

УДК 548.55. + 548.54. + 548.52

О РОСТОВОЙ ПРИРОДЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ФОРМ РЕЛЬЕФА НА КРИСТАЛЛАХ АЛМАЗА ИЗ РОССЫПЕЙ УРАЛА

© 2020 г. И. В. Клепиков^{1,*}, Е. А. Васильев², А. В. Антонов¹

¹ “ВСЕГЕИ”, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

* E-mail: Klepikov_igor@mail.ru

Поступила в редакцию 04.03.2019 г.

После доработки 03.04.2019 г.

Принята к публикации 03.04.2019 г.

Проведено исследование морфологии и анатомии кристаллов алмаза с четырехугольными углублениями на поверхности. На основании изучения взаимоотношений четырехугольных углублений с внутренним строением кристаллов алмаза сделаны выводы о приуроченности четырехугольных углублений к реликтам поверхностей полицентрического регенерационного роста в направлении $\langle 100 \rangle$. Во всех исследованных кристаллах кубического габитуса, в том числе растворенных, на последней стадии роста формируются поверхности граней $\{111\}$ в виде комбинационной штриховки. Показано, что четырехугольные углубления в большинстве случаев имеют ростовую природу.

DOI: 10.31857/S0023476120020137

ВВЕДЕНИЕ

Кристаллы алмаза Уральских месторождений характеризуются подавляющим преобладанием округлых додекаэдров [1]. Эту форму кристаллы приобретают в результате растворения или травления [2, 3]. При растворении (травлении) по мере округления вершин и ребер кристалла октаэдр начинает преобразовываться в октаэдр и далее в додекаэдр, а кристаллы кубического облика трансформируются в кубоид и далее в тетрагексаэдр. Конечной формой растворения является додекаэдр “уральского” типа с постоянными значениями параметров кривизны [4, 5]. В многочисленных экспериментах показано, что при травлении и растворении на поверхности кристаллов образуются треугольные и четырехугольные отрицательные скульптуры. Четырехугольные скульптуры образуются в направлении $\langle 100 \rangle$, а треугольные – $\langle 111 \rangle$ и развиваются они соответственно на гранях $\{100\}$ и $\{111\}$. Количество, размер и морфология этих углублений зависят от $P-T-f(O_2)$ -режима и состава среды [3, 5–7]. Треугольные углубления часто связаны с зонами выходов дислокаций на поверхность кристалла [8]. Четырехугольные углубления реже встречаются на поверхности природных алмазов, их также относят к фигурам травления [9, 10] и они тоже могут быть связаны с выходом дислокаций [11, 12].

При изучении коллекции кристаллов алмаза из современных аллювиальных россыпей Крас-

новишерского района Урала [13] было отмечено 12% кристаллов (кубоидов, тетрагексаэдров и додекаэдров) с четырехугольными углублениями. Эти углубления локализируются на поверхностях, которые не затронуты растворением и являются реликтами ростовых форм. На кривогранных поверхностях додекаэдров и тетрагексаэдров такие углубления не встречаются. Задачей настоящего исследования являлось изучение взаимоотношений четырехугольных углублений на поверхности с внутренним строением кристаллов алмаза.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБРАЗЦЫ

После предварительного изучения коллекции из 155 кристаллов для исследования были отобраны 10 образцов с четырехугольными углублениями на поверхности. Кристаллы извлечены из современных аллювиальных отложений Красновишерского района Урала (коллекция ФГБУ “ВСЕГЕИ”). Фотографии получили на оптическом микроскопе (ОМ) Leica M205. Изображения катодolumинесценции (КЛ) и рельефа поверхности во вторичных электронах (SEI) получали на сканирующем электронном микроскопе CamScan MX2500 S. Для визуализации анатомии из кристаллов были изготовлены плоскопараллельные $\{100\}$ пластины, вырезанные лазером заготовки шлифовывали на алмазных кругах.

