

УДК 549.211:548.4

ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ И ОБРАЗОВАНИЯ ДВОЙНИКОВ ПРОРАСТАНИЯ КУБИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ АЛМАЗА

© 2025 г. А. Д. Павлушин

*Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН,
пр. Ленина, 39, Якутск, 677000 Россия
e-mail: pavlushin@diamond.ysn.ru*

Поступила в редакцию 08.06.2024 г.

После доработки 09.08.2024 г.

Принята к публикации 11.09.2024 г.

В статье приводится кристалломорфологический анализ двух аналогичных по форме двойников прорастания кубических кристаллов — именного алмаза «Китайский фонарик» (Архангельская алмазоносная провинция) из коллекции компании «АЛРОСА» и бразильского алмаза, подробно описанного академиком А.Е. Ферсманом. Сопоставление результатов изучения этих алмазов, выполненного с использованием оригинальных методик интерпретации морфологических признаков роста и растворения кристаллов, позволило выявить ряд кристалломорфологических особенностей, характерных для закономерных сростков данного типа. Кроме типичных для кубоидов тетрагональных ямок, лентообразной, зубчатой и каплевидной форм скульптуры микрорельефа растворения поверхности, на архангельском алмазе обнаружен новый тип симметричного микрорельефа пилообразной формы, связанного с травлением октаэдрических слоев роста кубоида. По высоте заложения и направлению ступеней рельефного узора определена последовательность появления перечисленных типов микрорельефа по мере увеличения глубины растворения и степени изменения кривизны поверхности тетрагексаэдроид на двойниках кубоидов. Раскрыта природа происхождения характерной для двойников прорастания экваториальной гряды октаэдрических граней, в виде острого гребня, опоясывающего шов двойникования между кубоидами. Показано, что ее появление связано с ранним этапом закономерного срастания волокнистых кубоидов алмаза и является основным условием его возникновения, сначала в виде двойника прорастания плоскогранных октаэдрических кристаллов. Обсуждается сходство кристалломорфологических признаков растворения кривогранных кубоидов из кимберлитов Архангельских трубок и россыпных источников Бразилии и севера Якутской алмазоносной провинции.

Ключевые слова: алмаз «Китайский фонарик», двойник прорастания, кристалломорфология, кубоид, микрорельеф растворения, редкие формы алмаза, тетрагексаэдроид, типоморфизм, шпинелевый закон двойникования

DOI: 10.31857/S0016752525020032, EDN: GPUTLD

ВВЕДЕНИЕ

Краткое описание уникального алмаза «Китайский фонарик» (рис. 1а) ранее было опубликовано в научно-популярном журнале (Павлушин и др., 2021). Этот алмаз — один из ярких представителей коллекции кристаллов алмаза редкой и необычной формы, собранной компанией АК «АЛРОСА» (ПАО). Для объяснения происхождения и условий образования этих уникальных минералогических объектов был проведен сравнительный анализ ярко выраженных типоморфных признаков двойниковых сростков природного алмаза и аналогичных находок

кристаллов. Обращает на себя внимание поразительное внешнее сходство архангельского алмаза «Китайский фонарик» с зарисовками двойникового сростка кристаллов весом 25 мг (0.13 кар.), добытого в Бразилии (рис. 1б), подробно рассмотренного в монографии А.Е. Ферсмана и В. Гольдшмидта (Fersman, Goldschmidt, 1911; Ферсман, 1955). Отмеченная аналогия этим не ограничивается. Типоморфные особенности архангельских алмазов и близость их морфологических характеристик с таковыми для кривогранных кристаллов «бразильского»/«уральского» типа из россыпей Урала, Якутии и Бразилии, источники которых до сих пор неизвестны, позволяют

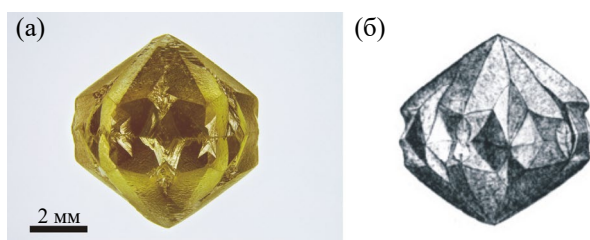


Рис. 1. Двойники прорастания гексаэдрических кристаллов алмаза: (а) архангельский алмаз «Китайский фонарик» из коллекции АК «АЛРОСА» (ПАО); (б) оригинальный рисунок бразильского алмаза из монографии (Fersmann, Goldschmidt, 1911).

предполагать для них единый генетический тип, отражающий специфические особенности формирования коренного месторождения. Алмазы из перечисленных регионов также генетически связывает широкая распространенность среди кристаллов кривогранных тетрагексаэдров и подобие их формы растворения (Павлушин и др., 2017). В данной статье представлены результаты детального изучения типоморфных особенностей уникального двойникового сростка кубических кристаллов «Китайский фонарик» из архангельского месторождения, входящего в коллекцию алмазов редких форм компании «АЛРОСА», и его бразильского аналога, изученного А.Е. Ферсманом (рис. 1).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Особый интерес в кристаллографическом исследовании двойников прорастания кубических кристаллов представляет оригинальная методика подробного анализа элементов огранения, морфологии скульптуры граней, фигур травления и интерпретация направления потоков растворения, разработанная В. М. Гольдшмидтом (Goldschmidt, 1904; Goldschmidt, Wright, 1903, 1904) и примененная им совместно с А.Е. Ферсманом в отношении кривогранных кристаллов алмаза (Fersmann, Goldschmidt, 1911). Важным итогом этой работы стал закон роста и растворения кристаллов, сформулированный А.Е. Ферсманом, гласящий, что в отношении элементов огранения кристаллов «тела растворения являются противоположностью тел роста» (Ферсман, 1955).

Изложение результатов исследования морфологии архангельского алмаза ведется параллельно с выдержками из монографического изучения подобных двойниковых сростков (Ферсман, 1955) с необходимыми пояснениями внедренных терминов и методических приемов обнаружения по форме микрорельефа направления кристаллообразующих потоков, отражающих рост и растворение кристаллов.

