

КРИСТАЛЛОМОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ РОСТА И РАСТВОРЕНИЯ КРИВОГРАННЫХ КУБИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ АЛМАЗА ИЗ РОССЫПЕЙ АНАБАРСКОГО АЛМАЗОНОСНОГО РАЙОНА

© 2017 г. А. Д. Павлушин^{a, b, *}, Д. А. Зедгенизов^{b, c, **}, К. Л. Пироговская^a

^aИнститут геологии алмаза и благородных металлов СО РАН
677980 Якутск, просп. Ленина, 39

^bНовосибирский государственный университет
630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2

^cИнститут геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН
630090 Новосибирск, просп. Коптюга, 3

*e-mail: a.d.pavlushin@diamond.ysn.ru

**e-mail: zed@igm.nsc.ru

Поступила в редакцию 25.10.2016 г.

Принята к печати 13.02.2017 г.

В работе рассмотрена онтогенетическая модель образования морфологических типов роста и растворения кубических кристаллов алмаза II разновидности по Ю.Л. Орлову из россыпей Анабарского алмазоносного района. В кристаллах зафиксированы следующие онтогенетические области и соответствующие им этапы эволюции роста, происходившие на фоне общего падения пересыщения в кристаллообразующей среде: микроблочные мозаичные кубоиды с дефектами образованными по механизму ротационной пластичности – кубоиды с линейными трансляционными деформациями – кубоиды и антискелетные формы роста кубоида сложенные октаэдрическими слоями роста – псевдокубические формы роста плоскогранного октаэдра. Прослежена кристалломорфологическая эволюция кубоидов, происходившая в ходе объемного растворения индивидов в флюидосодержащем расплаве, транспортировавшем их к поверхности земной коры. Изучение переходных форм растворения кубоидов алмаза показало, что независимо от комбинаций граней кубоида с подчиненными комбинационными гранями октаэдра, ромбододекаэдра, и тетрагексаэдра наблюдавшихся на кристаллах кубического габитуса подвергшихся резорбции, конечной формой растворения индивидов алмаза является кривогранный тетрагексаэдр. Установлено, что растворение кубоидов завершалось травлением поверхности алмазов с образованием дисковидного микрорельефа в виде идеально округлых беспорядочно расположенных углублений в результате реакционного взаимодействия с кавитационной газовой фазой, выделившейся в виде микропузырьков при декомпрессии кимберлитового расплава во время его подъема к поверхности земной коры.

Ключевые слова: алмаз, кубоид, морфология, микрорельеф, округлые кристаллы, эволюция роста, эволюция растворения, Сибирская платформа

DOI: 10.7868/S0016752517090059

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на исчерпывающий характер исследований, проведенных со времени первого детального описания А.Е. Ферсманом и В. Гольдшмидтом (Fersmann, Goldschmidt, 1911) округлых бразильских алмазов в качестве форм посткристаллизационного растворения, последующие детальные работы А.А. Кухаренко (1946), И.И. Шафрановского (1964), Ю.Л. Орлова (1984), В.И. Ракина (2013) и других авторов изучивших подобные алмазы из россыпей Тимана, Урала, ЮАР, Бразилии, Намибии и других регионов, природа происхождения округлой формы кристаллов алмаза, так называемого “уральского” (“бразильского”)

типа, долгое время оставалась предметом острых дискуссий между сторонниками теории их образования за счет послыйного роста октаэдра и растворения (Кухаренко, 1954; Аншелес, 1956; Орлов, 1959; Гневушев и др., 1964). Попытки экспериментально воспроизвести аналогичные природным кривогранные формы кристаллов алмаза (Fersmann, Goldschmidt, 1911; Григорьев, Шафрановский, 1942) со временем увенчались успехом и завершили многолетнее противостояние. Были получены полуокруглые формы кристаллов за счет частичного растворения синтетических алмазов (Чепуров, Пальянов и др., 1985), а затем округлые додекаэдрониды, как конечные формы глубокого объемного растворения плоскогранных природ-

ных кристаллов алмаза (Хохряков, Пальянов, 1990, Fedortchouk et al., 2007) воспроизведенные в силикатных и карбонатных расплавах с обязательным наличием воды в реакционной среде.

Изучение типоморфных особенностей алмазов показало, что в высокопродуктивных промышленных россыпях северо-востока Сибирской платформы присутствуют, по меньшей мере, три группы алмазов, генетический тип источника которых до сих пор остается неизвестным (Герасимчук и др., 2011). По классификации Ю.Л. Орлова (Орлов, 1984) это типичные округлые додекаэдровиды “уральского” типа I разновидности, кубовиды II и III разновидностей и алмазы V и VII разновидностей. Кроме того, меньшую долю составляют характерные для кимберлитовых месторождений плоскогранные и ламинарные октаэдры I разновидности и агрегаты алмазов импактного генезиса связанные с Попигайским кратером. По комплексу уникальных минералогических и геохимических характеристик происхождение кубовидов II разновидности связывают с отдельным источником неизвестного генетического типа (Афанасьев и др., 2011).

В настоящее время особенно подробно изучена эволюция растворения октаэдров алмаза и их производных форм – кривогранных додекаэдровидов. По сравнению с ними кристаллы кубического габитуса не были изучены так предметно и исследования в этом направлении главным образом опираются на результаты экспериментов по их растворению (Khokhryakov, Pal'yanov, 2007). Наиболее детальная работа по изучению форм растворения природных кристаллов проведена на примере кубовидов из уральских россыпей принадлежит А.А. Кухаренко (1946). Значительно большее внимание уделено среде кристаллизации волокнистых кубовидов алмаза из россыпей северо-востока Сибирской платформы (Зедгенизов и др., 2011) и кимберлитов (Zedgenizov et al., 2007; 2009).

Основной целью настоящего исследования является проследить эволюцию роста и кристалломорфологические ряды переходных форм растворения природных кристаллов кубического габитуса к кривогранным гексаэдроидам алмаза. Для установления вероятных взаимосвязей между внешней морфологией роста и растворения кубических кристаллов с их внутренним строением из обширной коллекции алмазов были отобраны кристаллы кубической формы и округлые кривогранные кубовиды алмаза II разновидности, извлеченные из промышленных россыпей Анабарского алмазоносного района: Эбелях, Маят, Моргогор.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования внешней морфологии и анатомии кубовидов алмаза, проведены с помощью стандартных методов оптической микроскопии.

Изображения в проходящем, косом, поляризованном и комбинированном свете фиксировались на микроскопе Olimpus SZX12. Съемка картин фотолюминесценции алмазов проведена с помощью ультрафиолетового осветителя ОИ-18 с ртутной лампой и светофильтром УФС 6-5 с максимальной пропускной способностью света с длиной волны 360 нм.

Наблюдение изображений микрорельефа поверхности кристаллов и картин катодолюминесценции полированных пластин, позволяющее изучить детальное внутреннее строение кристаллов алмаза, выполнено на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6480LV с катодолюминесцентной приставкой Gatan MiniCL, при ускоряющем напряжении 20 кВ. Из отобранных кристаллов методом размерной механической обработки изготовлены плоскопараллельные полированные пластины ориентированные в кристаллографических плоскостях (100) или (110). Перед съемкой поверхность алмазных пластин покрывалась углеродным токопроводящим напылением.

МОРФОЛОГИЯ КРИСТАЛЛОВ

Отличительной характеристикой изученных алмазов II разновидности из промышленных россыпей Анабарского алмазоносного района является их интенсивная окраска самых различных оттенков от желтого до желто-коричневого и оранжево-желтого. По мере повышения интенсивности окраски их прозрачность снижается. В изученных нами выборках кубовиды II разновидности уступают по степени распространенности лишь кривогранным додекаэдроидам I разновидности. В коллекции алмазов из россыпей Маят их количество составляет – 29%, из россыпей Моргогор – 36% и Эбелях – 32%. Обращает на себя внимание, что кубовиды и округлые тетрагексаэдровиды алмаза II разновидности встречаются во всех изученных коллекциях почти в равных долях.