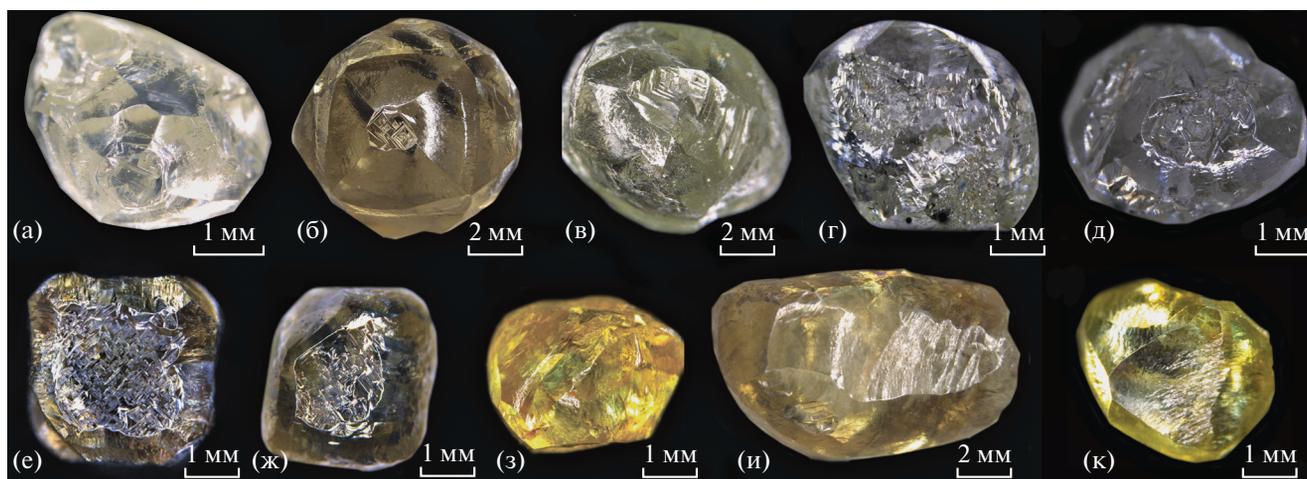


Рис. 1. Общий вид кристаллов с четырехугольными углублениями. Верхний ряд – кристаллы I разновидности [8]: кубоид 29-76 (а), тетрагексаэдроид 123-76 (б), додекаэдроид 122-76 (в), додекаэдр 615-66 (г), октаэдроид 612-66 (д). Нижний ряд – кристаллы II разновидности [8]: кубоид 600-66 (е), кубоид 601-66 (ж), додекаэдроид 610-66 (з), додекаэдроид 123-76 (и), додекаэдроид 158-76 (к).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Среди изученных кристаллов по морфологии три были кубоидами, один – тетрагексаэдроидом, один – октаэдроидом и пять – додекаэдроидом (рис. 1). По классификации Орлова [9] пять кристаллов относятся к I разновидности и пять – ко II разновидности.

Четырехугольные углубления присутствуют на поверхности всех изученных кристаллов. На шести кристаллах отмечены и треугольные, и четырехугольные углубления. В некоторых кристаллах ступенчатые углубления имеют четкие ребра и плоские стенки. В некоторых кристаллах стенки имеют кривизну, выполаживаются при выходе на поверхность. В ряде случаев очевиден вторичный характер углублений – это каналы травления, глубоко проникающие в кристалл.

Во всех пластинах, вырезанных через центр кристаллов по $\{100\}$, обнаружены волнистые ростовые слои в общем направлении $\langle 100 \rangle$, или, как крайний случай таких слоев, концентрическая зональность (рис. 2). Далее для простоты изложения части алмаза с волнистой ростовой зональностью в направлении $\langle 100 \rangle$ называются “пирамидами $\langle 100 \rangle$ ” [14].

Совместное нахождение пирамид граней $\{111\}$ и пирамид $\langle 100 \rangle$ отмечено в трех кристаллах. В англоязычной литературе они обозначаются “*mixed-habit*” [15]. Во внутреннем строении четырех кристаллов преобладают пирамиды $\langle 100 \rangle$. Эти образцы имеют кубический габитус, их поверхность сформирована неровными поверхностями, близкими к плоскостям $\{100\}$. В кристалле 122-76 отмечена последовательная смена: слои $\{111\}$ в центре сменяются концентрической зональностью

пирамид $\langle 100 \rangle$, а во внешней части опять появляются плоскопараллельные слои $\{111\}$.

Во внешней части всех пластин отмечены плоскопараллельные слои $\{111\}$ по направлению $\langle 100 \rangle$. На рис. 3а, 3б показаны торцевые фрагменты вырезанных пластин из кристаллов 123-76, 122-76 и фрагмент кристалла 612-66 при просмотре в направлении $\langle 100 \rangle$ (рис. 3в), на которых отчетливо видны четырехугольные углубления, и с ними сопоставлены изображения КЛ приповерхностных слоев. Как видно на рис. 3г, 3д, 3е, внешняя часть кристаллов состоит из слоев $\{111\}$. Отметим, что в частях кристалла, где отсутствует октаэдрическая зональность, нет четырехугольных углублений. Толщина зон и число слоев полицентрического роста граней $\{111\}$ меняются в широких пределах.

