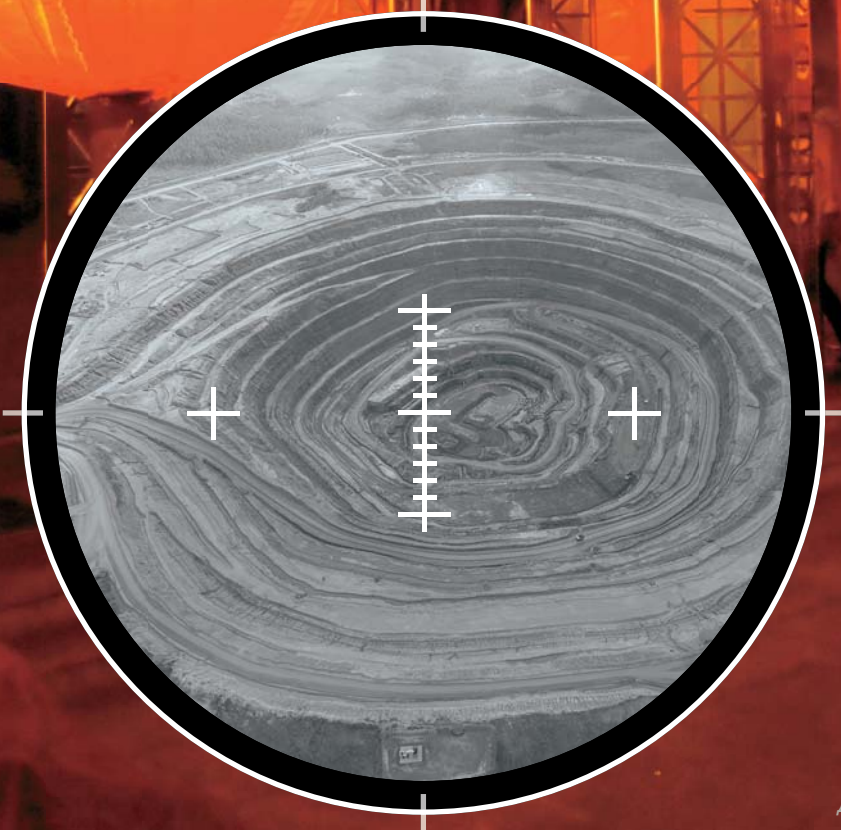


Алмазные раритеты: «КИТАЙСКИЙ ФОНАРИК»

А. Д. ПАВЛУШИН, Л. Д. БАРДУХИНОВ, Д. В. КОНОГОРОВА



© А. Д. Павлушин,
Л. Д. Бардухинов,
Д. В. Коногорова, 2021

Сбор и экспонирование природных алмазов самых причудливых форм и редкого цвета уже стали традицией компании АК «АЛРОСА», одного из мировых лидеров алмазодобывающей отрасли. И это не просто корпоративное хобби. Поиск уникальных экземпляров среди огромной массы добытых алмазов ведется целенаправленно, и значимость каждой находки оценивает группа экспертов. Некоторые из этих диковин уже получили собственные имена, широкую мировую известность и стали объектами тщательного минералогического исследования. И хотя стоимость некоторых миниатюрных кристаллов, не являющихся ювелирным сырьем, мала, такие находки бесценны как уникальные произведения природы и хранители информации об условиях своего образования. Герой сегодняшней истории – алмаз «Китайский фонарик», напоминающий это праздничное украшение своим оригинальным обликом и дольчатым рельефом поверхности, как будто «склеенной» из фрагментов, как у его бумажного «оригинала»



Ключевые слова: алмаз, кимберлит, кристаллическая решетка, морфология кристаллов, двойникование, двойниковые сростки, алмаз «Китайский фонарик».

Key words: diamond, kimberlite, crystal lattice, crystal morphology, twinning, twinned aggregates, Chinese Lantern diamond



ПАВЛУШИН Антон Дмитриевич – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геологии и петрологии алмазодобывающих провинций Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН (Якутск). Автор и соавтор 60 научных работ



БАРДУХИНОВ Леонид Данилович – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией комплексного изучения алмазов Научно-исследовательского геологического предприятия АК «АЛРОСА» (Мирный). Автор и соавтор 23 научных работ



КОНОГОРОВА Диана Викторовна – инженер лаборатории месторождений алмаза Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. Автор и соавтор 10 научных работ



Природные кристаллы алмаза с уникальными свойствами представляют интерес не только для коллекционеров раритетов. Они важны прежде всего с научной точки зрения – специалисты могут «читать» их как книгу с жизнеописанием камня.

