{\omega\}$ семейства.

Кратко охарактеризуем свойства алмаза всех 5 онтогенетических семейств. Раннее семейство $\{\alpha\}$ представлено квазиоднородными кристаллами пониженной прозрачности, содержащими частицы инородных минеральных фаз. Это кубы, округлобугорчатые и другой искажённой формы, а также поликристаллические разновидности алмаза: борт, карбонадо и баллас. Для них характерна дефектная кристаллическая структура и фотолюминесценция жёлто-зелёного, оранжевого и зелёного цветов. Промежуточное семейство $\{\beta\}$ образовано преимущественно грубослоистыми октаэдрами (рис. 3, б) с голубой люминесценцией. Заключительное семейство $\{\beta\}$ составлено полнозональными кристаллами с совершенной структурой, имеющими близкий к идеальному габитус острореберного октаэдра (рис. 3, а). Регрессивное семейство $\{\eta\}$ охарактеризовано при описании алмазов в оболочке (см. рис. 2). В деструктивном (изменённом) семействе $\{\omega\}$ преобладают округлые додекаэдровиды и октаэдровиды. Физические характеристики этого семейства идентичны соответствующим свойствам промежуточного, из представителей которого оно и было преобразовано в результате частичного растворения. Деструктивное семейство $\{\omega\}$ преобладает в общей массе алмазов уральских и бразильских россыпей, а также россыпей на северо-востоке Якутской алмазоносной провинции.

Алмазы в природе характеризуются широким разнообразием кристалломорфологии и физических свойств даже в пределах одного месторождения. В соответствии с традиционными представлениями это явление связывают с привнесением кристаллов алмаза из разных генетических источников, что неприменимо к кимберлитовым трубкам, в руде которых перемешаны разнообраз-

ные по габитусу и физическим характеристикам кристаллы. В рамках онтогенетического подхода разнообразие алмаза находит логическое объяснение в завершении развития алмаза на одном из пяти этапов.

Онтогенетический анализ позволяет получить представление о фазовом состоянии среды геохимического цикла. основополагающие характеристики периферийной области и кристаллов заключительного семейства свидетельствуют в пользу их роста в свободных условиях, что может быть достигнуто в жидкой фазе. В противоположность этому искажённый облик квазиоднородных кристаллов раннего семейства и следы сингенетических механических сколов центральной области свидетельствуют о механической активности среды и её высокой вязкости. Обе возможности могли реализоваться преимущественно в твёрдой фазе.

В заключение подчеркнём, что несмотря на отдельные особые качества и свойства, природный алмаз занимает, в целом, рядовую позицию среди представителей минерального мира. Отсюда естественно предположение, что основные принципы эволюции алмаза можно распространить и на эволюцию других минералов.

(Продолжение следует).

Список литературы

1. Бескрованов, В. В. Онтогенез алмаза / В. В. Бескрованов. – М.: Наука, 1992. – 167 с.; 2-е изд., исп. и доп. – Новосибирск: Наука, 2000. – 363 с.
2. Бескрованов, В. В. Онтогенез алмаза / В. В. Бескрованов // Наука и техника в Якутии. – 2008. – № 1 (14). – С. 79–84.
3. Ферсман, А. Е. Кристаллография алмаза / А. Е. Ферсман. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – С. 15.
4. Шефталъ, Н. Н. К вопросу о реальном кристаллообразовании / Н. Н. Шефталъ // Рост кристаллов. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – Т. 1. – С. 3–29.
5. Гневушев, М. А. О связи люминесценции алмаза с некоторыми другими его свойствами / М. А. Гневушев, Г. О. Гомон, С. И. Футергендлер // Минерал. сб. Львов. ун-та. – 1963. – № 17, вып. 1. – С. 82–89.