Кристаллы I разновидности 29-76, 123-76, 122-76, 615-66, 612-66. Внутреннее строение кристаллов 123-76 и 122-76 детально описано в [16]. В этих кристаллах остались только реликты центральных частей поверхностей кристаллов кубического габитуса с четырехугольными углублениями. Сами углубления ступенчатые с округленными ребрами. В кристаллах 123-76, 615-66, 612-66 наблюдаются как треугольные углубления в направлении $\langle 111 \rangle$, так и четырехугольные в направлении $\langle 100 \rangle$.

В приповерхностной части кристалла 123-76 волнистая зональность пирамид $\langle 100 \rangle$ сменяется четкой многослойной зональностью по $\{111\}$ (рис. 3а, 3г). Переход постепенный: в нескольких слоях плавная линия начинает прерываться треугольными уступами, а далее начинают формироваться полностью “зигзагообразные” слои по $\{111\}$. Эта зональность видна в КЛ поверхности

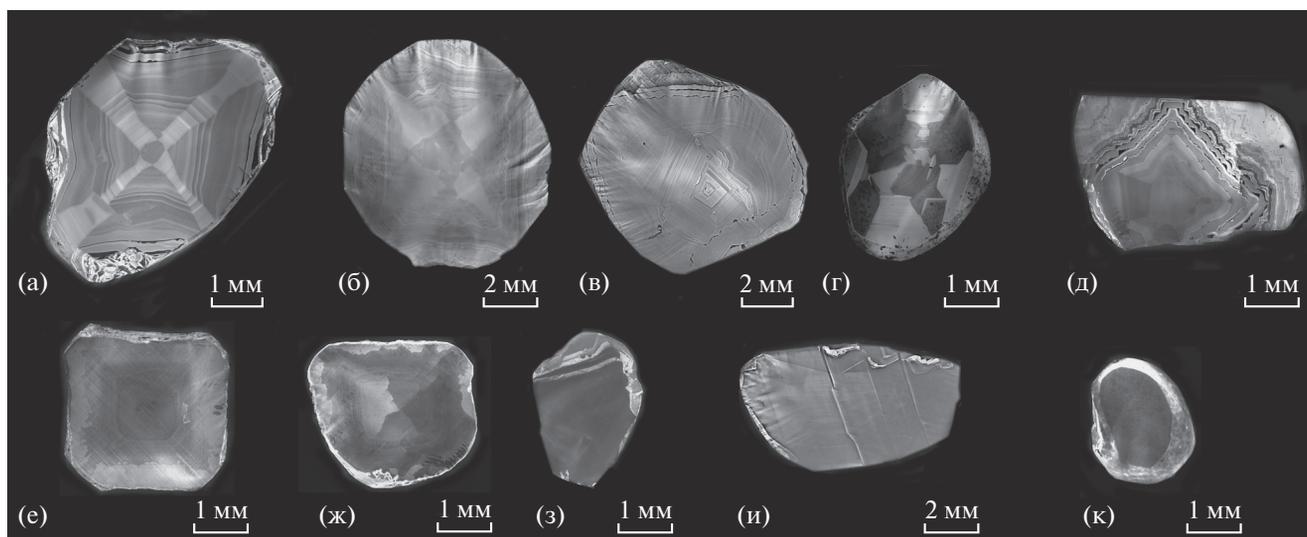


Рис. 2. Верхний ряд – изображения КЛ пластин: кубоид 29-76 (а), тетрагексаэдроид 123-76 (б), додекаэдроид 122-76 (в), додекаэдр 615-66 (г), октаэдроид 612-66 (д). Нижний ряд – кристаллы II разновидности [8]: кубоид 600-66 (е), кубоид 601-66 (ж), додекаэдроид 610-66 (з), додекаэдроид 123-76 (и), додекаэдроид 158-76 (к).