Особенности каждого такого кристалла, как правило, характерны лишь для определенной алмазоносной *кимберлитовой* трубки* или целого алмазоносного района. Их особые морфологические характеристики называют *типоморфными*. Они служат своего рода индикаторами специфических условий существования кристалла на всех этапах его жизни: образование в мантии, растворение и механическое разрушение, паузы в кристаллизации и возобновление роста, транспортировка из глубин к поверхности земной коры, формирование кимберлитового тела и все последующие изменения.

Все эти процессы оставляют свой след во внутреннем строении алмаза или на его поверхности. Другими словами, в морфологии каждого алмазного индивида «записана» история его жизни. Геологи называют этот метод исследования минералов *онтогенетическим*. Попробуем и мы с его помощью прочитать историю «Китайского фонарика» – необычного алмаза весом 1,95 карат, извлеченного АО «Севералмаз» (подразделением АК «АЛРОСА») в 2019 г. на горно-обогатительном комбинате архангельского месторождения алмазов имени М. В. Ломоносова, где перерабатывают кимберлиты сразу из двух трубок: Архангельской и Карпинского-1.

* *Кимберлиты* – магматические горные породы, образующие трубки взрыва

Кимберлитовая трубка «Архангельская» вместе с другими пятью трубками относится к месторождению имени М. В. Ломоносова. Это крупнейшее коренное месторождение алмазов в европейской части России расположено около пос. Поморье (Архангельская область). Оно было открыто в 1980 г., добыча ведется с 2005 г. Самый большой алмаз весом 50,1 карат был найден здесь в 2010 г. Фото Н. Гернета. Публикуется с разрешения АО «Севералмаз»



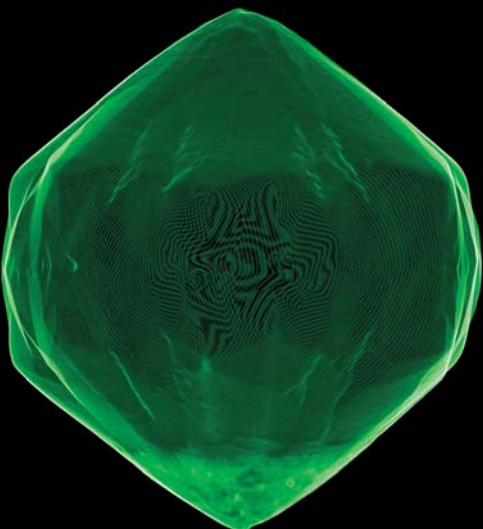
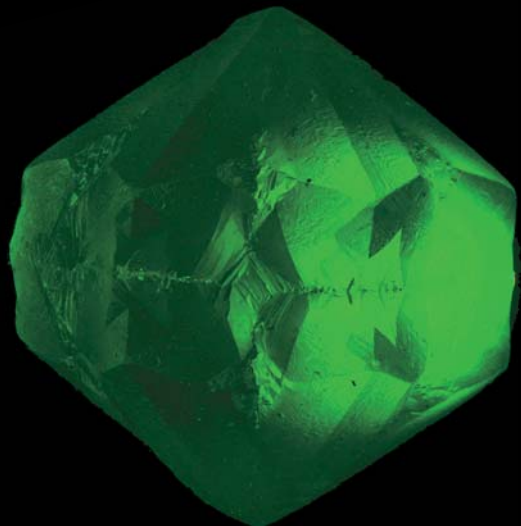
Алмаз «Матрешка». Кадр видеосъемки «АЛРОСА»

АЛМАЗ В АЛМАЗЕ

Коллекция необычных алмазов АК «АЛРОСА» создана и пополняется новыми находками по инициативе главного эксперта Единой сбытовой организации Л. А. Демидовой. Благодаря ее усилиям у минералогов и кристаллографов впервые появилась возможность детально изучить совершенно уникальные и загадочные по форме алмазы, отобранные при сортировке многочисленным коллективом геммологов из множества добытых кристаллов. И это гигантские цифры, ведь объем годовой добычи компании составляет более 30 млн карат алмазов в год, и весь этот поток до сих пор проходил мимо исследователей.