Морфология кубических кристаллов алмаза II разновидности весьма сложна и разнообразна. По причине сложного строения и искривления кривогранных поверхностей в дальнейшем описании значение индексов граням куба, ромбододекаэдра и тетрагексаэдра в тексте статьи и на рисунках присвоены условно. Основными формами роста кристаллов чаще являются кривогранный куб (кубовид), иногда с плоскогранной поверхностью {100} (рис. 1а), а также комбинационные формы куба {100} и ромбододекаэдра {110} (рис. 1б) с различной степенью их развития. Редко наблюдавшиеся грани ромбододекаэдра {110} представлены зеркально-гладкими поверхностями (см. рис. 1б). Часто встречаются комбинации кубоида {100} с подчиненным развитием комбинационных граней тетрагексаэдра {210} (рис. 1в). Редко

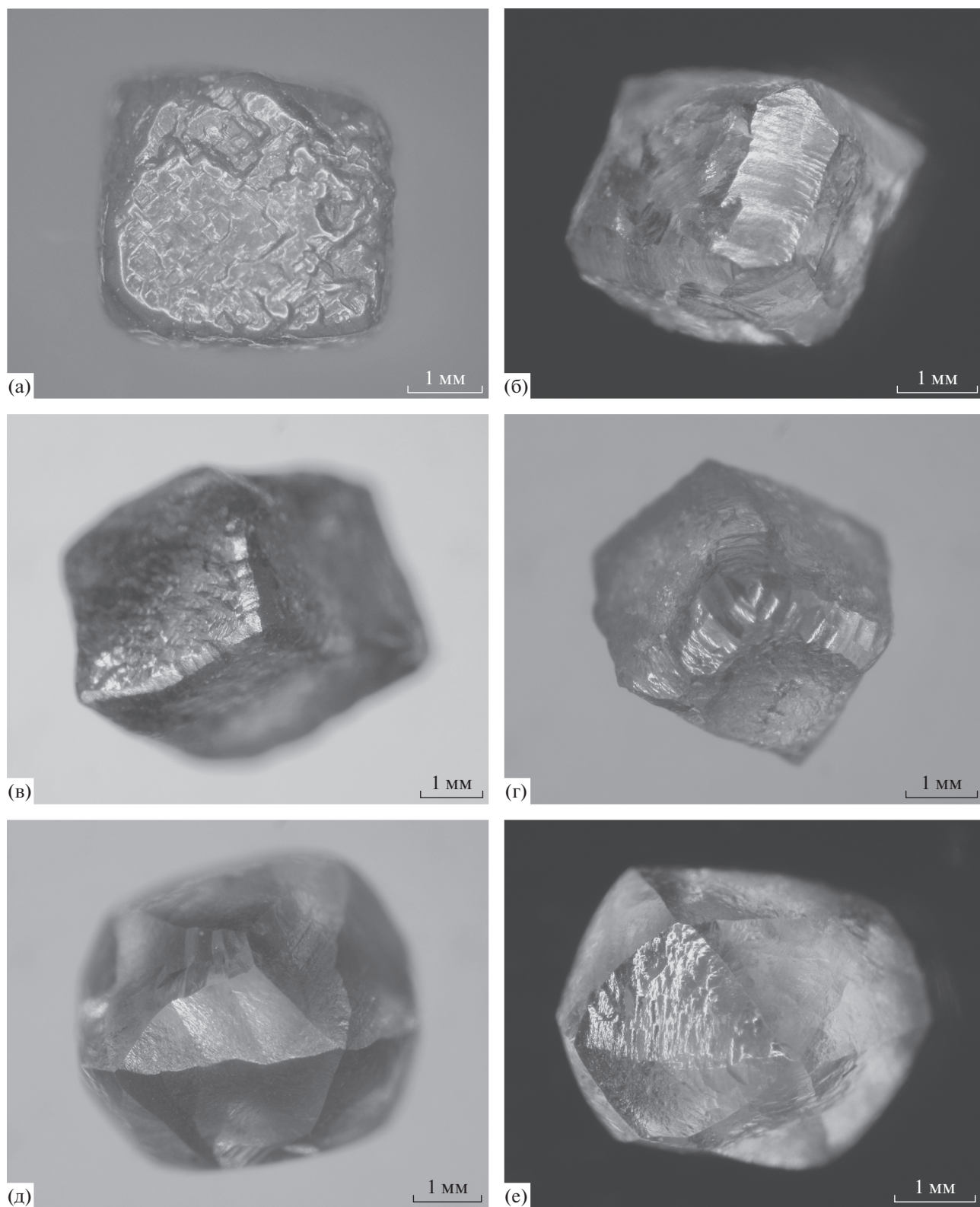


Рис. 1. Габитусные формы роста и растворения кубических кристаллов II разновидности из россыпей Анабарского района: (а) микроблочный кубический кристалл; (б) комбинация куба и ромбододекаэдра; (в–г) – комбинации куба и тетрагексаэдра; (д–е) кривогранные поверхности тетрагексаэдроида возникшие в результате растворения кубических кристаллов.

на кристаллах встречаются комбинации формы кубоида в сочетании со слабо развитыми поверхностями тетрагексаэдра $\{210\}$ и октаэдра $\{111\}$ (рис. 1г). Большинство кубических индивидов в различной значительной степени искажены, и, в зависимости от кристаллографического направления уплощения или удлинения, кристаллы имеют визуальную тетрагональную и ромбическую симметрию. Кроме отдельных кристаллов выделяются незакономерные сростки кубоидов и редко двойники прорастания по шпинелевому закону.

Формы растворения практически всегда обнаруживаются в виде отдельных элементов микрорельефа поверхности кристаллов, реже они определяют сам облик кубических индивидов. Обычно они представлены сочетаниями сферических выпуклых поверхностей близких по положению граням тетрагексаэдра разделенных характерным “гранным швом” расположенным параллельно ребрам куба (рис. 1д, 1е). Кривизна граней тетрагексаэдроидов увеличивается от ребер куба в направлении осей четвертого порядка, что отличает их от таковых у кривогранных додекаэдроидов и октаэдроидов (Кухаренко 1946). Степень развития сферических поверхностей тетрагексаэдроидов различна. Обычно они комбинируют с гранями кубоида (рис. 1д) вплоть до полного их исчезновения из огранки кристаллов вероятно происходившего в процессе посткристаллизационного растворения (рис. 1е). Иногда на кубических кристаллах наблюдаются вогнутые поверхности растворения ограниченные контурами граней тетрагексаэдроидов. Наибольшая их кривизна достигается в средней части ребер куба в виде входящих перегибов и швов, известных в качестве форм растворения со времени их подробного описания А.Е. Ферсманом и В. Гольдшмидтом (1911).

ОСОБЕННОСТИ МИКРОРЕЛЬЕФА

На перечисленных выше формах кубических кристаллов II разновидности нами отмечены разнообразные особенности микрорельефа роста и растворения. Формы растворения, как правило, доминируют на поверхности граней, а на заключительных этапах полностью вытесняют не только скульптуры роста, но и первичные контуры вершин и ребер кубоида. Различаются симметричный и асимметричный типы микрорельефа роста и растворения. Симметричный микрорельеф имеет правильную геометрическую ориентировку относительно кристаллографических направлений габитусного гексаэдра, асимметричный микрорельеф характеризуется расчлененными положительными и отрицательными поверхностями в виде борозд травления, каверн и холмов неправильной формы.

На плоских гранях кубоида $\{100\}$ симметричный микрорельеф роста отмечен на единичных

кристаллах. На поверхности граней развиты многочисленные тетрагональные пирамиды усеченные плоскостями $\{100\}$ стороны которых близки по положению к граням октаэдра $\{111\}$ (см. рис. 1а). Часто их дополняют тетрагональные впадины, стенки которых огранены $\{111\}$, и плоским дном параллельным граням $\{100\}$. Тетрагональные сечения положительных и отрицательных скульптур микрорельефа обратно ориентированы под прямым углом относительно ребер куба. Они образуют сложные комбинации элементов положительного и отрицательного микрорельефа сложенного перечисленными кристаллографическими плоскостями. Ребра и вершины пирамид, как и самих кубических кристаллов обычно скругленные вследствие позднего растворения. Грани ромбододекаэдра $\{110\}$ как правило покрыты гладкими и крупными ступенями роста с округлыми торцами генерированными вершинами куба $:111$: (рис. 1б).