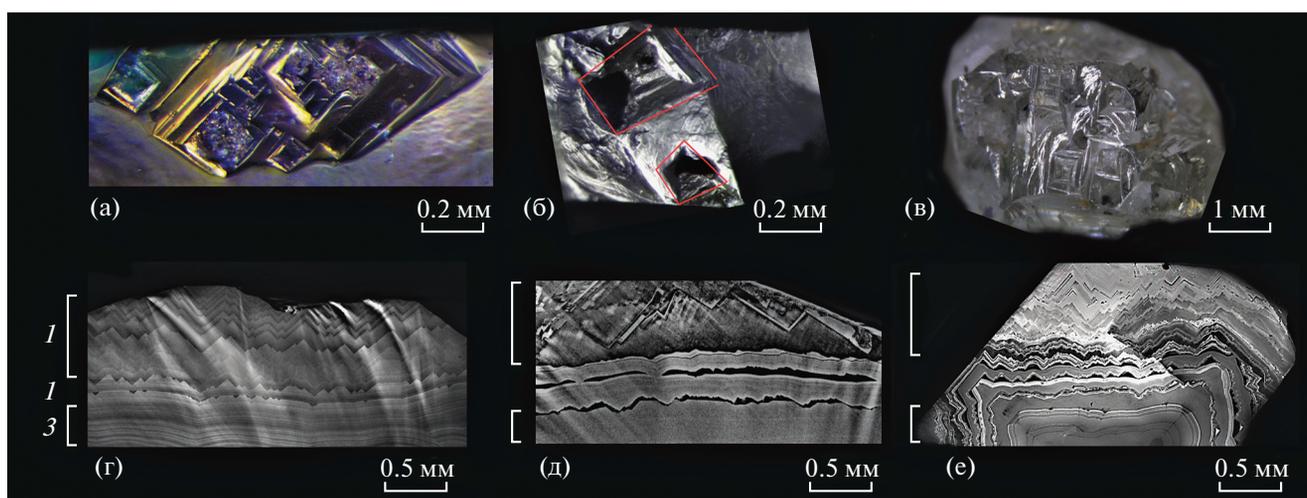


Рис. 3. Фрагменты поверхности с четырехугольными углублениями и внутреннее строение внешних зон в сечении кристаллов 123-76 (а – ОМ, г – КЛ), 122-76 (б – ОМ, д – КЛ) и 612-66 (в – ОМ, е – КЛ). 1 – октаэдрическая зональность, 2 – промежуточная стадия, 3 – криволинейная зональность.

многих растворенных кристаллов (рис. 4а, 4б). Углубления имеют четкую форму и ступенчатость только на гипсометрическом уровне развития октаэдрической зональности, а ниже, где располагается криволинейная кубическая зональность, – переходят в сильно изъеденную и шероховатую поверхность.

На изображении КЛ поверхности кристалла 29-76 по направлению $\langle 100 \rangle$ видна очень контрастная зональность. Она соответствует сечению поверхностью растворения ростового рельефа. На этой поверхности четырехугольные углубления только частично соответствуют поверхностной КЛ

зональности (рис. 4ж, 4з). В этом кристалле вторичные четырехугольные углубления травления наложены на первичный ростовой рельеф.

В сечении кристалла 122-76 видны две черные зоны КЛ. Тонкие слои по $\{111\}$ отмечены только в некоторых приповерхностных участках. Четырехугольные углубления отмечаются только в области с зональностью по $\{111\}$ (рис. 3б, 3д).

В кристалле 615-66 есть и пирамиды роста граней $\{111\}$, и пирамиды $\langle 100 \rangle$. На поверхности кристалла участки треугольными углублениями почти стыкуются с участками с четырехугольными углублениями (рис. 1г).