Самый известный раритет коллекции – алмаз «Матрешка» весом 0,62 карата. Этот кристалл имеет полость объемом 6 мм³, где свободно перемещается алмаз меньшего размера, потому алмаз сначала назвали «Погремушка». По расчетам, внутренний кристалл весит всего лишь 0,02 карата и представляет собой уменьшенную копию своего алмазного «футляра». Уникальный кристалл был добыт в 2019 г. из трубки «Нюрбинская» Накынского кимберлитового поля (Якутия). Находка не имеет аналогов в истории алмазодобычи, и алмаз получил мировую известность.

Специалисты выдвинули ряд гипотез относительно образования «Матрешки» (Коногорова и др., 2020; Wang *et al.*, 2020; Fritsch, 2021). Однако ни одна из них не дает исчерпывающего ответа о причинах и условиях появления уникальной формы кристалла. Ясно только, что оба эти алмаза образовались приблизительно в одно время, при одинаковых давлении и температуре из общего мантийного источника. Об этом свидетельствуют похожая форма кристаллов, следы совместного роста, одинаковый набор примесных и структурных дефектов и однородная люминесценция



Как светит «фонарик»

«Китайский фонарик» недаром получил свое имя – он может светиться ярко, как настоящий фонарик, но особенным, ядовито-желтым цветом и только в ультрафиолетовых лучах. Под воздействием луча лазера в кристалле возникает свечение, в котором преобладает зеленый оттенок.

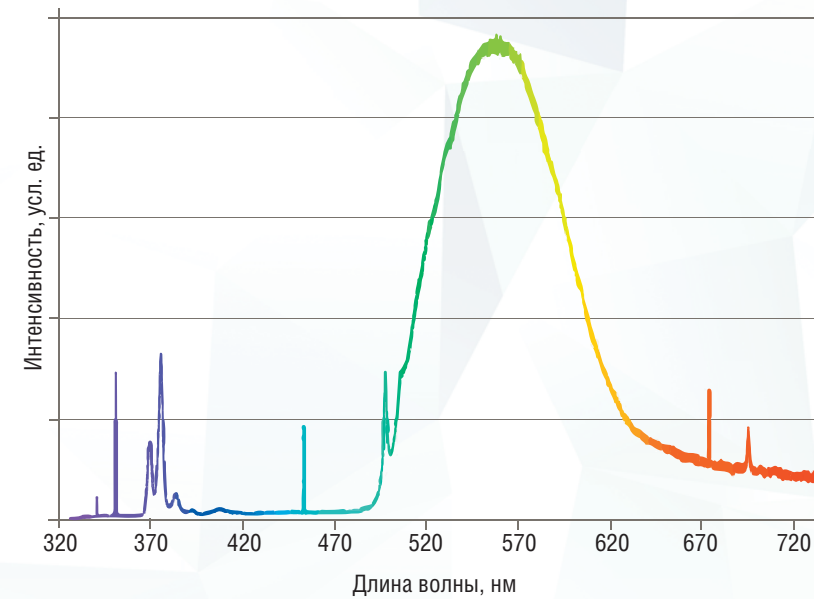
Спектральная характеристика любого алмаза в ультрафиолетовой и инфракрасной областях является уникальным генетическим свойством кристалла, обязательным для изучения. Характер свечения, оптического поглощения и пропускания света определяется присутствием различных примесей и дефектов структуры в кристаллической углеродной решетке алмаза, а их появление отражает все события, связанные с условиями его зарождения, роста и существования в природных условиях.

На графике спектра фотолюминесценции «Китайского фонарика» отчетливо виден максимум свечения, который приходится на границу между областями, соответствующими желтому и зеленому цветам. Это говорит о присутствии в кристаллической структуре дефектов определенного типа – содержащих атомы азота. Азот как элемент, самый близкий к углероду на атомном уровне, является основной примесью в кристаллах алмаза и может образовывать различные дефекты в их структуре.

