

Ю. Л. ОРЛОВ

**РАСТВОРЕНИЕ И КОРРОЗИЯ КРИСТАЛЛОВ АЛМАЗА
В ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ И АВТОМЕТАМОРФИЗМА
АЛМАЗОНОСНЫХ ПОРОД**

Сравнительно редко встречаются кристаллы алмазов с обычными прямыми острыми ребрами и плоскими гранями, представляющими собой правильные, точно индицируемые плоскости. Обычно преобладают кристаллы с округлыми ребрами и округлыми гранями (гладкими или чаще сложно скульптурированными различными по характеру аксессуориями), имеющие сложный габитус, часто не поддающийся строгой идентификации с известными в геометрической кристаллографии многогранниками. На специфичность округлых кристаллов алмаза было обращено внимание давно. Уже в 1801 г. Гаюи (Haüy, 1801) впервые высказал предположение об образовании округлых кристаллов алмаза путем последовательного наложения убывающих слоев роста на гранях растущего кристалла.

Позднее эта точка зрения была поддержана и развита Скакки (Scacchi, 1863), Розе и Задебеком (Rose, Sadabeck, 1876—1877), Кокшаровым (1869), Еремеевым (1896), Федоровым (1901) и Ван дер Вееном (1913).

В 1911 г. В. Гольдшмидт и А. Е. Ферсман, тщательно исследовав характер поверхности кристаллов алмаза и их морфологические особенности (Fersman, Goldshmidt, 1911; Ферсман, 1955), пришли к выводу, что округлые кристаллы алмаза образуются в результате частичного растворения ранее созданных плоскогранных многогранников. С этого времени существуют две противоположные точки зрения на генезис округлых кристаллов алмаза и каждая из них имеет своих сторонников.

В 1932 г. вышла в свет получившая широкую известность монография А. Ф. Вильямса (Williams, 1932) о южно-африканских алмазах, в которой он не соглашается с выводами В. Гольдшмидта и А. Е. Ферсмана. Основываясь, главным образом, на том, что при искусственном травлении октаэдрических кристаллов алмаза в расплаве соды, селитры и других реагентах на их гранях образуются треугольные углубления, ориентированные согласно конфигурации грани (т. е. не так, как это обычно наблюдается на природных кристаллах алмаза), а также на изучении слоистости октаэдрических граней, А. Ф. Вильямс поддерживает мнение Ван дер Веена и других сторонников теории роста.

В 1937 г. В. Линдлей (Lindley, 1937), изучив в микроскопе шлифованные алмазы из южно-африканских месторождений, по зональному строению кристаллов установил, что формой роста алмазов является только октаэдр; округлые же грани, по его мнению, представляют собой поверхности растворения.

Разработав специальную методику измерения округлых кристаллов алмаза на гониометре и проведя исследование уральских алмазов. И. И. Шафрановский в 1948 г., в результате теоретического анализа полученных гониометрических данных, также пришел к выводу, что округлые кристаллы алмаза представляют собой формы растворения. В одной из своих недавних работ И. И. Шафрановский (1961), несмотря на многочисленные данные, свидетельствующие в пользу теории растворения, пишет, однако, что «алмазы образуются при огромных давлениях, в условиях, для которых особенности роста и растворения кристаллов пока еще слишком мало известны» и поэтому он склонен в настоящий момент относить округлые алмазы к формам еще невыясненного происхождения.

Большие и всесторонние исследования морфологических особенностей кристаллов алмаза были проведены А. А. Кухаренко (1946, 1954, 1955). Им составлен большой атлас уральских кристаллов алмаза, детально описаны скульптуры на их гранях и тщательно проанализированы результаты экспериментальных работ по искусственному растворению кристаллов алмаза в различных реагентах, проведенных им совместно с В. М. Титовой (Кухаренко, Титова, 1957).

В результате исследований А. А. Кухаренко пришел к выводу, что подавляющее большинство округлых кристаллов алмаза образуется в процессе растворения плоскогранных многогранников и лишь некоторые из них можно объяснить специфическими условиями медленного роста в медленно застывающих глубинных магматических телах (Кухаренко, 1954).

Несмотря на объективные и убедительные данные, приведенные в работах А. А. Кухаренко и других сторонников теории растворения, некоторые исследователи продолжают поддерживать противоположную точку зрения и объяснять происхождение округлых алмазов с позиции теории роста.