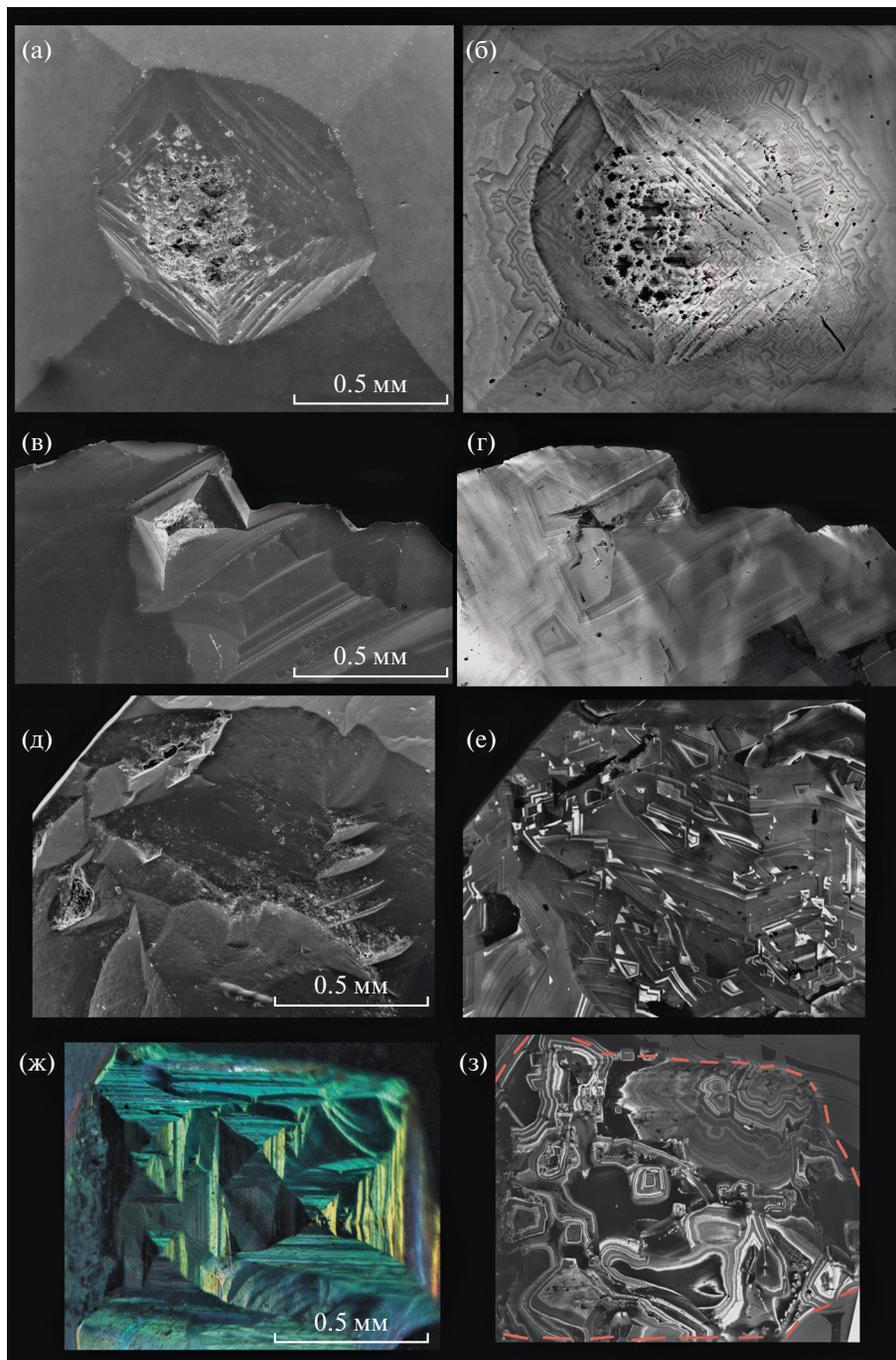


Рис. 4. Фрагменты рельефа и изображений КЛ естественной поверхности кристаллов с четырехугольными углублениями 123-76 (а – SEI, б – КЛ), 126-76 (в – SEI, г – КЛ), 610-66 (д – SEI, е – КЛ) и 29-76 (ж – ОМ, з – КЛ).

Кристалл 612-66 – бесцветный октаэдрод с одинаковым по площади развитием треугольных и четырехугольных углублений (рис. 1д). В сечении кристалла видно преимущественное развитие пирамид $\langle 100 \rangle$. На этом этапе кристалл имел вид скелетного куба. Затем началось чередование слоев с концентрической зональностью пирамид $\langle 100 \rangle$ и плоскопараллельной зональностью сло-

ев $\{111\}$. Затем видны слои с признаками многократного растворения и регенерации. Внешние зоны сложены мелкоступенчатыми плоскопараллельными слоями $\{111\}$ (рис. 3в, 3е). В результате чередования этапов роста и последующего растворения сформировался кристалл, который при просмотре в направлении $\langle 111 \rangle$ соответствует октаэдроду, а в направлении $\langle 100 \rangle$ – кубоиду.

Кристаллы II разновидности 600-66, 601-66, 610-66, 126-76. Образцы 601-66 и 600-66 являются целыми кубоидами, растворение затронуло только ребра, поверхность кристаллов покрыта четырехугольными углублениями. Образцы 126-76 и 610-66 — это растворенные обломки. Во внешней части пластин 601-66 и 600-66 наблюдается тонкая зональность, слабоконтрастная в КЛ. На поверхности образца 126-76 обнаружена только пара четырехугольных углублений (рис. 1и). Однородное внутреннее строение основного объема, желтая окраска за счет *C*-центров и наличие мелкоступенчатой зональности {111} позволяют сделать вывод, что этот кристалл является фрагментом крупного кубоида. Только в области с четырехугольными углублениями обнаружена контрастная линейная зональность {111} (рис. 4в, 4г).