По спектру поглощения в инфракрасном диапазоне в кристалле было установлено высокое (1375 ат. ppm) содержание структурной примеси азота. Также зафиксировано относительно низкое (25%) содержание структурного В-дефекта, представляющего собой четыре сгруппированных атома азота с вакантным местом в кристаллической решетке, не занятым никаким атомом. Этот дефект появляется в структуре алмаза не сразу, а трансформируется из дефектов, возникших еще на стадии роста кристалла при его длительном нахождении в высокотемпературных условиях. Такие особенности учитывают при оценке времени и температурного режима пребывания алмаза в мантии Земли.

Важно отметить и высокое содержание в алмазе «Китайский фонарик» структурной примеси водорода. Его наличие и очень необычная желто-зеленая люминесценция весьма характерны для алмазов из архангельского месторождения им. М. В. Ломоносова и являются для них типоморфными характеристиками.

На фото сверху вниз: алмаз «Китайский фонарик» в видимом, ультрафиолетовом свете, а также на рентгеновском томографе (срез)



Зарегистрированный спектр фотолюминесцентного свечения алмаза «Китайский фонарик». График раскрашен с использованием палитры, соответствующей реальным цветам (длинам волн) спектра в границах видимого диапазона (от фиолетового до красного)

Алмазные «близнецы»

Что касается морфологии нашего алмаза, то его формирование связано с явлением *двойникования* кристаллов – внешне геометрически правильного, а с точки зрения кристаллографа закономерного *симметричного* срастания двух или даже нескольких кристаллов в один сросток.

Двойникование кристаллов любой геометрической формы возможно благодаря тому, что во время роста алмаза его кристаллическая решетка, как в зеркале, симметрично отражается в строении дублера. Это происходит подобно тому, как кирпичная кладка одной стены здания встречается на углу с другой. Таким образом, контакт кристаллических структур сдвойникованных кристаллов идет без нарушения их целостности, и каждый из них без помех транслируется в кристалле-двойнике. В результате образуется цельный кристалл, состоящий из двух зеркально отраженных «двойников» к примеру, из двух кубических индивидов, как в данном случае.

«Китайский фонарик» сначала был ошибочно отнесен геммологами к так называемым *циклическим двойниковым сросткам*. В этом случае в сростке симметрично соединены три-пять кристаллов, последовательно занимающие свое положение вокруг одной общей оси – совсем как в карусели. Но когда наш алмаз подробно изучили кристаллографы, то пришли к выводу, что его следует отнести к другому типу закономерного срастания кристаллов – *двойнику прорастания*.

Двойниковый сросток «Китайского фонарика» состоит из двух кубических кристаллов, однако их ребра настолько сгладились в результате природного растворения, что с первого взгляда распознать их бывшую



Александр Евгеньевич Ферсман – выдающийся российский и советский минералог, известный популяризатор науки. Фото из Минералогического музея им. А. Е. Ферсмана РАН (Москва)

Изучением свойств и происхождения алмазов 25-летний Александр Ферсман занялся в 1908 г. совместно с профессором Гейдельбергского университета, немецким кристаллографом В. Гольдшмидтом. Исследование кристаллов проводилось с помощью нового прибора – «двукружного гониометра», только что изобретенного великим кристаллографом Е. С. Федоровым, директором Петербургского горного института. Конструкция и работа прибора были основаны на теодолитном методе построения проекций кристаллов, напоминающем принципы отсчета координат и вычислений в астрономии и географии. Благодаря этому новшеству впервые удалось изучить сложные искривленные формы поверхностей кристаллов алмаза из россыпей Бразилии, Африки и Индии. Ставшая по праву классическим произведением монография Ферсмана и Гольдшмидта «Алмаз» (1911) была настольной книгой для многих поколений минералогов, изучающих происхождение алмазов