Минералогическое описание и фотосъемка алмаза «Китайский фонарик» выполнены с помощью бинокулярного микроскопа Leica M205 с высокочувствительной цифровой видеокамерой Leica DFC 495 под управлением лицензионного ПО «Leica Application Suite» (LAS) version 4.1.0 build 1264 (автор фотографий И.В. Глушкова, сотрудник Вилуйской ГРЭ, АК «АЛРОСА»). Ряд фотографий алмаза «Китайский фонарик», по идее автора статьи, специально производился с подбором ракурса, соответствующего положению двойникового сростка кристаллов, изображенных на рисунках А.Е. Ферсмана. Некоторые рисунки алмазов, выполненные А.Е. Ферсманом, ретушированы для публикации автором с помощью лицензионной программы CorelDraw12.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КРИСТАЛЛОМОРФОЛОГИИ АРХАНГЕЛЬСКОГО АЛМАЗА «КИТАЙСКИЙ ФОНАРИК» И БРАЗИЛЬСКОГО ДВОЙНИКА, ИЗУЧЕННОГО А.Е. ФЕРСМАНОМ

Необычный алмаз «Китайский фонарик» весом 1.95 карат извлечен подразделением компании АК «АЛРОСА» (ПАО) – АО «Севералмаз» в 2019 г. на горно-обогатительном комбинате месторождения им. М. В. Ломоносова Золотицкого кимберлитового поля в Архангельской области, где одновременно перерабатывают руду из кимберлитовых трубок Архангельская и Карпинского-1, входящих в комплекс месторождения. По характерным морфологическим особенностям источником найденного алмаза признана трубка Карпинского-1. Алмаз представляет собой хорошо развитый симметричный двойник прорастания глубоко проникающих друг в друга двух кривогранных кубоидов янтарно-желтого цвета, проявляющий яркую желто-зеленую фотoluminesценцию (Павлушин и др., 2021). Данная форма закономерного срастания природного алмаза, известная как «двойник прорастания» и «двойник проникновения» кубических кристаллов, признана редкой и необычной (Spetsius, Taylor, 2008). Довольно часто ее путают с циклическими двойниками, состоящими из 3–5 и более индивидов (Casanova, 1972), но общим для них является лишь закон двойникового по (111). Показавший разницу между ними подобный сросток двойникового прорастания двух кубических кристаллов алмаза из коллекции профессора Ф. Бекке Института минералогии и петрографии Венского университета был изучен А. Е. Ферсманом. Предположительным местом находки алмаза указана Бразилия. В монографии (Ферсман, 1955) образец описан под номером 122 как несколько мутный просвечивающий

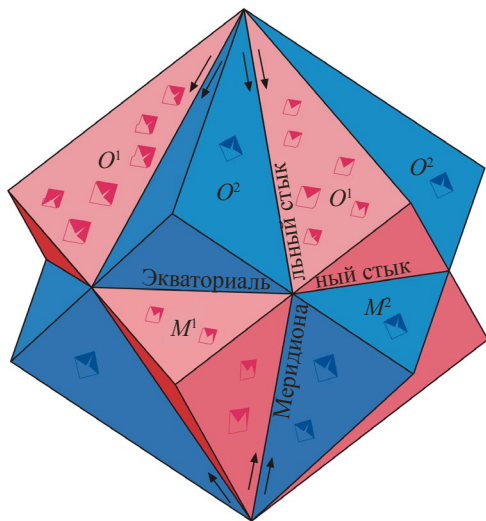


Рис. 2. Схема описания одного из бразильских “гексаэдрических двойников прорастания кристаллов алмаза” с обозначением граней по А.Е. Ферсману (1955): стрелки указывают направления потоков растворения кристалла; на гранях куба отмечены “изящные ямки травления” тетрагональной формы.

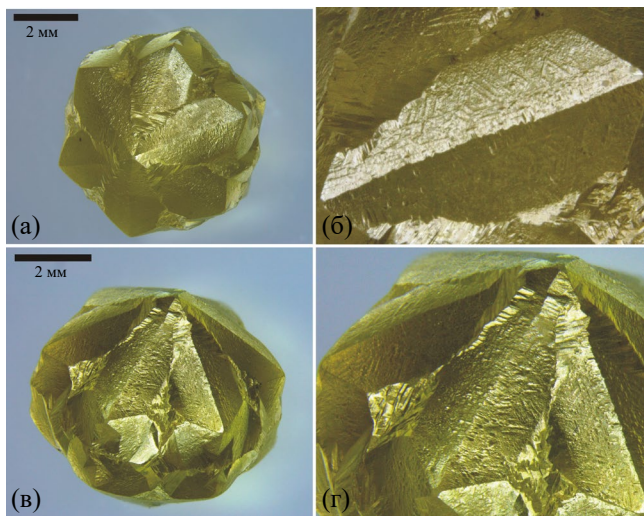


Рис. 3. Морфология двойника прорастания гексаэдрических кристаллов архангельского алмаза “Китайский фонарик”: (а) фото алмаза со стороны общей вершины двойников; (б) смена типа микроскульптуры на выпуклой поверхности тетрагексаэдроидов в направлении граней куба; (в) реликты площадок с лентовидным рельефом, приподнятые над поверхностью тетрагексаэдроидов; (г) увеличенный фрагмент микрорельефа на рис. (в).

алмаз весом 25 мг (0.13 кар). Сам А. Е. Ферсман подчеркивает, что — «истолковать этот маленький кристаллик не так-то легко», однако в итоге изучения алмаза им без сомнений высказано предположение, что на его формирование наложены процессы роста и растворения.

Для облегчения понимания своеобразных терминов описания А. Е. Ферсманом двойниковых

сростков, они приведены на копии его оригинального рисунка (рис. 2).

При поразительном внешнем сходстве формы бразильского алмаза Ферсмана и архангельского алмаза, во многом унаследовавших в своем строении мотив двойникового срастания кристаллов, наиболее интересной представляется возможная связь их внешней морфологии с потоками растворения, обозначенная Ферсманом и Гольдшмидтом (рис. 2). Основными индикаторами потоков растворения являются положение и ориентировка рельефа на поверхности кристаллов, а также кривизна и направление изгиба граней. Доказавший это А. Е. Ферсман часто опирается на узор рисунка и направление элементов микрорельефа, обозначая его как бугорки растворения или пластинки роста, а сама скульптура поверхности весьма выразительно им изображается на многочисленных рисунках. Подчеркивая различие следов деятельности потоков растворения вокруг закономерного сростка кристаллов, он обозначает разные части граней сдвойникованных кубоидов соответствующими символами, разделяя каждую их грань на три части — одну экваториальную M^1 и две полярные O^1 (рис. 2). В случае бразильского двойникового сростка № 122 им отмечено присутствие на его поверхности слабо выраженных остатков бугорков травления. Отмечая общее сходство этого алмаза с другими изученными им двойниками Бразилии, в своих выводах А. Е. Ферсман полагается исключительно на форму световых рефлексов от искривленных граней алмаза, а также сравнивает их с другими, более совершенными по огранке экземплярами.

Рассмотрим особенно ясно прорисованный, выделяющийся своим разнообразным узором, рельеф поверхности архангельского алмаза «Китайский фонарик». На кубоидах двойникового сростка присутствуют сразу несколько типов микрорельефа растворения (рис. 3). Так, на выпуклых гранях тетрагексаэдроидов наблюдается необычный, ранее не описанный, симметричный рельеф в виде чередования смежных параллельно ориентированных треугольных фигур, названный нами «пилообразным» рельефом растворения. Пилообразный узор рельефа образован эшелонами ступенчатых остроугольных уступов, спускающихся в одном направлении — к «меридиональным стыкам» двойникового сростка кубоидов. Как правило, острые углы треугольников обращены к ребрам куба, а реже в прямо противоположную сторону, по-видимому указывая направление фронта растворения. Микроскопически треугольные уступы образованы грядами, состоящими из элементов разновидности черепитчатого рельефа — каплеобразных ступеней травления. Наблюдаются достаточно резкие границы между элементами

черепитчатого и пилообразного рельефа (рис. 3б). Переход между ними представляет собой прямолинейные кулисообразно расположенные эшелонные ступеней, спускающихся от ребра кубоида (110). Смена типа микрорельефа от разновидностей черепитчатого рельефа — каплевидного (зубчатого) к пилообразному, и появление треугольных торцов ступеней визуально связано с увеличением кривизны изгиба кривогранной поверхности растворения тетрагексаэдроидов в направлении к реликтам граней куба (рис. 3б). Реликты граней куба покрыты вытянутыми тетрагональными ямками травления, типичными для этой кристаллографической формы алмаза, и своей формой, как и в случае алмаза Ферсмана, указывают на более глубокое растворение со стороны полярных вершин сдвойникованных кубоидов (рис. 3в, г).