В отличие от форм растворения октаэдрических кристаллов для растворенных кубоидов не характерны полосы пластической деформации, однако и они отмечены на сферических гранях гексаэдроидов (рис. 1д). Ориентировка полос пластической деформации, также как и на сферических гранях додекаэдроидов “уральского” типа, совпадает с кристаллографическими направлениями октаэдра $\{111\}$.

На реликтовых поверхностях куба обычно наблюдаются характерные обратно-ориентированные тетрагональные ямки травления. Стенки тетрагональных ямок часто сложены ступенчатыми микрогранями различных положений. Их скопления нередко формируют воронкообразные вогнутые поверхности на значительно корродированных кубоидах и широко распространены на кристаллах из россыпей Сибирской платформы (Zedgenizov et al., 2016).

Микрорельеф растворения на округлой поверхности псевдограней тетрагексаэдроидов также имеет симметричный характер. К формам такого типа относятся хорошо известные генетически близкие по своему происхождению элементы занозистого, шестоватого, зубчатого и черепитчатого рельефа растворения. Конусы растворения на сферической поверхности тетрагексаэдра обращены своими вершинами по направлению к ближайшей оси четвертого порядка кристалла. Точно таким же образом ориентирован рисунок отмеченных выше, видов микрорельефа на поверхности тетрагексаэдроидов. Нередко элементы зубчатого и черепитчатого микрорельефа ближе к вершинам $:100$: становятся мельче и объединяясь трансформируются в спускающиеся в том же направлении кулисы дугообразных ступеней. Положение элементов микрорельефа ясно указывает на основное направление растворения кубиче-

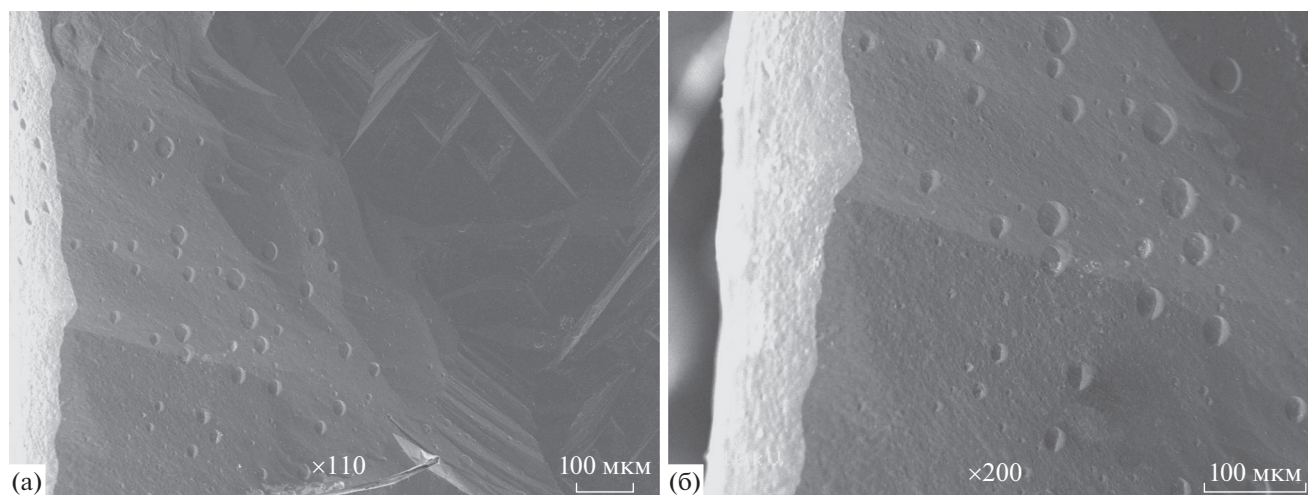


Рис. 2. Дисковидный микрорельеф на поверхности кубического кристалла алмаза из россыпи Эбелях: (а) ямки травления, покрывающие искривленную грань тетрагексаэдра и элементы тетрагонального отрицательного микрорельефа грани куба; (б) увеличенный фрагмент изображения.

ских кристаллов от ребер к центральным частям граней куба.

К асимметричным типам микроскульптуры граней относятся почковидный и шагреневый микрорельеф растворения, впрочем, иногда образующий и симметричный рисунок. Кроме того обнаружены неориентированные каверны, сколы, борозды и каналы травления, вероятно, расположенные вдоль кристаллических дефектов и различных границ срастания дезориентированных субиндивидов и сдвойникованных кристаллов.

Следует отметить, что перечисленные виды асимметричного микрорельефа растворения подчеркивающих их блочное строение, а также элементы шагреневого рельефа и скоплений симметричных отрицательно ориентированных тригональных ямок травления на поверхности кристаллов, воспроизведены в экспериментах по растворению алмазов октаэдрического и кубического габитуса (Khokhryakov and Pal'yanov, 2007, 2015).

Помимо типичных для кривогранных кубоидов перечисленных отрицательных форм асимметричного микрорельефа связанного с растворением, на кристаллах обнаружен не описанный ранее на кубоидах дисковидный микрорельеф поверхности. Интересно, что подобный по облику асимметричный микрорельеф был отмечен на кривогранных додекаэдроидах “уральского” типа из различных россыпей северо-востока Сибирской платформы (Павлушин и др., 2015). В отличие от дисковидного микрорельефа, наблюдавшего на додекаэдроидах в виде скоплений изометричных углублений с ровным и плоским дном, на кубоидах подобный микрорельеф имеет вид сферических ямок чашеобразной формы. Лишь некоторые дисковидные ямки имеют плоское дно. В целом же их характеристики объединя-

ет совершенная по геометрии круглая форма границ углублений, неодинаковые размеры ямок и их хаотичное распределение на поверхности кристаллов (рис. 2). Размеры ямок составляют в диаметре от долей до 20–50 мкм. Дисковидный микрорельеф в большей степени распространен на кривогранной поверхности тетрагексаэдра и значительно меньше по размеру и количеству наблюдаются на элементах тетрагональных ямок травления покрывающих грани кубоида. Это ясно указывает на более позднее появление дисковидных углублений по сравнению с перечисленными видами симметричного микрорельефа.

ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ

Кубоиды II разновидности проявляют оранжевый и несколько реже желтый цвет свечения в ультрафиолетовых лучах. При этом свечение кристаллов, как правило, у поверхности неоднородное, реже зональное. По нашим наблюдениям срезов кристаллов на периферийных частях зональности желтое свечение усиливается, либо проявляется оранжевый цвет фотолюминесценции. Фрагментарный характер свечения оранжевого цвета у поверхности округлых гексаэдроидов указывает, что реликты периферийной зональности сохранились после этапа частичного растворения кристаллов, а сферическая форма граней растворения кубоидов способствовала этому. Исходя из перечисленных наблюдений, можно предположить, что и гексаэдроиды, проявляющие однородную желтую люминесценцию, утратили периферийный оранжевый цвет свечения вследствие процесса растворения полностью уничтоживших их внешнюю зону роста. Особенности подобной неоднородности свечения алмазов II разновидности ранее описаны в работе