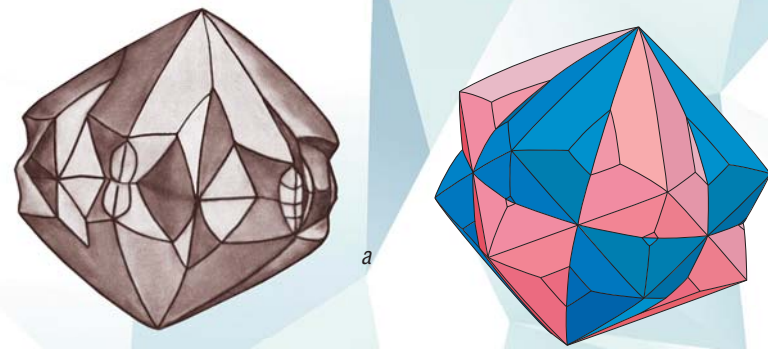
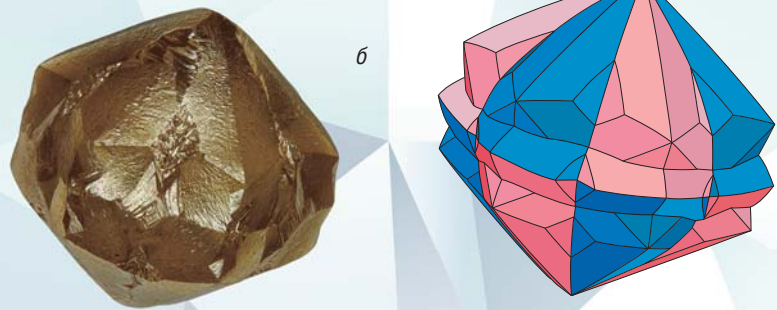


Рис. А. Е. Ферсмана.
По: (Ферман и Гольдшмидт, 1911)



Залогом успешной исследовательской работы А. Е. Ферсмана стала предоставленная ему уникальная возможность лично пересмотреть сотни тысяч карат алмазов на биржах Франкфурта, Генау, Идаре и Берлина, торгующих драгоценными камнями. Много лет спустя Александр Евгеньевич вспоминал: «Целыми часами я отбирал наилучшие кристаллы этого диковинного минерала, не замечая, что при помощи системы зеркал за моими руками наблюдали из другой комнаты, учитывая каждое мое движение. Отобранные камни через банк отправляли в Гейдельбергский университет, где они и поступали на исследование.» (Перельман, 1983)

форму, как и сам двойник прорастания, неопытному специалисту очень сложно.

Подобные двойники кубических кристаллов были подробно изучены еще в начале XX в. классиком кристаллографии алмазов А. Е. Ферсманом. В монографии *Der Diamant* («Алмаз»), которую он вместе со своим учителем В. Гольдшмидтом опубликовал в 1911 г., приведены изображения аналогичных по форме сростаний алмазов, в то время известных исключительно по образцам из алмазных россыпей Бразилии. Если сравнить фотографии «Китайского фонарика» и рисунок, весьма реалистично выполненный рукой самого Ферсмана, то может показаться, что он изобразил именно его, настолько близка внешняя морфология этих кристаллов.

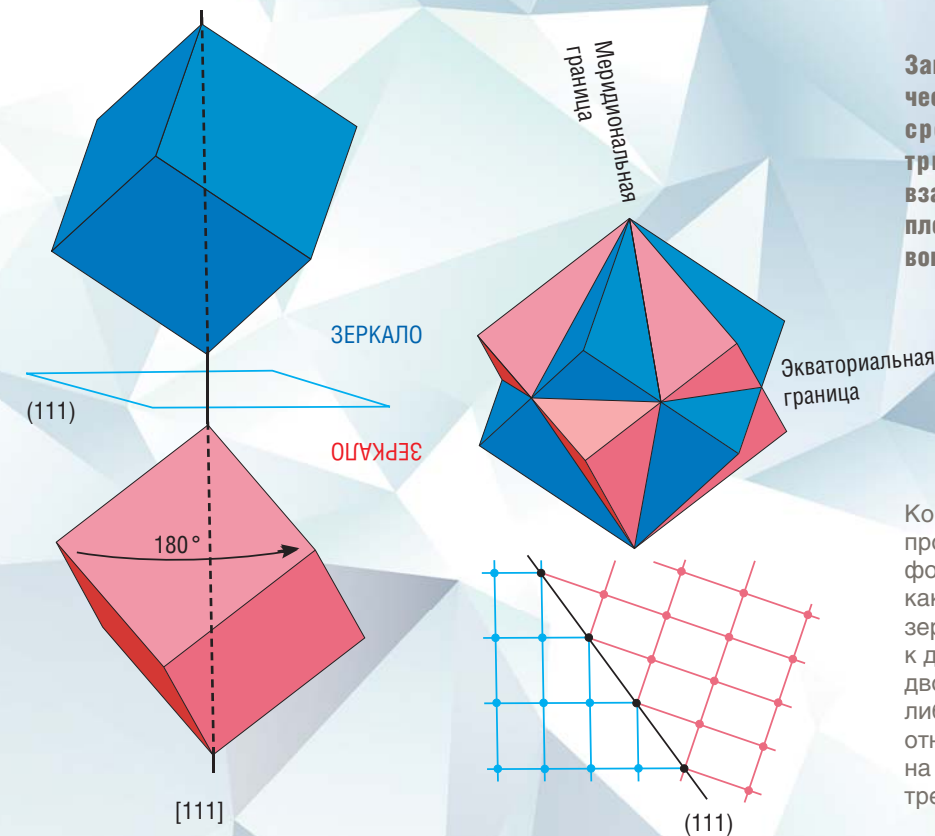
Такое разительное сходство говорит о близости типоморфных свойств и генетических особенностей образования архангельского и бразильского двойников алмазов. Однако изучение подробностей микроморфологии поверхности «Китайского фонарика» позволило сделать вывод, что, помимо общих черт, наш сросток кристаллов еще до этапа растворения имел более сложное строение. Для его описания необходимо прибегнуть к специфическим терминам, которые используют в кристаллографии при *симметричном анализе*.