Кроме перечисленных типов, на алмазе «Китайский фонарик» отмечен редкий лентовидный тип рельефа. Площадки, несущие лентовидный рельеф, возвышаются над кривогранной поверхностью гексаэдроидов (рис. 3в, г). Их контуры ограничены склонами, покрытыми элементами зубчатого и каплевидного рельефа, и совпадают с ними по направлению на кривогранных поверхностях тетрагексаэдроидов. Судя по кристаллографическому положению, фрагменты площадок являются реликтами поверхности граней (110), присутствовавших на кубоиде до его растворения. Подобная последовательность растворения, как и типичный для него зубчатый микрорельеф поверхности, ранее были отмечены у кубоидов II разновидности, по классификации Ю.Л. Орлова (Орлов, 1984) из россыпей Анабарского алмазоносного района Якутии (Павлушин и др., 2017). Наличие реликтов граней (110) можно объяснить разной устойчивостью к растворению секторов полногранного роста ромбододекаэдра $\langle 110 \rangle$, имеющих массивное строение по сравнению с волокнистым типом строения секторов роста $\langle 100 \rangle$ граней куба.

Опираясь на наблюдение направлений эшелонов ступеней микрорельефа архангельского алмаза (рис. 3), можно заключить, что особенно интенсивно растворение происходило вдоль меридиональных границ срастания сегментов двойника и далее распространялось фронтально по выпуклой поверхности граней тетрагексаэдроидов (рис. 4). Наиболее значительные углубления в виде расщелин появились на месте реликтов смежных граней куба сдвойникованных кристаллов, обозначенных скоплением глубоких тетрагональных ямок травления. В субперпендикулярном направлении к ребрам куба растворение запечатлело последовательную смену типов микрорельефа на кривогранной поверхности тетрагексаэдроидов от пилообразного к зубчатому и каплевидному рельефу.

Бразильский двойник прорастания подробно исследован А. Е. Ферсманом с помощью теодолитного гониометра конструкции В. Гольдшмидта. В интерпретации съемки световых рефлексов, отраженных от искривленных поверхностей алмаза, подчеркивается, что от «полюсов» двойника к «экваториальному стыку» срастания направлялись меридиональные растворяющие потоки. В итоге интенсивное растворение вытеснило грани куба (с) и увеличило грани (d). Очевидно, здесь буквами **d1**, **d2** и т. д. А. Е. Ферсман обозначал кривогранные поверхности растворения, принадлежащие тетрагексаэроиду. При этом на реликтовых гранях куба (с) архангельского алмаза (рис. 3в, г; рис. 4в) наблюдаются тетрагональные ямки, диагонально ориентированные относительно контуров ребер куба, вытянутые в одном из направлений его вершин. Такой рисунок рельефа типичен для следов травления (Кухаренко, 1955; Орлов, 1963, 1984; Бартошинский, Квасница, 1991; Афанасьев и др., 2000). На больших гранях тетрагексаэдроидов (d), примыкающих к полярным вершинам сростка **p** и **p** (рис. 4а), А. Е. Ферсманом отмечены «остатки бугорков травления».

На архангельском алмазе в области «экваториального» двойникового шва отмечены смежные зеркально симметричные по его линии срастания фрагменты параллельной штриховки и зеркально гладкие пластинчатые поверхности, принадлежащие граням октаэдра (111) (рис. 3а, в). Примечательно, что А. Е. Ферсман и В. Гольдшмидт интерпретируют подобные формы рельефа на нескольких сдвойникованных бразильских алмазах, включая обсуждаемый нами алмаз 122, как «штриховку роста» в области экваториальной границы двойникового срастания (рис. 5а). Кроме того, они предположили, что одновременно с растворением и размытием полярно ориентированных граней двойника происходил рост граней вблизи экваториальной линии за счет встречи и объединения нескольких «созидающих» потоков, направленных со стороны полюсов двойника и экваториальных уступов в результате переноса вещества с поверхностей растворения к участкам роста. При этом подчеркивается, что их рост происходил даже тогда, когда остальная поверхность отставала в росте или же растворялась. Меридиональные границы двойникового сростка и расположенные вдоль них надпилы однозначно отнесены к последствиям растворения (Ферсман, 1955). Парадоксальный момент сосуществования процессов одновременного роста и растворения он приводит, ссылаясь на пояснения образования подобных гребней на двойниковых сростках кристаллов кальцита (Goldschmidt, Wright, 1903, 1904; Goldschmidt, 1904).

Зафиксированные А. Е. Ферсманом на гониометре яркие рефлексы в виде точек на экватори-