Образец 610-66 (рис. 1з) имеет неправильную форму, на его поверхности находятся единичные четырехугольные и треугольные углубления. В КЛ пластины выявляются пирамиды $\langle 100 \rangle$ и во внешней части линейная зональность {111}. Четырехугольные углубления на поверхности соответствуют области пластины с зональностью {111} (рис. 2з). На изображении КЛ поверхности видны вицинальные слои с октаэдрической зональностью (рис. 4д, 4е). Гладкая поверхность кристалла в КЛ имеет очень контрастную зональность, образованную сечением ростового рельефа.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Существуют два основных механизма роста кристаллов, в частности алмаза, — нормальный и тангенциальный [17]. Кристаллы алмаза кубического габитуса растут по нормальному механизму с характерной неровной бугорчатой поверхностью, близкой к плоскостям {100}. Октаэдрические кристаллы растут по тангенциальному механизму с атомно-гладкой поверхностью и преимущественно без дефектов или ступеней. Лимитирующей стадией тангенциального механизма в общем случае является двумерное зародышеобразование [17]. В случае регенерационного роста скорость лимитируется не двумерным зародышеобразованием, а диффузией. Поэтому скорость роста регенерационных поверхностей намного выше, чем скорость роста сингулярных граней {111}. Области кристалла, которые росли по тангенциальному механизму, имеют четкую плоскопараллельную зональность в направлении $\langle 111 \rangle$. Области кристаллов, которые росли по нормальному механизму, в общем направлении $\langle 100 \rangle$ в сечениях имеют волнистую зональность, в пределе — концентрическую. Доминирование того или иного механизма определяется в основном степенью пересыщения ростовой среды. Соответственно кубические алмазы росли при высоких пересыщениях, а октаэдрические — при низ-

ких [18]. На промежуточной по пересыщению стадии между плоскогранным октаэдрическим и шероховатым кубическим ростом формируются скелетные кристаллы [19, 20].

Во внутреннем строении всех исследованных кристаллов присутствуют области как нормального, так и тангенциального роста. При начале тангенциального регенерационного роста образуется множество мелких ступеней роста слоев {111} по общему направлению $\langle 100 \rangle$. На этом этапе в ограничении кристалла появляется комбинационная штриховка. Кристаллы на этом этапе имеют кубический габитус, но их поверхность сформирована рельефом слоев {111} — это пирамидки, углубления, мелкоступенчатые октаэдрические положительные формы. При дальнейшем росте слоев {111} формируется регенерационная поверхность полицентрического роста, далее происходит оформление кристалла гранями торможения {100}. Следовательно, четырехугольные углубления — это проявление в рельефе поверхности в направлении $\langle 100 \rangle$ полицентрического роста граней {111}. В многочисленных опытах по травлению и растворению показано формирование четырехугольных ямок в направлении $\langle 100 \rangle$. Поэтому при растворении кристаллов с рельефом полицентрического роста поверхность усложняется — ямки травления накладываются на ростовой рельеф.

Схема эволюции внутреннего строения округлых кристаллов с четырехугольными углублениями, составленная на основании изученных кристаллов, представлена на рис. 5. Первая группа кристаллов росла по нормальному механизму с переходом к короткому этапу тангенциального регенерационного роста. Кристаллы на этом этапе сохранили кубический габитус, их поверхность сформирована комбинационной штриховкой поверхностей {100}. Комбинация положительных форм рельефа визуально воспринимается как множество четырехугольных ямок. Далее при наложении процессов растворения и травления поверхность усложняется — могут появляться четырехугольные ямки травления, а сам кристалл округляется. Куб преобразуется в кубоид с четырехугольными углублениями и в конечном итоге преобразуется в додекаэдроид.

Кристаллы второй группы образовались в результате совместного роста пирамид граней {111} и пирамид $\langle 100 \rangle$. На последней стадии кристаллы росли по тангенциальному механизму. На первом этапе роста эти индивиды были скелетными кубами или кубооктаэдрами. После перехода к тангенциальному регенерационному росту появилась комбинационная штриховка поверхностей {100}, при дальнейшем развитии граней торможения кристаллы переходили к октаэдрическому габитусу. В итоге сформировалась сложная комби-