Двойниковый сросток кристалла алмаза из бразильских россыпей (а) по внешнему виду очень напоминает алмаз «Китайский фонарик» из архангельского месторождения (б), однако строение последнего сложнее: вдоль границы срастания двух кристаллов расположен комплекс дополнительных граней

В нашем случае структурные компоненты двойника можно представить как два кубических кристалла, зеркально обращенные друг к другу в плоскости двойникования, обозначаемой символом (111). Эта образная операция симметричного анализа объектов в виде зеркальных отражений дает четкое представление о взаимной ориентировке кристаллов в закономерном сростке. Также их можно показать с помощью другой операции симметрии: как кристаллы, повернутые относительно друг друга на 180° по оси [111] – *поворотной оси симметрии третьего порядка* (так в кристаллографии называется воображаемая ось, совершая полный оборот вокруг которой кристалл трижды совмещается сам с собой).

Описанное условие симметрии срастания кристаллов известно как *шпинелевый закон* двойникования кристаллов кубической симметрии. К таким минералам относится в первую очередь сама *шпинель*, а также *алмаз*, *флюорит*, *магнетит*, *лопарит* и др. В отличие от простых «контактных двойников», соединенных друг с другом по одной общей границе, каждый сегмент «двойников прорастания» изолирован собственными «экваториальными» и «меридиональными» границами и отвечает общему закону симметрии. При этом внешне сросток выглядит так, как если бы один кристалл проник в другой.

В алмазе «Китайский фонарик» эта конструкция оказалась усложнена дополнительными



Закономерная ориентировка кубических кристаллов в двойниковом сростке подразумевает симметричные преобразования путем взаимного отражения в зеркальной плоскости или операцию вращения вокруг воображаемой оси

Компоненты кристалла-двойника прорастания алмаза «Китайский фонарик» можно представить как кубические кристаллы, зеркально обращенные друг к другу в плоскости двойникования (111), либо как повернутые относительно друг друга на 180° по оси симметрии третьего порядка [111]

кристаллическими блоками, что потребовало более детальной расшифровки всей симметричной постройки. Вдоль «экваториальной границы» срастания этого двойникового сростка можно увидеть сложное нагромождение дополнительных граней, напоминающее гармошку. Анализ морфологии кристаллической поверхности вдоль линии соприкосновения показал, что здесь произошло дополнительно параллельное срастание кристаллов. В результате возникло еще два сегмента у граней, опоясывающие двойниковый шов.

По-видимому, этот сложный комплекс дополнительных граней обязан своим происхождением самой поверхности двойникования – именно ее рост вызвал параллельные сдвиги и симметричные двойниковые деформации кристаллической структуры.

Как растворяется алмаз

Двойниковые сростки кристаллов растворяются по тем же законам, что и одиночные кристаллы, образуя криволинейные округлые формы. Впервые эту закономерность также сформулировал А. Е. Ферсман в знаменитой монографии, написанной на основе изучения алмазов из Бразилии. С тех пор криволинейные округлые

кристаллы алмаза, перенесшие глубокое растворение, относят к алмазам *бразильского типа*. Позднее аналогичные по форме кристаллы были обнаружены в уральских россыпях, и *уральский тип* алмаза стал синонимом «бразильского».