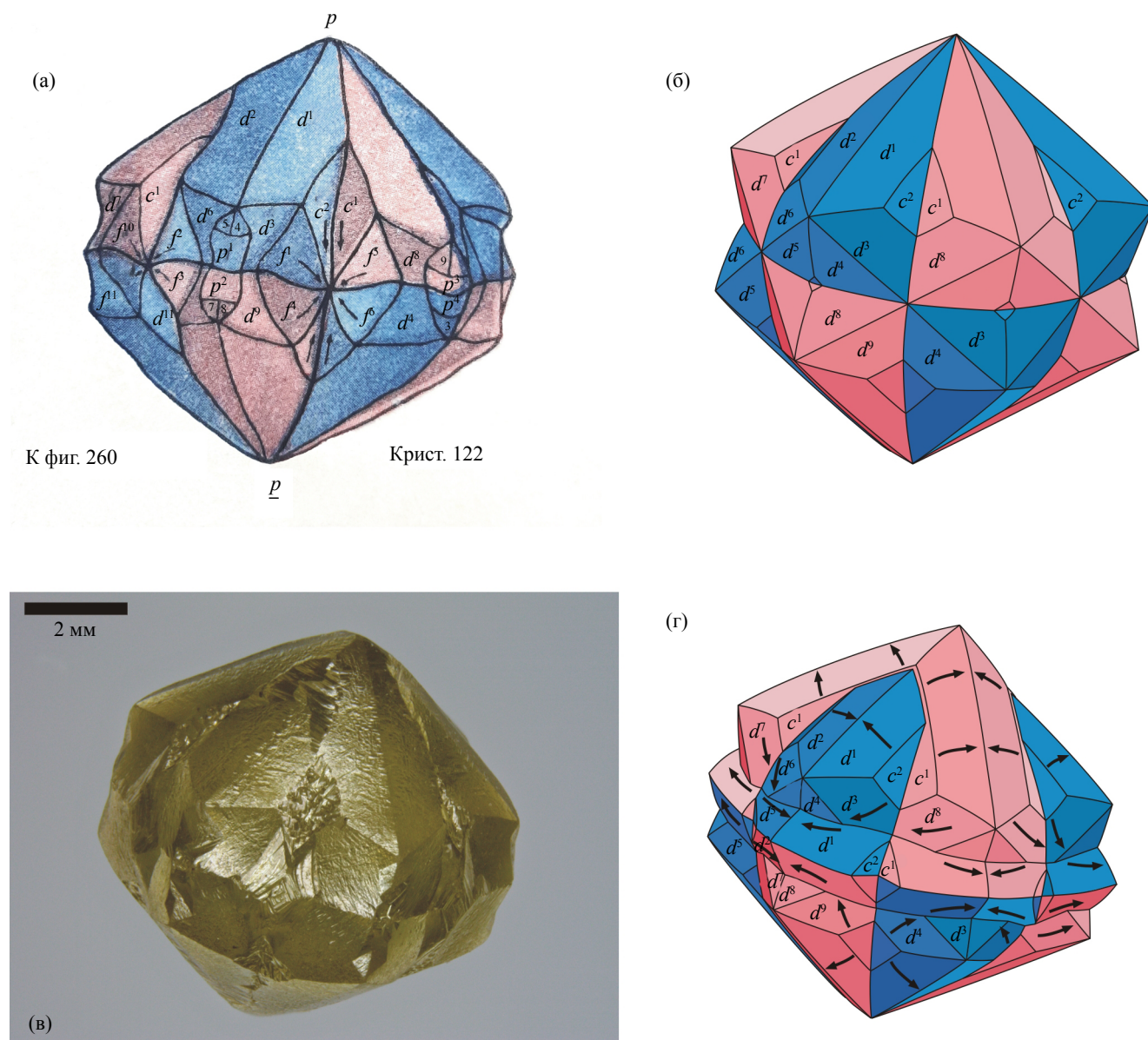


Рис. 4. Морфология бразильского алмаза Ферсмана № 122 и архангельского алмаза: (а) морфология бразильского двойникового сростка и схема направления “растворяющих” и “созидающих” потоков по (Ферсман, 1955); (б) идеализированная модель бразильского алмаза с расшифровкой индексов Ферсмана и положения граней; (в) фото архангельского алмаза “Китайский фонарик”; (г) кристаллография двойникового сростка кубоидов по А.Е. Ферсману и схема направления потоков растворения поверхности алмаза.

альной линии срастания двойника, по его мнению, отвечают участкам роста граней, а резко выраженные полосы соответствуют штриховке роста в области «экватора». На архангельском алмазе «Китайский фонарик» также заметны смежные зеркально симметричные по обе стороны от экваториальной линии плоскости двойника по (111) фрагменты параллельной штриховки и зеркально гладкие поверхности, принадлежащие граням октаэдра (111) (рис. 3в, рис. 4в). По всей видимости, грани действительно имеют ростовую природу, но являются не новообразованными, а реликтовыми гранями октаэдра, расположенными вдоль двойникового шва, что в целом обычно для двойников

кубических кристаллов алмаза, а также сростков октаэдрических кристаллов по шпинелевому закону типа «macle». На последних они также нередко сохраняются при растворении. На границе экваториального стыка образуется симметричный рисунок, обусловленный зеркальной плоскостью отражения (111) вдоль двойниковой границы. Некоторые авторы, например (Lu et al., 2018), именуют их «ромбическими ямками» («rhombic pits»), сложенными гранями с высокими символами, чаще октаэдрическими пластинами, различая также гексагональные и зигзагообразные формы рельефа вдоль границы двойникования. В рельефе архангельского алмаза это еще более выражено,

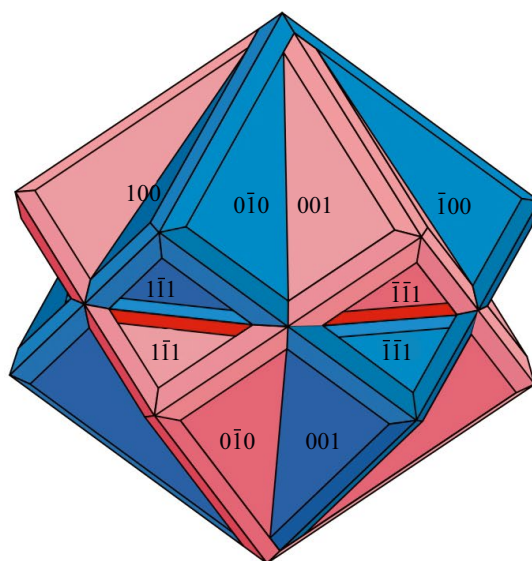
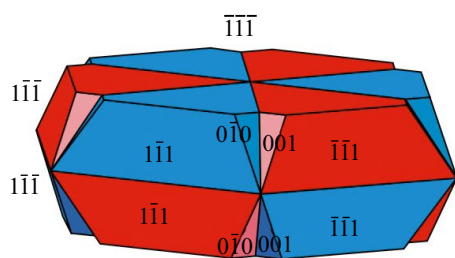
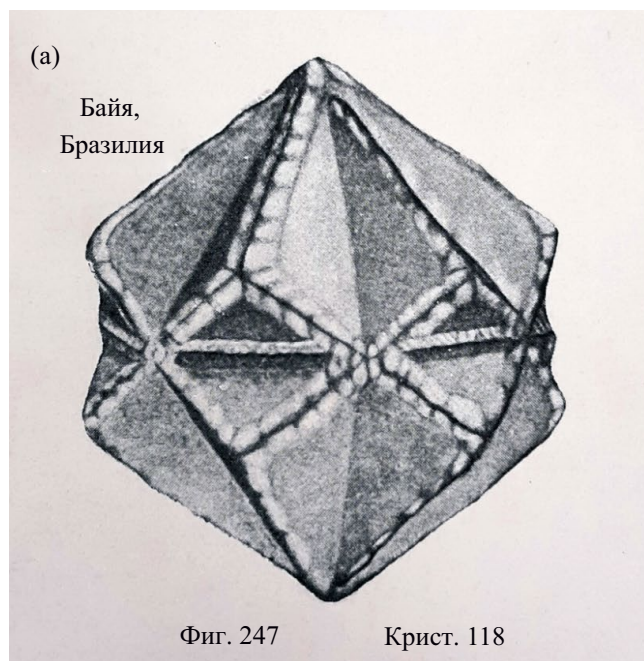


Рис. 5. Морфология двойников проникновения кубических кристаллов алмаза: (а) “острый гребень роста в экваториальном надпиле в красивом двойниковом образовании”, бразильский алмаз № 118 (Ферсман, 1955); (б) двойник проникновения кубических кристаллов с “гребнем роста”, вес 5.71 карат, кимберлитовая трубка Мбужи-Майи (Мибя), ДР Конго (фото из открытого источника johnbetts-fineminerals.com); (в) схема первичной формы роста двойника прорастания и соответствие граней октаэдра на нем и на “гребне роста”.