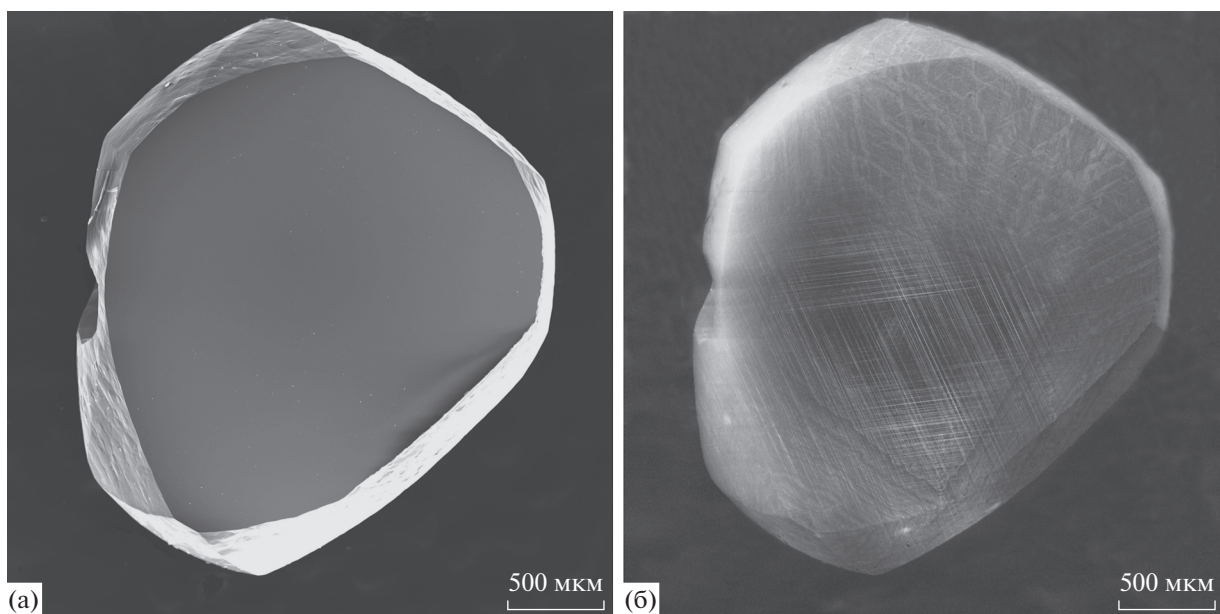


Рис. 3. Проецирование ростовой зональности по кубу на округлые грани растворения гексаэдроиды, (а) изображение пластины алмаза в обратно-рассеянных электронах (BSE); (б) свечение пластины алмаза в режиме катодолуминесценции. Россыпь Маят.

(Zedgenizov et al., 2016). Характерный для кристаллов набор центров люминесценции (N3, H3, S1, NV⁰ и NV⁻) также характерен и для центральной кубической зоны, так называемых переограниченных алмазов (Скузоватов и др., 2015).

Из картин фотолуминесценции и катодолуминесценции ростовой зональности обнаружено, что в ряде случаев она не соответствует морфологии поверхности кривогранных кристаллов. В ростовой зональности кристаллов присутствуют зоны роста, отвечающие форме округлого кубоида. Однако, нередко можно наблюдать, как выпуклые зоны прерываются поверхностью самого кристалла, из чего следует, что сферическая поверхность граней сформирована вследствие эпигенетического растворения (рис. 3). В кристаллах II разновидности проявляющих ясно выраженную зональность, соответствующую росту в форме куба, появление и распространение слоев роста граней октаэдра по нормали доминировало, что приводило к антискелетному росту октаэдрического кристалла и приобретению им гексаэдрического облика. Описанный вариант зональности часто трактуется как изменение механизма роста кристаллов, вследствие чего алмаз покрывается подобными псевдогранями куба (Zedgenizov et al., 2009; Зедгенизов и др., 2011; Скузоватов и др., 2011, 2012, 2015; Skuzovатов et al., 2016). На поверхности последних можно наблюдать множество описанных выше октаэдрических вицинальных граней, имеющих ступенчатое строение. Это выражается в том, что при съемке в режиме катодолуминесценции зоны роста псевдограней куба

осложняются неровными поверхностями дислокационных нарушений (см. рис. 3б), а сами зоны не имеют четко выраженных линейных очертаний. В ростовой зональности также иногда проявляются линии, совпадающие по направлению с пирамидами роста граней ромбододекаэдра. Представляется, что они также являются комбинационными формами взаимодействия граней куба и октаэдра.

Хорошо выраженная ростовая секториальная неоднородность также зафиксирована в кристалле, ограниченном доминирующими гранями куба и подчиненными гранями тетрагексаэдра (рис. 4). В поляризованном свете, проходящем через вырезанную в плоскости (110) кристалла пластину изоклины аномального двупреломления фиксируются вдоль секторов смежных пирамид роста $\langle 100 \rangle$. Внутренние упругие напряжения связаны со скоплением дефектов в секторах роста соответствующих граням тетрагексаэдра $\{210\}$. Особенно ясно секториальное распределение дефектов мы видим на картине катодолуминесценции данного кристалла (рис. 4). В секторах роста $\langle 100 \rangle$ наблюдаются системные линейные дефекты главным образом параллельные кристаллографическим плоскостям $\{111\}$. Более редко наблюдаются линии скольжения вдоль плоскостей параллельных кубу $\{100\}$. В областях смежных с секторами роста $\langle 210 \rangle$ те и другие проявлены с увеличивающейся густотой. Дробление микрокристаллических блоков параллельно указанным плоскостям скольжения в секторах $\langle 210 \rangle$ становится настолько частым, что они едва различимы между собой.