Изучив уральские алмазы, следующее поколение российских корифеев минералогии алмаза – ленинградские ученые И. И. Шафрановский (1948) и А. А. Кухаренко (1955), а также лауреат премии им. А. Е. Ферсмана Ю. Л. Орлов (1973) составили четкую классификацию форм растворения. Они выделили три основных типа искривления граней: «гексаэдроида», «октаэдроида» и «додекаэдроида».

Аналогичные формы кристаллов получили в 1986 г. новосибирские исследователи Ю. Н. Пальянов и А. Ф. Хохряков при растворении природных и синтетических кристаллов алмаза различной формы в водосодержащих карбонатно-силикатных расплавах, используя температуры около 1300 °С и давление 5,0–5,5 ГПа, т. е. около 50 тыс. атмосфер. Так была подтверждена гипотеза о происхождении этих алмазов, установлены условия растворения и описаны закономерности появления криволинейных форм растворения в зависимости от первоначальной формы кристалла.



Яркое подтверждение модели эволюции растворения кубических кристаллов дает изучение морфологии алмазов (кубоидов II разновидности) из россыпи Маят, расположенной в Анабарском районе за полярным кругом. По сравнению с простой схемой формирования сферических поверхностей растворения у природных алмазов здесь можно найти практически весь спектр промежуточных морфологических типов. Фото А. Павлушина

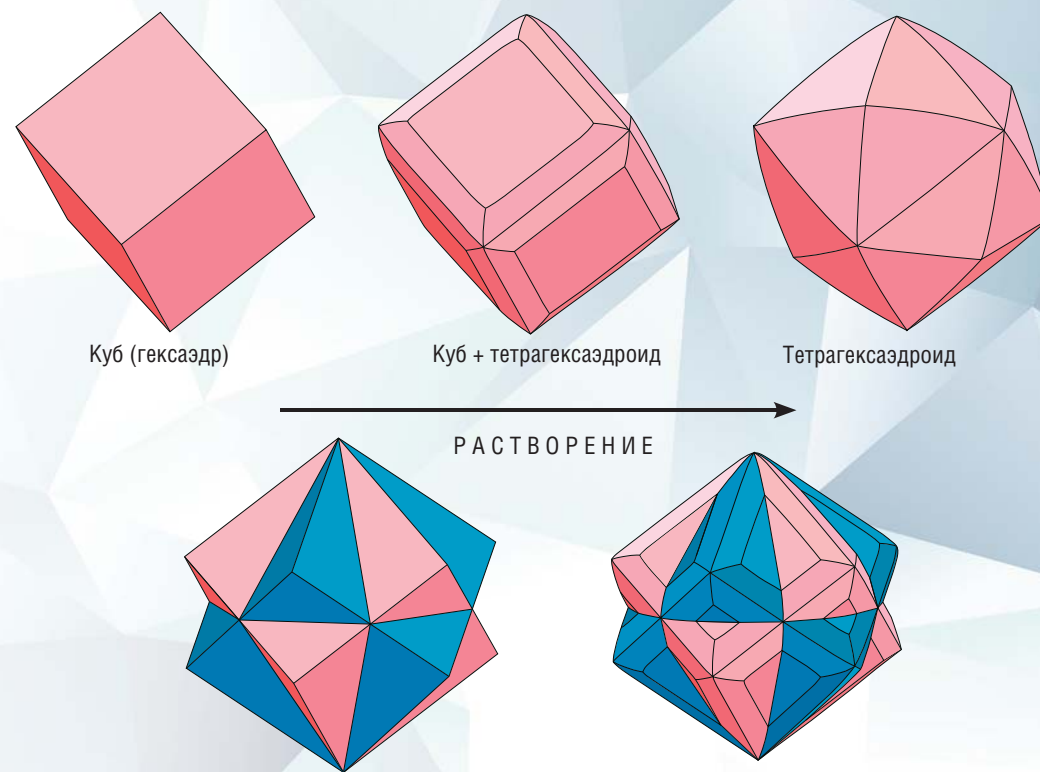
четырёхугольных ямок травления. Все эти типичные признаки растворения есть и у архангельского алмаза «Китайский фонарик».