чем на бразильском алмазе Ферсмана. Вдоль его «экваториального стыка» наблюдаются сегменты значительно растворенных граней, означающих, что здесь происходило параллельное срастание sdвойникованных кристаллов (Павлушин и др., 2021). В результате возник описанный А.Е. Ферсманом «острый гребень», опоясывающий двойниковый шов, состоящий из октаэдрических пластин, сегментов реликтовых граней куба и кривогранных поверхностей растворения тетрагекса-

эдроида (рис. 4в, г). На (рис. 4г) грани параллельной ориентации отмечены по Ферсману символами букв с одинаковыми числовыми индексами: $d^1 - d^1$; $d^2 - d^2$; $c^1 - c^1$; $c^2 - c^2$. Подобная морфология строения двойниковой границы не является исключительным случаем. В монографии подобные кристаллы из Байи (Бразилия) отмечены самим Ферсманом (рис. 5а). Известны они и по современным находкам двойников, например в кимберлитах Конго (рис. 5б). Происхождение экваториального

ребня не нашло объяснения у Ферсмана, не обсуждалось оно и позже в современной литературе. Остались не решенными и сформулированные им самим вопросы: «1) почему поверхность гряды покрывается чешуйками граней, а не развивается в виде одной плоской грани?; 2) отчего наложение пластинок происходит предпочтительно в середине?» (Ферсман, 1955). Объяснить эти поставленные в монографии вопросы сами ее авторы пытались переносом материала с растворяющихся полярных областей двойника в его экваториальную область, где одновременно происходило его отложение и рост кристаллических граней. Но с таким парадоксальным утверждением невозможно согласиться. Из морфологии двойника «Китайский фонарик» также следует, что он действительно растворялся преимущественно со стороны полярных друг другу вершин. Октаэдрические поверхности роста, покрывающие экваториальный гребень, являются реликтами, которые могли сохраниться во входящих углах, образованных гранями куба, скрывших их от потоков растворения вдоль экваториальной линии своеобразными козырьками. Так, признаки анизотропных условий растворения в полярных направлениях хорошо заметны, например, на двойниковом сростке алмаза из Конго (рис. 5). Его огранка на ребрах кубоидов со стороны полярных вершин двойника почти полностью утрачена, в то время как экваториальный пояс остается покрытым блестящими плоскими гранями октаэдра. Подобное мы наблюдаем и на кристалле алмаза «Китайский фонарик» (рис. 3, рис. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Бесспорными остаются фактические наблюдения А.Е. Ферсманом экваториального гребня, состоящего из нагромождения пластинчатых граней октаэдра, что подтверждается массой подобных случаев на других известных кристаллах. Очевидно и то, что в контактной области двойника кубических кристаллов алмаз разрастался октаэдрическими слоями. По всей видимости, этот сложный комплекс дополнительных граней был генерирован ускоренным ростом вдоль границы двойникового. Рост сопровождался параллельными симметричными двойниковыми деформациями кристаллической структуры алмаза, что, например, подтверждается наблюдениями характера морфологии двойникового и возникновением дислокаций в области границ закономерных сростков существенно растворенных кристаллов из трубки Аргайл (Lue et al., 2018).

В случае архангельского двойникового сростка «Китайский фонарик», заостренный гребень, расположенный вдоль его «экваториального стыка», является реликтом поверхности роста сдвойнико-

ванных гексаэдров. По сравнению с бразильским алмазом Ферсмана № 122 он имеет более сложное строение, и ранее был интерпретирован как параллельное срастание гексаэдров, генерированное ростом вдоль границы двойникового (Павлушин и др., 2021). При более подробном исследовании морфологии этого алмаза, сравнении результатов с выводами А.Е. Ферсмана и анализе подобных находок кристаллов возникла новая, более глубокая интерпретация происхождения этого образования.

На примере кристаллов флюорита и галенита (Aoki, 1979) показано, что для возникновения двойника прорастания кубических кристаллов по шпинелевому закону, требуется наличие физической плоскости срастания (111) в виде грани октаэдра. Вероятно, что для зарождения двойников прорастания кубических кристаллов алмаза также необходимо подобное условие. Зафиксированная нами последовательность зарождения двойника проникновения в виде гребня граней октаэдра, соединяющих сдвойникованные кубические индивиды вдоль экваториальной границы двойникового, подтверждает это предположение. Соответствие граней двойника прорастания октаэдров и тонких граней, покрывающих «гребень роста» на двойнике прорастания кубоидов, показано на (рис. 5в). Наблюдения такой последовательности кристаллизации уже были сделаны при подробном изучении рентгеновской топографии срезов двойников взаимного проникновения кубоидов (Machado et al., 1998). К сожалению, при обсуждении волокнистого строения и роста этих кристаллов этот факт, как и наличие на изученных бразильских алмазах октаэдрического гребня роста, был проигнорирован. И все же авторами вполне ясно было отмечено, что последующий волокнистый рост кубоидов приводил к деформациям и дезориентации волокон в компонентах двойника, что вызывает сомнения в правомерности сделанных выводов. Действительно, зарождение двойников проникновения на основе контактных двойников тип «macle» выглядит маловероятным (Seneschal, 1976), но смена габитусной формы роста с октаэдрической на кубическую, сопровождающая этот процесс, не оставляет сомнений. Очевидно, зарождение двойникового срастания волокнистых кубоидов начиналось с возникновения двойника прорастания плоскогранных октаэдрических кристаллов. Кроме того, следуя общепризнанной кристаллогенетической схеме влияния удельного пересыщения на форму кристаллов (Sunagava, 1984), можно сделать вывод, что смена габитусной формы роста кристалла алмаза обусловлена последовательным изменением условий «тангенциального» (слоевого) роста октаэдра «нормальным» (волокнистым) механизмом роста куба, свидетельствуя о происходившем увеличении пересыщения