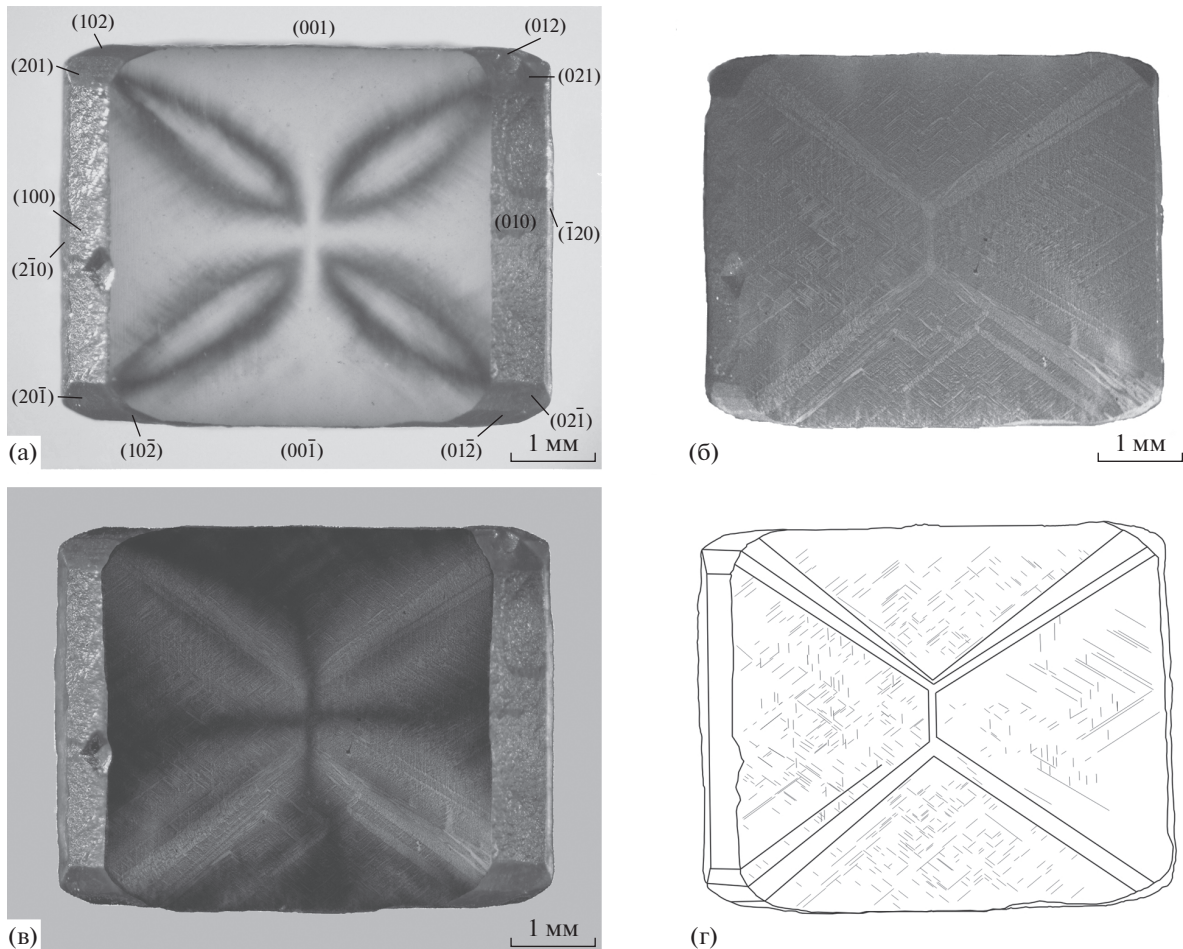


Рис. 4. Внутреннее строение кристалла алмаза в форме комбинации граней кубоида и тетрагексаэдроида, пластина вырезана в плоскости (110): (а) картина аномального дупреломления и индексы граней кристалла; (б) топограмма катодолюминесценции; (в) комбинированное изображение пластины в поляризованном свете и в режиме катодолюминесценции; (г) схема строения кристалла с секторами роста граней $\{100\}$, $\{210\}$ и выявленной ориентировкой дефектов в виде плоскостей скольжения.

По экспериментальным данным (Пунин, 1981) спусковым механизмом возникновения автодеформационных дефектов в кристаллах являются высокие пересыщения по компонентам кристаллообразующего вещества и наличия в среде поверхностно-активных примесей. Вероятно, в данный период кристаллизации происходило избирательное поглощение поверхностно-активных примесей секторами роста граней куба и тетрагексаэдра в роли которых, по-видимому, выступали микровключения твердых частиц силикатных и карбонатных фаз зафиксированных микроскопом анализатором. Их скопления хорошо наблюдаются в кристалле в проходящем свете и имеют выраженное геометрическое распределение в объеме кристалла. Наибольшая их концентрация наблюдается вдоль кристаллографических плоскостей (111) и в меньшей степени вдоль (100) (рис. 4б, 4г).

В подобных по строению кристаллах ISTD-16 и ISTD-19, ранее описанных в работе (Zedgenizov

et al., 2016) на картине катодолюминесценции (рис. 5) можно заметить, что период роста соответствующий возникновению дефектов с плоскостями скольжения по системе плоскостей $\{111\}$ и $\{100\}$ сменился тангенциальным ростом с зональностью по кубу $\{100\}$. В случае слабо растворенного кристалла ISTD-16 зональность имеет форму куба с заметно выпуклыми гранями (рис. 5а). Образование округлой кубической зональности, связано с дискретным положением плоскостей скольжения вдоль $\{111\}$ и увеличивающейся их частотой к центральным частям кубических граней. По-видимому, данная форма является пограничной между дефектным кубоидом и автодеформированным агрегатом субиндивидов алмаза. Подтверждение этому мы находим на картине катодолюминесценции растворенного кристалла ISTD-16 (рис. 5а). Здесь в кубических секторах роста также наблюдается криволинейная округлая зональность. Разориентированные октаэдрические микроблоки, слагающие округлую зональность

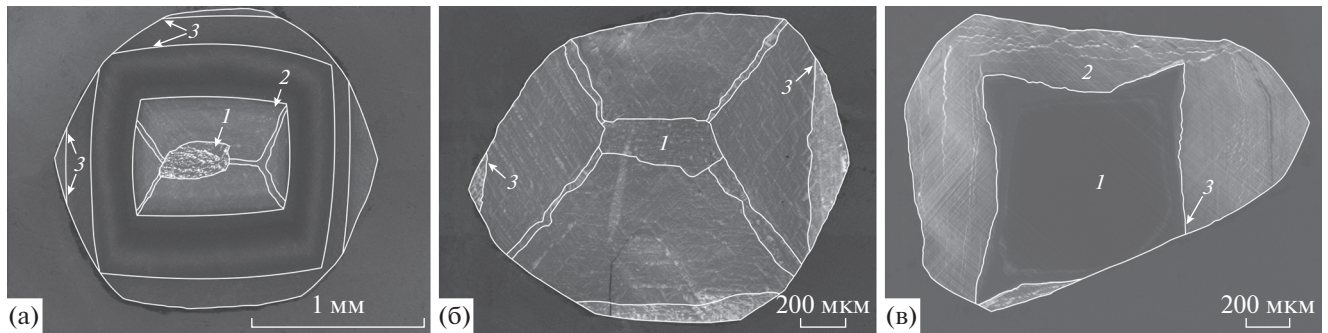


Рис. 5. Строение кривогранных кубоидов алмаза, изображения свечения срезов кристаллов по (100) в катодных лучах: (а) сложная зональность в кривогранном тетрагексаэдроиде представленная резорбированным мозаичным ядром (1), секториальной зоной (2) и округлой зональностью по кубу (3) прерываемой растворенной поверхностью кристалла, образец ISTD-16; (б) секториально-зональное строение кривогранного тетрагексаэдроида с мозаичным ядром (1), секториальной скелетной зоной (2) и зональностью (3) прерываемой растворенной поверхностью кристалла, образец ISTD-19; (в) округлый гексаэдроид с антискелетным ядром в форме куба с чашеобразно вогнутыми гранями (1) и скелетной зональностью (2) прерываемой растворенной поверхностью кристалла, образец ISTD-9.

в кристаллах кубического габитуса, вероятно, представляют собой поверхность характерную для расщепленных кристаллических сферолитов (сферокристаллов), хорошо известных среди опытных образцов по воспроизведению автодеформационных ростовых дефектов в кристаллах (Пунин и др., 2004).

Судя по последовательному появлению и строению отдельных зон, в кубических кристаллах алмаза ранней генерации наблюдаются особенно значительная пластическая дефектность. По видимому на начальном этапе роста кристаллов возникновению автодеформаций сопутствовал доминирующий механизм ротационной пластичности. Разориентированные микроблоки составляют мозаичную структуру кристалла, хорошо проявленную в катодолуминесценции при максимальных увеличениях. Так, в образце ISTD-16 (см. рис. 5а) бесформенное, очевидно резорбированное ядро кристалла сложено мозаичными микроблоками. В кристалле ISTD-19 подобное мозаичное ядро, по-видимому, не затронуто растворением (рис. 5б) и имеет отчетливое кубическое очертание. Основные сдвиги дефектов также происходили в направлениях плоскостей куба {100} (рис. 5в, 5г).

Антискелетные формы роста кубических кристаллов наблюдаются как во внешней морфологии кристаллов, так и в их внутреннем строении. Так, судя по катодолуминесценции внешняя форма кристалла ISTD-9 (рис. 5в), в форме комбинации граней куба и кривогранного тетрагексаэдроида, не совпадает с картиной его внутреннего антискелетного строения. В средней части этого кристалла наблюдается ясно выраженная вогнутая зональность близкая по положению к кубу. Развитие индивида происходило посредством антискелетного роста октаэдрических граней. Очевидно, на этой стадии роста кристаллы

представляли собой кубические индивиды с сильно вогнутыми ступенчатыми гранями. Не исключено, что в некоторых случаях кубическая габитусная форма полностью сменялась октаэдрической. Подобные случаи смены габитусных форм описаны, например, для кристаллов алмаза I разновидности из кимберлитовых трубок Якутской кимберлитовой провинции (Zedgenizov et al., 2006; Скузоватов и др., 2011, 2012, 2015; Skuzovатов et al., 2016). Таким образом, морфология антискелетных форм роста октаэдра все же в корне отличается от кубических кристаллов присутствием в огранке граней октаэдра, вырождение которых в ходе антискелетного роста, в конечном счете, приводит к появлению псевдограней куба и ромбододекаэдра.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Смена морфологии алмаза от куба к грубослоистому, а затем к плоскогранному октаэдру связанная с падением пересыщения кристаллообразующего вещества общепризнанна и сформулирована И. Сунагава (Sunagawa, 1990). Подтверждается это и экспериментальными данными. Так же, показано, что на ранней стадии кристаллизации минералов пластическая автодеформация вызвана максимальными пересыщениями в кристаллообразующей среде (Пунин, 1981). Применительно к алмазам на кристаллах более поздней генерации с падением пересыщения, расщепление минимизировалось до линейного трансляционного скольжения вдоль кристаллографических плоскостей {111} широко распространенного среди индивидов алмаза кубического габитуса. Приняв данные положения за основу, и суммируя с ними наши наблюдения морфологии кубоидов II разновидности, можно сделать вывод, что кроме смены кубической огранки октаэдрической с падением степени пересыщения углерода в кристаллообразую-

шей среде снижается и уровень дефектности кубических кристаллов.