Надо сказать, что со временем подобные по форме кривогранные кристаллы алмаза стали находить в россыпях Южной Африки, Намибии, Индии и Южной Австралии, а также на Урале. Особый интерес представляет тот факт, что их коренной источник, из которого они мигрировали в россыпи, как правило, остается неизвестным. Геологами высказывались даже предположения о существовании коренного источника ранее неизвестного генетического типа.

До сих пор этот актуальный вопрос не разрешен и для российских геологов: почему подобные кристаллы не найдены ни в одной из известных кимберлитовых трубок Якутии, хотя в изобилии встречаются в промышленных якутских россыпях на северо-востоке Сибирской платформы в междуречье Лена – Анабар. И с этой точки зрения архангельские кимберлитовые трубки уникальны, ведь до сих пор подобные алмазы с искривленными гранями в значительных количествах находят лишь там!

Здесь нужно добавить, что первые попытки получить подобные округлые формы кристаллов в опытах по растворению алмазов в расплаве селитры (при 800–900 °С) были предприняты еще самим А. Е. Ферсманом и его наставником В. М. Гольдшмидтом. Вероятно, их успеху помешало лишь несовершенство технического оснащения, но уже тогда в выводах в своей монографии авторы подчеркивали, что им «удалось экспериментально подтвердить, что округлые грани алмаза связаны с процессами растворения...».

Всего в ходе природного растворения на месте граней куба образуются 24 выпуклые искривленные грани, которые в совокупности составляют округлый тетрагексаэдр. В результате плоскогранные кристаллы алмаза постепенно превращаются в округлые многогранники с выпуклыми поверхностями. Наиболее значительному растворению подвергаются выступающие вершины и ребра кристаллов – в этих направлениях поверхности искривлены максимально. На реликтах плоских граней появляется геометрический узор, состоящий из множества микроскопических



Последовательность растворения кубических кристаллов, составляющих двойниковый сросток «Китайского фонарика»

Результаты многочисленных исследований позволяют утверждать, что морфология кривогранных алмазов из архангельских трубок и россыпей из других алмазоносных регионов во многом определяется значительным растворением (а значит, и потерей первичного веса кристалла) в самой мантии Земли либо во время их транспортировки к поверхности земной коры в расплаве, насыщенном флюидами – смесью жидких и газообразных компонентов магмы.

Флюиды чрезвычайно агрессивны по отношению к алмазам и могут растворить их за считанные часы. Возможно, именно по этой причине многие кимберлитовые трубки не содержат алмазы – они просто не успевают достичь поверхности с глубин, превышающих 100–150 км. Поэтому неудивительно, что нас заинтересовало сходство морфологии двойниковых сростков бразильских кристаллов, тщательно изученных в свое время академиком Ферсманом, с архангельским «Китайским фонариком», который, очевидно, имеет такое же происхождение, что и якутские россыпные алмазы. В этом смысле он представляет интерес не только с точки зрения научного познания мира кристаллов, но и с практической – поиска новых, неизвестных алмазоносных объектов. Возможно, их аналогом являются те самые кимберлитовые трубки Архангельской алмазоносной провинции, где и был добыт наш герой, проживший такую увлекательную, насыщенную событиями «минеральную жизнь».

Литература

Коногорова Д. В., Ковальчук О. Е., Бардухинов Л. Д. Уникальный алмаз из трубки Нюрбинская (Накынское кимберлитовое поле, Западная Якутия, Россия) // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2020. Т. 25. № 2. С. 45–55.

Павлушин А. Д., Зедгенизов Д. А., Пироговская К. Л. Кристалломорфологическая эволюция роста и растворения кривогранных кубических кристаллов алмаза II разновидности из россыпей Анабарского алмазоносного района // *Геохимия*. 2017. № 12. С. 1141–1152.

Ферсман А. Е. Кристаллография алмаза. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 580 с. Fritsch E. Revealing the Formation Secrets of the Matryoshka Diamond // *J. Gemmology*. 2021. V. 37(5). P. 528–533.

Авторы благодарят сотрудников АО «Севералмаз», главного геолога И. С. Зезина и начальника цеха сортировки алмазов П. В. Гриба; сотрудников компании АК «АЛРОСА», главного эксперта Е. С. Л. А. Демидову, И. В. Глушкову, А. Н. Липашову, а также сотрудников Минералогического музея им. А. Е. Ферсмана