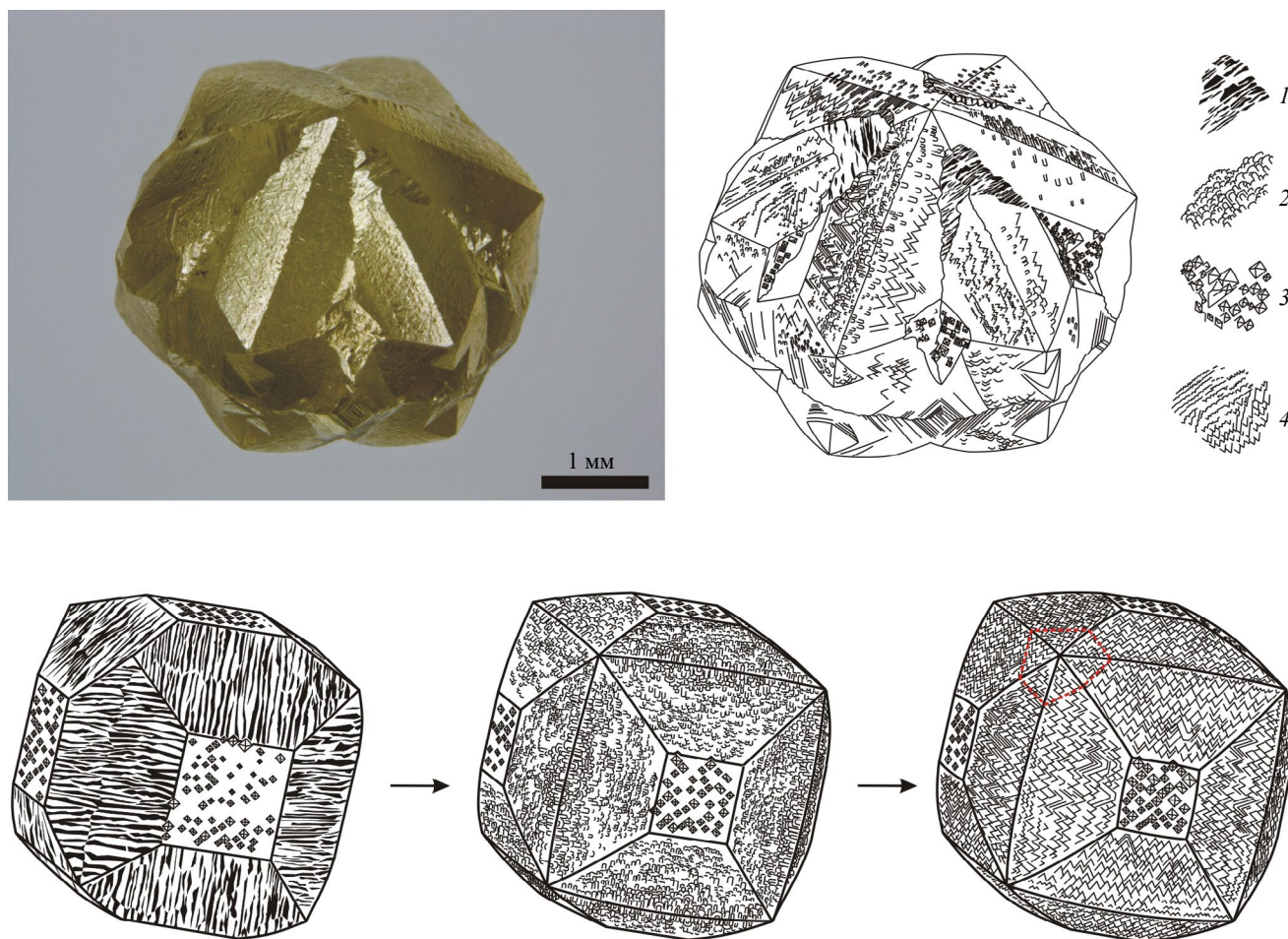


Рис. 6. Типы микрорельефа на поверхности алмаза «Китайский фонарик» и интерпретация последовательности появления микрорельефа по мере увеличения глубины растворения и изменения кривизны граней тетрагексаэдроид. Условные обозначения: 1 — лентообразный рельеф растворения; 2 — зубчатый и каплевидный рельеф растворения на поверхности тетрагексаэдроид; 3 — тетрагональные ямки травления на гранях гексаэдра; 4 — пилообразный рельеф на поверхности тетрагексаэдроид. Пунктирная красная линия — обозначает соответствие рисунка пилообразного рельефа реберной форме октаэдра.

в кристаллообразующей среде и скорости роста кристаллов.

На алмазе «Китайский фонарик» зафиксировано одновременно четыре типа микрорельефа, включая самые распространенные среди кубоидов алмаза с признаками растворения (рис. 6): лентообразный рельеф на поверхности близкой по положению граней ромбододекаэдра; зубчатый, или, иначе называемый, каплевидный рельеф растворения на кривогранных поверхностях тетрагексаэдроид; тетрагональные пирамидальные ямки травления на гранях куба. Кроме того, на поверхностях додекаэдроид обнаружен ранее неизвестный «пилообразный» тип скульптуры, также тесно связанный с растворением его поверхности. Таким образом, нам представился уникальный случай, позволяющий рассмотреть реальную последовательность проявления типов микрорельефа на кубоидах алмаза. Неравное взаимное положение кубоидов в двойнике прорастания создало условия

для сравнительного анализа элементов рельефа на их поверхности и позволило выявить закономерности их возникновения.

Лентообразный тип микрорельефа известен на кубических кристаллах Архангельской алмазоносной провинции и за ее пределами. В одних случаях он трактуется как узкие лентообразные полосы на месте ребер кубоидов, соответствующие округлой поверхности тетрагексаэдроид (Кудрявцева и др., 2005). На кубоидах алмаза из россыпей Анабарского района Якутии рельеф обозначен как симметричный рельеф субперпендикулярный ребрам куба (Павлушин и др., 2017).

Лентообразный рельеф наблюдается у алмаза «Китайский фонарик» лишь на площадках, выступающих над поверхностью кристаллов (рис. 3в, г; рис. 7) и занимает доминирующее по высоте положение, очевидно указывая на его самое раннее происхождение на менее развитом кубоиде, составляющем двойниковый сросток. Местами заметно,

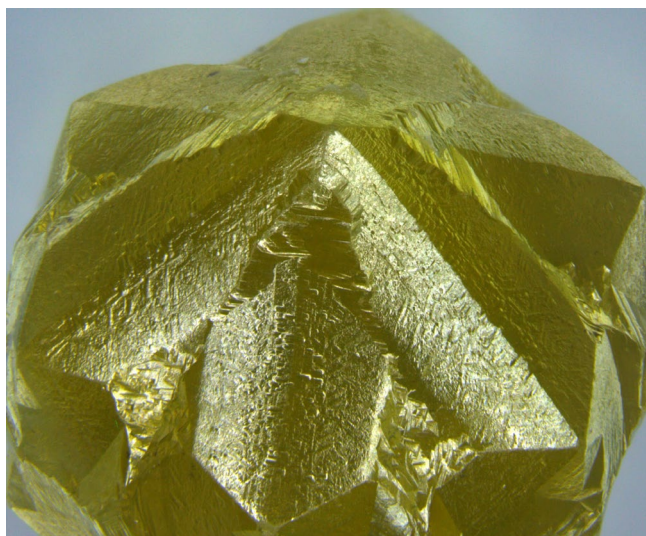


Рис. 7. Элементы зарождения черепитчатого рельефа на поверхности реликтов грани, близкой по положению ромбододекаэдру (рис. 3а).

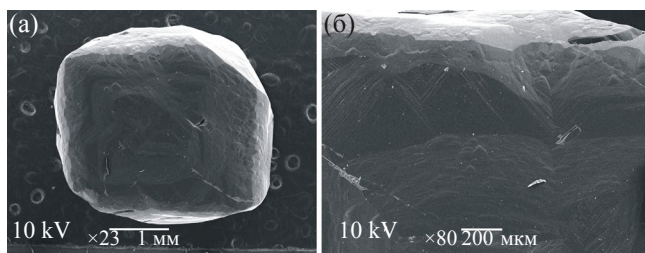


Рис. 8. Пилообразный микрорельеф растворения на кривогранной поверхности тетрагексаэдроида алмаза из россыпи Эбелях (Якутия) (BSE изображение): (а) общий вид кристалла; (б) увеличенный фрагмент поверхности с пилообразным микрорельефом.