Определенную роль в формировании автодеформационных дефектов могло сыграть влияние поверхностно-активных веществ (Пунин, 1981; Павлушин и др., 2006). Очевидно, их концентрация в кристаллообразующей среде также менялась с тенденцией снижения их содержания. В качестве поверхностно-активного вещества активирующего возникновение автодеформационных дефектов во время роста кристаллов алмаза мог выступать азот. Последовательное падение содержания примеси азота в ростовой зональности алмазов от куба к плоскогранному октаэдру эмпирически доказано на примере кристаллов из кимберлитов (Zedgenizov et al., 2006). Таким образом, в условиях падения содержания поверхностно-активной примеси можно допустить снижение количества автодеформационных дефектов и предположить связь с постепенной последовательной сменой морфологии кубоидов в течение истории роста.

К развитию антискелетных форм кубических кристаллов алмаза, спорадически дополнявших эволюционный ряд форм роста кубических кристаллов, вероятно, имел отношение диффузионный транспорт вещества к растущему кристаллу (Sunagawa, 1990). Затрудненное питание кристалла и преобладание диффузионного лимита во время скелетного роста кубических кристаллов могло быть вызвано повышенной вязкостью вмещающего расплава. Постепенное снижение вязкости расплава в процессе его кристаллизации приводило к возникновению свободной конвекции потоков кристаллообразующих частиц и смещению режима роста кристаллов в область кинетического лимита. По мере повышения его влияния с падением пересыщения, антискелетный рост октаэдра по нормальному механизму сменялся тангенциальным развитием октаэдрических граней кристаллов алмаза.

Последовательное изменение формы роста плоскогранных кристаллов сменявшихся затем скелетными формами, дендритами и агрегатами поликристаллических сростков связанное с постепенным увеличением пересыщения в среде кристаллизации показано в экспериментальных работах по выращиванию синтетических кристаллов алмаза (Пальянов и др., 1997). Полученный результат позволяет также говорить о увеличении степени дефектности кристаллов алмаза с ростом пересыщения и постепенном перерождении в ходе кристаллизации индивидов в агрегаты. В природных условиях логичной представляется цепь событий связанной с падением пересыщения в кристаллообразующей среде, что мы и наблюдаем в эволюционных рядах морфологии роста кубических кристаллов алмаза. В ходе изучения особенностей секториального и зонального

строения кубоидов II разновидности из россыпей Анабарского района в кристаллах нами зафиксированы следующие онтогенетические области и соответствующие им этапы эволюции роста: микроблочные мозаичные кубоиды с дефектами образованными по механизму ротационной пластичности – кубоиды с линейными трансляционными деформациями – кубоиды и антискелетные формы куба сложенные октаэдрическими слоями роста – плоскогранные октаэдры.

По комплексу кристалломорфологических признаков можно предположить генетическое родство кубических алмазов II разновидности и округлых гексаэдроидов II разновидности – переходных форм к додекаэдроиду – конечной форме растворения алмаза. Подобие их внутреннего строения позволяет говорить о сходстве условий кристаллизации индивидов данных морфологических типов и разделившем их эволюцию периоде постгенетического растворения. Ряд кристаллов II разновидности с характерной для растворения кривогранной формой полностью утратили внешнюю зону с оранжевым свечением или частично сохранили ее реликты на периферии ростовой зональности кристаллов. Дифференциация их типоморфных свойств, последовавшая в посткристаллизационный период растворения, позволяет предположить несколько коренных источников алмазов с разной глубиной заложения в мантии либо многофазность внедрения транспортера алмазов (Zedgenizov et al., 2016).

Впервые обнаруженный на кубических кристаллах алмаза дисковидный тип микрорельефа ранее наблюдался исключительно на кривогранных додекаэдроидах и по-видимому связан с порождавшими их процессами растворения. Идентичный по облику дисковидный микрорельеф ранее описан на кривогранных додекаэдроидах алмаза из россыпного района Спрингфилд в Южной Австралии (Tarrert et al., 2009), туффизитов Ефимовского месторождения на Урале (Коротченкова и др., 2012) и россыпей северо-востока Сибирской платформы (Павлушин и др., 2015). Недавно подобные дисковидные отрицательные скульптуры отмечены уже на алмазе из кимберлитов трубки Архангельская (Васильев и др., 2016). Последние были обнаружены на растворенной поверхности протоматического скола октаэдрического кристалла и авторы связали появление дисковидных ямок с растворением алмаза под покрывавшими его каплями и пузырями в гетерогенном расплаве. До последнего времени были известны положительные формы дисковидного и петельчатого микрорельефа (Кухаренко, 1954; Орлов, 1984) связанные с экранированием поверхности алмаза компонентами гетерогенной среды, защищавшими алмазы от растворения (Сонин и др., 1998). Отрицательные формы дисковидного отличаются от положительных самим характером ре-

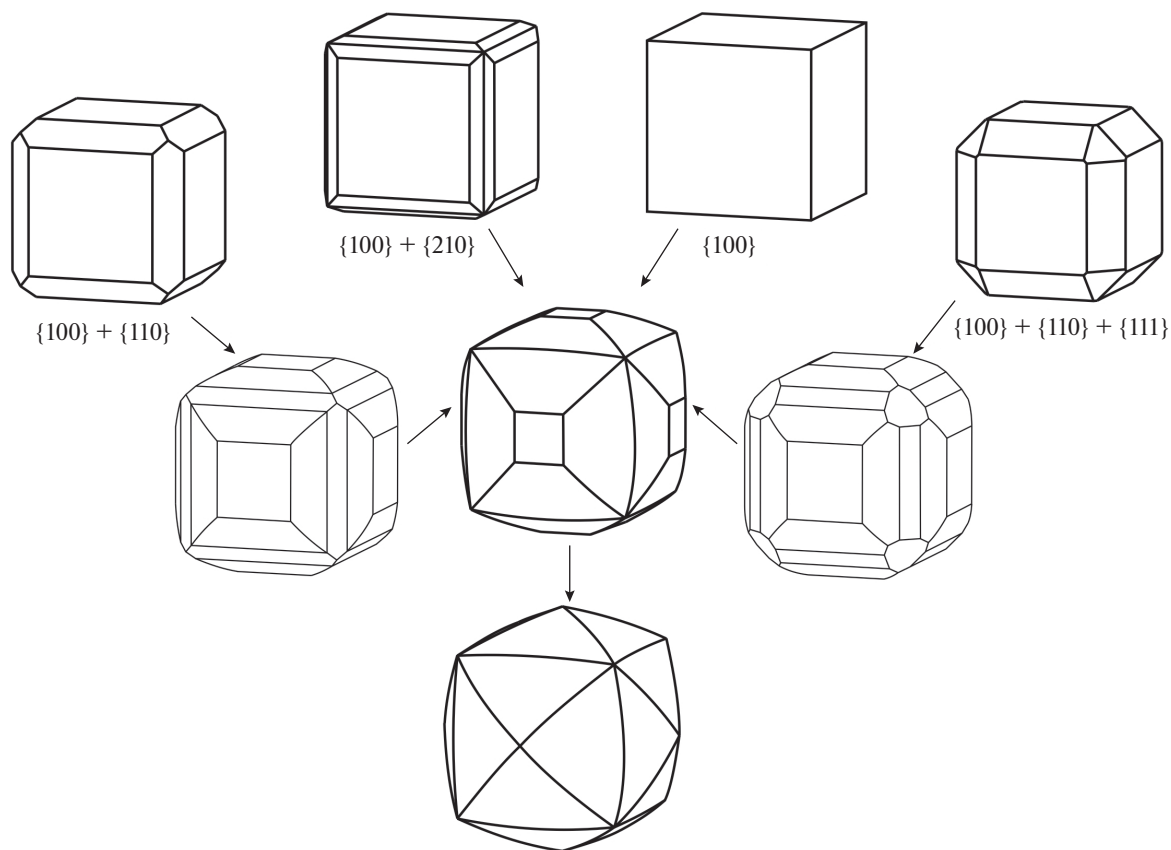


Рис. 6. Эволюционные ряды форм растворения кубических кристаллов II разновидности в зависимости от первоначальной огранки кристаллов. Наблюдавшиеся формы кристаллов выделены жирными линиями, предполагаемые формы растворения показаны тонкими линиями.