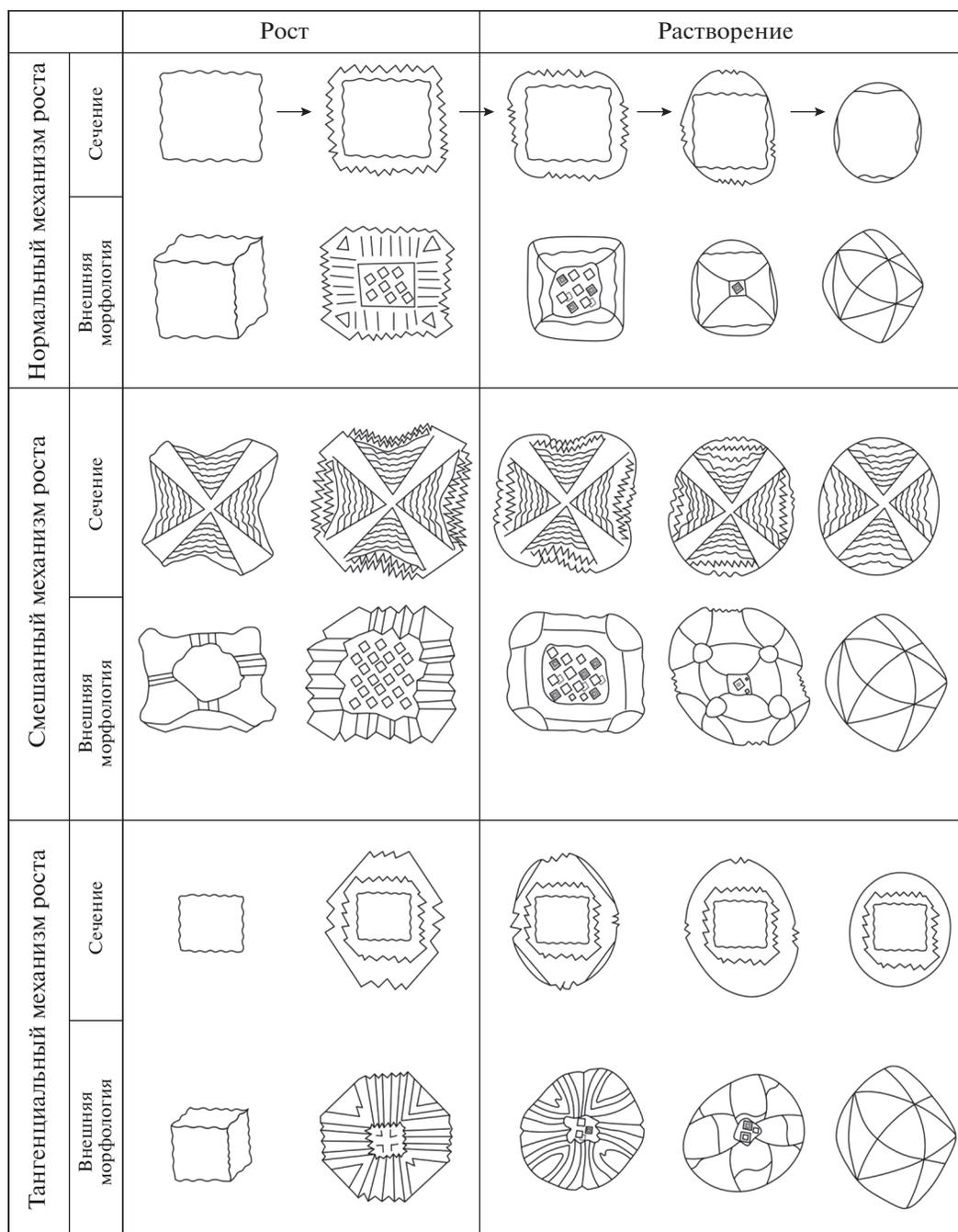


Рис. 5. Схема роста и растворения кристаллов алмаза с четырехугольными углублениями. Ряды 1, 2 – рост по нормальному механизму с переходом к тангенциальному на конечной стадии роста и последующим растворением. Ряды 3, 4 – совместный рост граней $\langle 100 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ с переходом к тангенциальному механизму на конечной стадии и последующим растворением. Ряды 5, 6 – рост по нормальному механизму с переходом к длительному этапу роста по тангенциальному механизму с последующим растворением.

национная поверхность с четырехугольными углублениями. При растворении такой кристалл имеет форму тетрагексаэдроид с треугольными углублениями на выходе на поверхность пирамид роста граней $\{111\}$ и четырехугольными пирамид роста $\{100\}$.

Третью группу отличает длительный регенерационный рост по тангенциальному механизму. В результате формируется октаэдр с углублениями вместо вершин. Завершающей стадией в ряду эволюции таких кристаллов должно являться образование полноценного октаэдра со ступенча-

тым рельефом и вершинами с четырехугольными углублениями. Такую же морфологию должны иметь кристаллы с регенерационным ростом после частичного растворения. В октаэдрических кристаллах алмаза с облачным кубическим ядром из кимберлитовой трубки Интернациональная (Якутии) описана такая ситуация [21, 22]. При растворении кристалл становится октаэдром и затем додекаэдром.