что после полного уничтожения растворением ребра тетрагексаэдроида лентообразный рельеф образует поверхность, близкую по положению граням ромбододекаэдра и, вероятно, является его реликтами. В свою очередь на фрагменте поверхности лентообразного рельефа наблюдаются элементы зарождения черепитчатого рельефа (рис. 7), а кроме того, он покрывает примыкающие к нему склоны.

Черепитчато-шестоватый тип скульптуры рельефа, называемый зубчатым или каплевидным типом рельефа тетрагексаэдроида, хорошо известен также на поверхности кривогранных додекаэдроидов из россыпей Урала (Кухаренко, 1955), северо-востока Сибирской платформы (Афанасьев и др., 2000; Павлушин и др., 2017), впервые был отмечен на кубоидах Бразилии (Ферсман, 1955) и однозначно трактуется как результат растворения. Скульптура его рельефа также близка по своему положению и ориентировке на гранях тетрагексаэдроида и додекаэдроида. В свою очередь ребро (110) тетрагексаэдра практически идентично

«гранному шву», расположенному вдоль короткой диагонали искривленной грани ромбододекаэдра. На поверхности тетрагексаэдроида, образованного растворением, холмики черепитчатого рельефа имеют менее резкую округлую форму. Подобный по форме рельеф той же кристаллографической ориентировки обнаружен и на ранее описанных кубоидах алмаза. В монографии Ю.Л. Орлова (1969 стр. 56) в качестве примера приведен бразильский алмаз с бугорками травления, изображенный в монографии А.Е. Ферсмана (кристалл № 65), а элементы рельефа именуются удлинёнными каплевидными холмиками, ориентированными поперек гранного шва тетрагексаэдра. Идентичный отмеченному на кристалле «Китайский фонарик» микрорельеф, описан, без генетической привязки, как «каплевидные бугристые скульптуры по краям куба» II разновидности в монографическом исследовании алмазов Архангельской алмазоносной провинции (Garanin et al., 2021).

Пилообразный тип симметричного микрорельефа на кубических кристаллах алмаза Архангельской кимберлитовой провинции ранее не был описан в известных опубликованных работах (Кудрявцева и др., 2005; Garanin et al., 2021). Масштаб фигур крупных треугольных фрагментов пилообразного узора рельефа относительно размеров самого кристалла, может говорить о том, что такой тип рельефа преимущественно наблюдается лишь на растворённых кубоидах значительных размеров. Возможно, именно по этой причине данный тип рельефа ранее не был отмечен исследователями, обычно имеющими доступ к алмазам более мелких размерно-весовых классов. Однако тщательно рассмотрев данные ранее изученных кубоидов из россыпи Эбелях Анабарского алмазоносного района, расположенной на севере Якутии (Павлушин и др., 2017), удалось найти кристалл с микрорельефом, близким по облику к пилообразному типу (рис. 8). Как и на алмазе «Китайский фонарик», на данном кристалле заметно ограниченное положение микрорельефа на поверхности тетрагексаэдроида и связь его появления с изменением кривизны граней.

На алмазе «Китайский фонарик» границы раздела различных элементов рельефа на поверхности псевдограней тетрагексаэдроида также сопряжены с изменением степени их кривизны в направлении границ ребер гексаэдра. Кроме того, ориентировка уступов пилообразного и зубчатого каплевидного рельефа по наблюдениям поверхности архангельского двойникового сростка может меняться в противоположном направлении. Направление зубцов пилообразного и каплевидного рельефа определенно продиктованы процессами растворения кристалла. Смена ориентировки зубцов микрорельефа указывает направление растворяющих потоков, омывавших кристалл. Глубина заложения

рельефа поверхности за счет кривизны определяет смену в этом направлении зубчатого и каплевидного рельефа пилообразными формами скульптуры. Высота уступов и интенсивность расчленения рельефа также увеличивается в сторону наибольшей кривизны грани тетрагексаэдроиды.

Присутствие на поверхности тетрагексаэдроиды пилообразного рельефа и его ориентировка, параллельная реберной форме октаэдра (рис. 6а), а также наличие октаэдрических граней, генерированных экваториальной границей двойникования, подтверждает наблюдение, что и первичной формой роста сдвойникового кубоида являлись октаэдрические слои. Пилообразный тип рельефа имеет самую значительную глубину заложения и, очевидно, представляет заключительную стадию скульптурирования выпуклой поверхности тетрагексаэдроиды в процессе растворения. Наличие резкой и прямой границы вдоль (110), расположенной между элементами черепитчатого и пилообразного рельефа (рис. 3б), предполагает, что она является проекцией внутреннего строения кристалла, и растворением была вскрыта зона, сменяющая октаэдрическую ростовую зональность по октаэдру волокнистыми слоями роста кубоида.

По наблюдениям морфологии алмаза «Китайский фонарик» наиболее подвержены растворению и уязвимы участки поверхности, примыкающие к границам, расположенным между «меридиональными» сегментами двойникового сростка. На одиночных кристаллах растворение обычно происходит со стороны ребер и вершин кристалла. Здесь же мы видим совершенно противоположную картину. Эшелоны ступеней спускаются со стороны ребер смежных граней куба сдвойниковых кристаллов, образующих глубокие ложбины. Судя по положению и ориентировке рисунка микрорельефа на архангельском алмазе, можно убедиться, что, как и предполагал Ферсман, растворение сростка кристаллов происходило со стороны меридиональных стыков двойника в направлении его «гребней», образованных ребрами кубоидов, а сами потоки растворения направлялись в меридиональном направлении со стороны противоположных «полюсов» p и p (рис. 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдения морфологии уникального алмаза «Китайский фонарик» и сравнение полученных результатов с выводами А.Е. Ферсмана о происхождении тонких особенностей рельефа, форм роста и растворения природных алмазов раскрывает механизм и последовательность образования двойников прорастания кубических кристаллов. Судя по прослеженным аналогиям с подобными двойниковыми сростками, это касается не только уникальных образцов из Бразилии и Архангельского месторождения имени

М.В. Ломоносова, а имеет более значительное распространение.

В результате анализа наблюдений А.Е. Ферсмана и подобных находок двойников с характерным «экваториальным гребнем», состоящим из граней октаэдра, опоясывающих экваториальную границу двойникования, подтверждается ранее высказанная гипотеза (Aoki, 1979; Sunagawa, 1984) о том, что зарождение двойников прорастания кубических кристаллов алмаза происходит в результате разрастания сдвойниковых по шпинелевому закону октаэдров. Изменение кристаллографической формы происходит за счет смены «тангенциального» механизма роста плоскогранных октаэдров «нормальным» механизмом роста волокнистых кубоидов. Это объяснение также устраняет известное противоречие, возникающее при объяснении генезиса подобных двойников за счет роста волокнистых кубических кристаллов.

Изучение уникального архангельского алмаза позволило выяснить последовательность изменения формы микрорельефа кубоидов, связанной с увеличением кривизны граней тетрагексаэдра по мере растворения кристаллов. Ленточный тип микрорельефа, покрывающий плоские додекаэдрические поверхности, сменяется появлением выпуклого изгиба кривогранного тетрагексаэдроиды, покрытого каплевидным или зубчатым типом микрорельефа. Затем с увеличением кривизны граней проявляется впервые выявленный пилообразный тип рельефа, проецирующий глубокие октаэдрические слои тангенциального роста в кубических индивидах. Выявленная особенность характерна для кристаллов из кимберлитов Архангельской кимберлитовой провинции и россыпей северо-востока Сибирской платформы и указывает на возможное генетическое родство мантийных источников и происхождение кривогранной формы изученных кубоидов алмаза, связанное с растворением.