льефа, и подчеркиваемой всеми исследователями, идеальной округлой формой. Кроме того, большинство авторов (Tarrert et al., 2009, Коротченкова и др., 2012, Павлушин и др., 2015) склоняются к мнению, что ведущую роль в их образовании сыграли агрессивные к алмазу газовые пузырьки, либо пузырьки флюида (Васильев и др., 2016). Очевидно, что только сферическая форма растворителя при условии его гомогенного состава могла породить особую форму ямок в виде идеально правильной вогнутой полусферы. По оценкам нуклеации газовых пузырьков в магматическом расплаве в результате мгновенной декомпрессии при моделировании эксплозивного извержения (Чернов и др., 2004) их размер при температуре $T = 870^\circ\text{C}$ составляет 6 мкм при максимальном показателе 80 мкм, что полностью соответствует диапазону размеров дисковидных ямок наблюдавшихся на поверхностях растворенных кубоидов и описанных ранее перечисленными авторами на поверхностях додекаэдровидов из россыпей Южной Австралии (1–2 до 25 мкм), Урала (до 30 мкм), Сибирской платформы (0.5–50 мкм) и трубки Архангельская (2–70 мкм). Процесс химического травления алмаза, связанный с газовыми кавитационными явлениями, вероят-

но, протекал при близкой температуре во время резкого снижения гидростатического давления в флюидонасыщенном расплаве при его дегазации. Различия в характере контакта газовых пузырьков с поверхностью на кубических и додекаэдрических кристаллах алмаза можно было бы объяснить различной вязкостью вмещающего расплава. В случае вмещающего алмазы расплава сравнительно пониженной вязкости на додекаэдроидов кавитационные полости полностью соприкасались с поверхностью алмаза, и газовая составляющая вступала в химическую реакцию по всей площади контакта. В результате дно ямок травления приобретало плоскую форму. На кубоидах алмаза линзовидные углубления образовались при их ограниченном контакте, что может быть связано с различными физическими свойствами магматического расплава – вязкостью, смачиваемостью поверхности алмаза и величиной поверхностного натяжения агрессивной фазы.

Слои кубической ростовой зональности и секторов роста под гранями гексаэдроида (рис. 3) пересекаются с поверхностью кристалла, не имея ничего общего в очертаниях с его внешней формой. Отсутствие связи в морфологии поверхности изученных кристаллов с их внутренней ростовой

зональностью еще раз ясно указывает на происхождение округлых кривогранных поверхностей за счет постгенетического растворения кристаллов. Кроме того, вслед за итогами работы по экспериментальному растворению природных алмазов в водосодержащих карбонатных и силикатных расплавах (Хохряков и Пальянов, 1990), мы можем отметить, что кристаллы алмаза кубического габитуса в ходе растворения, последовательно приобретая промежуточные кривогранные формы близкие к его первоначальному облику, стремятся принять стационарную форму растворения соответствующую округлому тетрагексаэдрю, но без дальнейшего перехода к додекаэдрю.

В подтверждение экспериментальных данных по растворению алмазов в водосодержащих расплавах (Khokhryakov and Pal'yanov, 2007) среди растворенных форм кубоидов II разновидности нами наблюдалась лишь одна основная переходная форма от исходных плоскогранных форм роста кристаллов к конечной (стационарной) форме растворения — кривогранному тетрагексаэдрю. Данной формой является комбинация кривогранного тетрагексаэдроиды с реликтовыми гранями плоскогранного куба. Исходя из построенной нами принципиальной схемы эволюции форм растворения природных алмазов кубического габитуса (рис. 6) следует, что кристаллы ограненные плоскостями куба и комбинационными формами куба и тетрагексаэдроиды без каких либо дополнительных переходных форм трансформируются в данный тип комбинационного многогранника. Основным различием между такими индивидами является соотношение развития граней куба и тетрагексаэдроиды, площадь которого увеличивается в зависимости от повышения степени растворения. Однако, среди форм роста кубоидов обнаружены также кристаллы ограненные плоскостями куба с псевдогранями ромбододекаэдра, а также комбинационные формы куба, октаэдра с ложными гранями ромбододекаэдра (см. рис. 6). Растворение кристаллов перечисленных видов комбинационных форм на начальных этапах появления кривогранных поверхностей тетрагексаэдроиды может происходить с сохранением реликтов перечисленных граней, но среди изученных кристаллов подобные формы, не были обнаружены. Таким образом, мы вынуждены их отнести к гипотетическим формам растворенных кубоидов, либо допустить, что в ходе растворения формы ромбододекаэдра быстро исчезали из огранки и заместились общей для всех начальных вероятных форм роста переходной формой растворения — комбинацией кривогранного тетрагексаэдроиды с реликтовыми, частично растворенными кубическими гранями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате изучения внешней и внутренней морфологии алмазов II разновидности из россыпей Анабарского района Якутской алмазоносной провинции прослежена эволюция форм растворения кристаллов формы близкой к плоскогранному кубу {100}, и комбинационных форм роста с доминирующими гранями {100} + {110}, {100} + {210}, {100} + {110} + {111}. Установлено, что независимо от начальной формы роста кубических кристаллов, основной переходной формой растворения является комбинационная форма с реликтовыми гранями куба и кривогранных форм тетрагексаэдроиды. Округлый тетрагексаэдроид замыкает все рассмотренные эволюционные ряды и возможно представляет собой конечную форму растворения кубических кристаллов алмаза II разновидности.

Периоды физического объемного растворения кубических кристаллов с последовательно возникающими переходными формами кристаллов к кривогранному тетрагексаэдрю и заключительного химического травления с образованием асимметричных дисковидных скульптур их поверхности, вероятно, происходили в карбонатно-силикатном флюидонасыщенном расплаве с растворенными во флюиде активными к алмазу газовыми составляющими во время его подъема к поверхности земной коры. Для получения однозначных выводов требуется проведение отдельной экспериментальной работы моделирующей возникновение отрицательных форм дисковидного микрорельефа на поверхности алмаза, возможно, таким условием будет появление газовой фазы в водосодержащем расплаве вследствие декомпрессии. Тем не менее, ряд кристалломорфологических признаков свидетельствует о том, что растворенные тетрагексаэдроиды II разновидности и кривогранные додекаэдроиды I разновидности по Ю.Л. Орлову имеют общие онтогенетические черты развития индивидов, и, несмотря на различия их мантийных источников, с большой вероятностью были доставлены к поверхности земной коры одним флюидонасыщенным транспортером.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (16-17-10067).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аншлес О.М. К дискуссии о природе округлых форм алмаза (1956) *Записки Всесоюзного минералогического общества*. 2(85), 250-252.
- Афанасьев В.П., Лобанов С.С., Похиленко Н.П., Коптиль В.И., Митюхин С.И., Герасимчук А.В., Помазанский Б.С., Горев Н.И. (2011) Полигенез алмазов Сибирской платформы. *Геология и геофизика* 52(3), 335-353.
- Васильев Е.А., Криулина Г.Ю., Гаранин В.К. Дисковидные скульптуры травления на кристаллах алмаза кимберлитовой трубки Архангельская (2016) *Записки Российского минералогического общества* 5, 71-74.