Образование ступеней {111} на завершающем этапе формирования всех кристаллов с нормальным механизмом роста может рассматриваться как особенность Уральских алмазов. Длительный этап формирования кристаллов пирамидами $\langle 100 \rangle$ может указывать на особые условия образования Уральских алмазов. Например, в Якутских коренных месторождениях переход от куба к октаэдру происходил быстрее и там кубы в основном составляют только малоразмерные ядра октаэдров, как показано в [8].

ВЫВОДЫ

В объеме кристаллов алмаза часто обнаруживается концентрическая зональность, которая свидетельствует о нормальном механизме роста. При росте по нормальному механизму пирамид $\langle 100 \rangle$ кристалл приобретает кубический габитус. Однако концентрическая зональность не наблюдается в рельефе поверхности, в подавляющем большинстве случаев она сменяется линейной зональностью регенерационного тангенциального полицентрического роста граней {111}. При смене механизмов роста на поверхности кристаллов возникает рельеф с множеством площадок граней {111}. При дальнейшем росте кристаллы приобретают октаэдрическую огранку, но на вершинах могут оставаться участки с рельефом полицентрического роста. Таким образом, участки с рельефом полицентрического регенерационного роста в направлении $\langle 100 \rangle$ являются индикатором сложного внутреннего строения кристалла. При постростовых изменениях на ростовой рельеф накладываются скульптуры травления по дислокациям в направлениях $\langle 100 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ и поверхностное растворение.

Во всех исследованных кристаллах кубического габитуса и производных от них форм растворения из россыпей Красновишерского района на последней стадии отмечен регенерационный рост граней {111}.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кухаренко А.А.* Алмазы Урала. М.: Госгеолтехиздат, 1955. 510 с.
2. *Ферман А.Е.* Кристаллография алмаза. Л.: Изд-во АН СССР, 1955. 566 с.
3. *Khokhryakov A.F., Pal'yanov Y.N.* // Am. Mineral. 2007. V. 92. P. 909.
4. *Ракин В.И.* Морфология алмазов уральского типа. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. 396 с.
5. *Хохряков А.Е.* Дис. "Растворение алмаза: экспериментальное исследование процессов и модель кристалломорфологической эволюции" ... д-ра геол.-минерал. наук. Новосибирск, 2004. 343 с.
6. *Fedortchouk Y., Canil D., Semenets E.* // Am. Mineral. 2007. V. 92. P. 1200.
7. *Fedortchouk Y., Canil D.* // Eur. J. Mineral. 2009. V. 21. P. 623.
8. *Lang A.R.* // Proc. R. Soc. Lond. Ser. A. 1964. V. 278. P. 234.
9. *Орлов Ю.Л.* Минералогия алмаза. М.: Наука, 1973. 221 с.
10. *Welbourn C.M., Rooney M.T., Evans D.J.F.* // J Cryst. Growth. 1989. V. 94. P. 229.
11. *Khokhryakov A.F., Nechaeva D.V., Palyanov Y.N. et al.* // Diamond Relat. Mater. 2016. V. 70. P. 1.
12. *Moore M.* // Condens. Matter. Phys. 2009. V. 21. P. 364217.
13. *Васильев Е.А., Клепиков И.В., Лукьянова Л.И.* // Зап. Рос. минерал. о-ва. 2018. № 1. С. 55.
14. *Миронов В.П.* // Алмазы. М.: ЭС-ТЭ пресс, 2001. С. 97.
15. *Skuzovatov S.Y., Zedgenizov D.A., Rakevich A.L.* // Contrib. Mineral. Petrol. 2017. V. 172. P. 46.
16. *Васильев Е.А., Клепиков И.В., Антонов А.В.* // Зап. Рос. минерал. о-ва. 2018. № 4. С. 114.
17. *Sunagawa I.* // J. Cryst. Growth. 1990. V. 99. P. 1156.
18. *Бескрованов В.В.* Онтогенез алмаза. М.: Наука, 1992. 165 с.
19. *Шафрановский И.И.* Кристаллы минералов. Кривогранные, скелетные и зернистые формы. М.: Госгеолтехиздат, 1961. 332 с.
20. *Глазов А.И.* // Зап. Горного института. 2012. Т. 199. С. 206.
21. *Скузоватов С.Ю., Зедгенезов Д.А., Шацкий В.С. и др.* // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 1. С. 107.
22. *Zedgenizov D.A., Harte B., Shatsky V. S. et al.* // Contrib. Mineral. Petrol. 2006. V. 151. P. 45.