Автор выражает благодарность за неоценимую помощь в работе и предоставленную возможность выполнить исследование необычного кристалла алмаза главному эксперту ЕСО АК «АЛРОСА» (ПАО) Л.А. Демидовой, сотруднику Вилуйской ГРЭ И.В. Глушковой за великолепно выполненные фотографии алмаза, многостороннюю поддержку в работе коллегам д.г.-м.н. Е.А. Васильеву, Д.Д. Павлову, Т.А. Антоновой, Д.В. Коногоровой, А.Н. Липашевой, Е.М. Седых, научному редактору журнала «Геохимия» д.х.н., проф. РАН А.А. Ширяеву.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГАБМ СО РАН (FUG-2024-0007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасьев В.П., Ефимова Э.С., Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. (2000) Атлас морфологии алмазов России. Новосибирск: Изд. СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 298 с.
- Бартошинский З.В., Квасница В.Н. (1991) Кристалломорфология алмаза из кимберлитов. Киев: Изд. Наукова думка, 172 с.
- Кудрявцева Г.П., Посухова Т.В., Вержак В.В., Веричев Е.М., Гаранин В.К., Головин Н.Н., Зуев В.В. (2005) Атлас. Морфогенез алмаза и минералов-спутников в кимберлитах и родственных породах Архангельской кимберлитовой провинции. М.: Изд. Полярный круг, 624 с.
- Кухаренко А.А. (1955) Алмазы Урала. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр, 513 с.
- Орлов Ю.Л. (1963) Морфология алмаза. М.: Изд. АН СССР, 236 с.
- Орлов Ю.Л. (1984) Минералогия алмаза. М.: Изд. Наука, 264 с.
- Павлушин А.Д., Зедгенизов Д.А., Пироговская К.Л. (2017) Кристалломорфологическая эволюция роста и растворения кривогранных кубических кристаллов алмаза из россыпей Анабарского алмазоносного района. *Геохимия*. (12), 1141–1152.
- Pavlushin A.D., Zedgenizov D.A., Pirogovskaya K.L. (2017) Crystal Morphological Evolution of Growth and Dissolution of Curve-Faced Cubic Diamonds from Placers of the Anabar Diamondiferous Region. *Geochem. Int.* **55**(12), 1153–1163.
- Павлушин А.Д., Бардухинов Л.Д., Коногорова Д.В. (2021) Алмазные раритеты: Китайский фонарик. *Наука из первых рук*. **92**(3/4), 44–53.
- Ферсман А.Е. (1955) Кристаллография алмаза. Л.: Изд. АН СССР, 568 с.
- Aoki Y. (1979) Morphology of crystals grown from highly supersaturated solutions. *Mem. Sci., Kyushu Univ., Ser. D.* **24**(2), 75–108.
- Casanova R. (1972) A Repeated Twin in Natural Diamond from Tortiya, Ivory Coast. *American Mineralogist*. **57**, 1871–1873.
- Fersmann A., Goldschmidt V. (1911) Der Diamant. Eine Studie Miteinem Atlas von 43 Tafeln. Heidelberg: Carl Winters Universitätsbuchhandlung, 274 p.
- Garanin V., Garanin K., Kriulina G., Samosorov G. (2021) Diamonds from the Arkhangelsk Province, NW Russia. Springer International Publishing AG, Switzerland, 248 p.
- Goldschmidt V. (1904) Zur Mechanik des Lösungsprozesses. *Zeitschr. Krist.* **38**, 656.
- Goldschmidt V., Wright. (1903) Über Atzfiguren, Lichtfiguren und Lösungskörper. *N. Jahrb. Miner.* **17**, 355.
- Goldschmidt V., Wright. (1904) Über Lösungskörper und Lösungs-Geschwindigkeiten. *N. Jahrb. Miner.* **18**, 335.
- Lu T.J., Ke J., Qiu Z.L. (2018) Surface dissolution features and contact twinning in natural diamonds. *J. Mineral. Geochem.* **195**, 145–153.
- Machado W.G., Moore M., Yacoot A. (1998) Twinning in Natural Diamond. II. Interpenetrant Cubes. *Journal Applied Crystallography*. **31**, 777–782.
- Senéchal M.L. (1976) Geometry and Crystal Symmetry. *Neues Jahrbuch Mineralogie. Monatsh.* (11), 518–524.
- Spetsius Z.V., Taylor L.A. (2008) Diamonds of Siberia: Photographic Evidence for their Origin. Tranquility Base Press: Lenoir City, Tennessee, USA, 278 p.
- Sunagawa I. (1984) Growth of Crystals in Nature. In *Materials Science of the Earth's Interior*. Terrapub: Tokyo, Japan, 63–105.

MORPHOLOGICAL FEATURES AND GENESIS OF THE INTERPENETRATION TWINS OF CUBIC DIAMOND CRYSTALS

© 2025 A. D. Pavlushin

*Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Lenin Ave., 39, Yakutsk, 677000 Russia*

e-mail: pavlushin@diamond.ysn.ru

Received June 8, 2024; revised August 9, 2024; accepted September 11, 2024

The paper presents analysis of the crystal morphology of two similarly shaped interpenetration twins of cubic crystals: the Chinese Lantern diamond (Arkhangelsk diamond mining province, provided for this study by courtesy of the ALROSA company) and a diamond crystal from Brazil, which has been studied in much detail by A.E. Fersman. Comparison of data on these diamonds, which were obtained using original methodological techniques for interpreting morphological indications of crystal growth and dissolution, revealed a number of crystal morphological features of crystals characteristic of regular accretions of this type. In addition to tetragonal pits characteristic of the cuboids, ribbon-shaped, jagged, and drop-shaped relief features typical of surface dissolution, a new type of symmetrical sawtooth microrelief associated with etching of octahedral layers of cuboid growth was discovered on the diamond from the Arkhangelsk province. In accordance with the height and direction of the steps of the relief pattern, the development sequence of the aforementioned types of microrelief is determined according to the increase in the depth of dissolution and the degree of change in the curvature of the surface of the tetrahedron on twin cuboids. The genesis of the characteristic equatorial sharp ridge of octahedron faces encircling the twinning plane was revealed. It is demonstrated to have been formed in relation to an early stage of the systematic coalescence of fibrous diamond cuboids and to be a determining condition of its development, first as a interpenetration twin of flat-faced octahedral crystals. Crystal morphological similarities between indications of dissolution on curved tetrahedra from kimberlites of the Arkhangelsk pipes and placer sources in Brazil and the north of the Yakutian diamond-bearing province is discussed.

Keywords: chinese lantern diamond, twin germination, crystallomorphology, cuboid, microrelief of dissolution, rare forms of diamonds, tetrahedroid, typomorphism, spinel twinning law