- Герасимчук А.В., Помазанский Б.С., Горев Н.И. (2011) Полигенез алмазов Сибирской платформы. *Геология и геофизика* **52**(3), 335-353.
- Гневушев М.А., Шеманин В.И., Шеманина Е.И. (1964) Еще раз о происхождении округлых алмазов // *Минералогический сборник Львовского университета* **3**(18), 361-367.
- Григорьев Д.П., Шафрановский И.И. (1942) Новые опыты по растворению алмаза. *Записки минералогического общества* **1**(71), 31-34.
- Зедгенизов Д.А., Рагозин А.Л., Шацкий В.С., Араухо Д., Гриффин В. (2011) Карбонатные и силикатные среды кристаллизации волокнистых алмазов из россыпей северо-востока Сибирской платформы. *Геология и геофизика*. **52**(11). 1649-1664.
- Кухаренко А.А. (1946) О генезисе округлых кристаллов алмазов. *Доклады АН СССР* (8), 629-632.
- Кухаренко А.А. (1954) Об округлых кристаллах алмаза. *Ученые записки ЛГУ. Серия геологическая*, **4**(178). 108-134.
- Коротченкова О.В., Чайковский И.И. (2012) Морфологическая характеристика алмазов из туффзитов месторождения Ефимовское Вишерского района Урала. *Известия Коми НЦ УрО РАН*. **1**(9), 64-67.
- Орлов Ю.Л. (1959) К вопросу о генезисе округлых форм кристаллов алмаза. *Труды Минералогического музея АН СССР*. **9**, 86-98.
- Орлов Ю.Л. (1984) Минералогия алмаза. М.: Наука, 264 с.
- Павлушин А.Д., Олейников О.Б., Граханов С.А. (2015) Генезис асимметричных скульптур микрорельефа растворения на кривогранных додекаэдрических кристаллах алмаза из россыпей северо-востока Сибирской платформы. *Отечественная геология* (5), 22-26.
- Павлушин А.Д., Смелов А.П., Виггерс де Врис Д., Буланова Г.П., Дэвис Г. (2006) Новые данные о сингенетичности пластически деформированных кристаллов алмаза жильного типа и ламинарных октаэдров из россыпей Якутской алмазодносной провинции. *Отечественная геология* (5), 3-7.
- Пальянов Ю.Н., Хохряков А.Ф., Борздов Ю.М., Сокол А.Г., Гусев В.А., Рылов Г.М., Соболев Н.В. (1997) Условия роста и реальная структура синтетического алмаза. *Геология и геофизика* **38**, 882-906.
- Пунин Ю.О. (1981) Расщепление кристаллов. *Записки Всесоюзного минералогического общества* **110**(6), 666-686.
- Пунин Ю.О., Франке В.Д., Кенунен Д.С. (2004) Адсорбционный механизм ростовой дефектности кристаллов. *Записки Российского минералогического общества* **2**, 100-111.
- Ракин В.И. (2013) *Морфология алмазов уральского типа*. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 396 с.
- Скузоватов С.Ю., Зедгенизов Д.А., Шацкий В.С., Рагозин А.Л., Купер К.Э. (2011) Особенности состава облакоподобных микровключений в октаэдрических алмазах из кимберлитовой трубки Интернациональная. *Геология и геофизика* **52**, 107-121.
- Скузоватов С.Ю., Зедгенизов Д.А., Рагозин А.Л., Шацкий В.С. (2012) Состав среды кристаллизации алмазов в оболочке из кимберлитовой трубки Сытыканская (Якутия). *Геология и геофизика* **53**, 1556-1571.
- Скузоватов С.Ю., Зедгенизов Д.А., Ракевич А.Л., Шацкий В.С., Мартынович Е.Ф. (2015) Полистадийный рост алмазов с облакоподобными микровключениями из кимберлитовой трубки Мир: по данным изучения оптически-активных дефектов. *Геология и геофизика* **56**, 426-441.
- Сонин В.М., Чепуров А.И., Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н. (1998) О происхождении дисковых скульптур на кристаллах алмаза. *Доклады РАН* **360**(5). 669-672.
- Титков С.В. (2004) Ростовые дефекты в природных кристаллах алмаза и их генетическое значение. *Проблемы рудной геологии, петрологии, минералогии и геохимии*. М.: ИГЕМ РАН, 386-410.
- Ферсман А.Е., Гольдшмидт В. (1955) *Кристаллография алмаза*. М.: Наука, 567 с.
- Хохряков А.Ф., Пальянов Ю.Н. (1990) Морфология кристаллов алмаза, растворенных в водосодержащих силикатных расплавах. *Минералогический журнал*. **12**(1), 14-23.
- Чепуров А.И., Пальянов Ю.Н., Хохряков А.Ф., Сонин В.М., Соболев Н.В. (1985) О формах растворения кристаллов алмаза в силикатных расплавах при высоком давлении. *Доклады АН СССР*. **285**(1), 212-216.
- Чернов А.А., Кедринский В.К., Давыдов М.Н. (2004) Спонтанное зарождение пузырьков в газонасыщенном расплаве при его мгновенной декомпрессии. *Прикладная механика и техническая физика* **45**(2), 162-168.
- Шафрановский И.И. (1964) *Алмазы*. М.: Наука, 174 с.
- Fedortchouk Y., Canil D., Semenets E. (2007) Mechanisms of diamond oxidation and their bearing on the fluid composition in kimberlite magmas. *Am. Mineral.* **92**, 1200-1212.
- Fersmann A., Goldschmidt V. (1911) *Der Diamant: Eine Studie*. Heidelberg, C. Winter's Universitats-Buchhandlung, 274.
- Khokhryakov A.F., Pal'yanov Y.N. (2007) The evolution of diamond morphology in the process of dissolution: Experimental data. *Am. Mineral.* **92**, 909-917.
- Khokhryakov A.F., Pal'yanov Y.N. (2015) Effect of crystal defects on diamond morphology during dissolution in the mantle. *Am. Mineral.* **100**, 1528-1532.
- Skuzovatov S., Zedgenizov D., Howell D., Griffin W.L. (2016) Various growth environments of cloudy diamonds from the Malobotubia kimberlite field (Siberian craton). *Lithos.* **265**, 96-107.
- Sunagawa I. (1990) Growth and morphology of diamond crystals under stable and metastable conditions. *J. Cryst. Growth* **99**, 1156-1161.
- Tappert R., Foden J., Stachel T., Muehlenbachs K., Tappert R., Wills K. (2009) The diamonds of South Australia. *Lithos* **112**, 806-821.
- Zedgenizov D.A., Shatsky V.S., Rylov G.M., Soboлев N.V., Harte B., Politov A.A. (2006) Directional chemical variations in diamonds showing octahedral following cuboid growth. *Contrib. Mineral. Petrol.* **151**(1), 45-57.
- Zedgenizov D.A., Rege S., Griffin W.L., Kagi H., Shatsky V.S. (2007) Composition of trapped fluids in cuboid fibrous diamonds from the Udachnaya kimberlite: LAM-ICPMS analysis. *Chem. Geol.* **240**, 151-162.
- Zedgenizov D.A., Ragozin A.L., Shatsky V.S., Araujo D., Griffin W.L., Kagi H. (2009) Mg and Fe-rich carbonate-silicate high-density fluids in cuboid diamonds from the Internationalnaya kimberlite pipe (Yakutia). *Lithos.* **112**, 638-647.
- Zedgenizov D.A., Kalinina V.V., Reutsky V.N., Yuryeva O.P., Rakhmanova M.I. (2016) Regular cuboid diamonds from placers on the northeastern Siberian platform. *Lithos.* **265**, 125-137.