В последние годы О. М. Аншелес, основываясь главным образом на умозрительных теоретических представлениях, в ряде статей защищал и развивал теорию роста (Аншелес, 1954, 1955, 1957). К его мнению присоединились М. А. Гневушев, высказавший свою точку зрения в статьях (1955, 1957) и при описании алмазов в книгах «Алмазы Сибири» (1957) и «Алмазные месторождения Якутии» (1959), а также некоторые другие исследователи якутских алмазов.

В течение ряда лет, начиная с 1953 г., нами проводились исследования алмазов из уральских, сибирских и различных зарубежных месторождений. В процессе этих исследований получено много данных, которые свидетельствуют об образовании округлых кристаллов алмаза в процессе растворения. Некоторые из них были описаны в 1959 г. (Орлов, 1959).

При изучении характера форм растворения кристаллов различных минералов (топаза, берилла, кварца, шпинели, флюорита и др.) установлено, что в некоторых случаях они образуют округлые кристаллы, подобные алмазам. В процессе их растворения образуются сложно скульптурированные округлые поверхности и разнообразные формы вытравливания в виде каналообразных трещин, каверн, геометрически правильных рельефных фигурок и углублений.

Аналогичные формы вытравливания часто наблюдаются на кристаллах алмаза и свидетельствуют об интенсивном их растворении. Причем многие их детали показывают, что эти формы травления образуются одновременно с развитием на кристаллах алмаза округлых поверхностей. Это совершенно определенно свидетельствует об образовании округлых форм кристаллов алмаза в процессе растворения. Ниже приводятся данные.

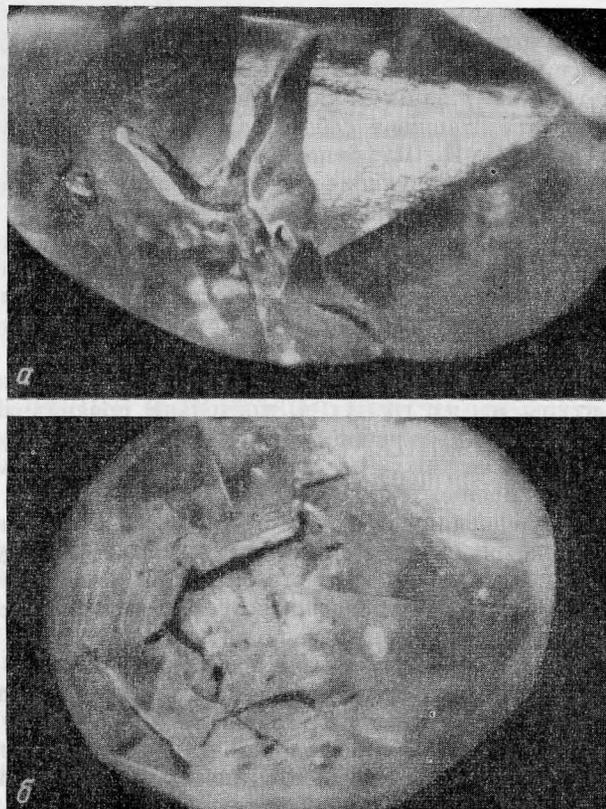


Рис. 1. Каналы травления на кристаллах алмаза
 а — ущелеобразные разветвляющиеся каналы травления на додекаэдронде. Видно появление двух ребер (гранных швов) с обеих сторон канала;
 б — развитие каналов травления по спайности. Слева внизу видны округлые кромки канала, сливающиеся с округлыми гранями кристалла

доказывающие образование очень характерных скульптур и форм вытравливания на кристаллах алмаза в процессе растворения, происхождение которых неправильно объясняется или вовсе не рассматривается сторонниками теории роста.

Очень часто на кристаллах алмаза наблюдаются трещинообразные каналы травления. Они развиваются, обычно, по направлениям спайности или двойниковым швам и имеют вид длинных, прямых или изогнутых, ветвящихся трещин, глубоко проникающих внутрь кристалла. Внешний вид их различен: от едва заметных узких, сомкнутых трещин до широких зияющих ущелеобразных каналов (рис. 1, а). На некоторых кристаллах часто наблюдается целая серия параллельных или пересекающихся каналов, развитых по спайности (111), сильно разъедающих кристалл и разбивающих его на отдельные блоки (рис. 1, б). Интересны некоторые морфологические детали таких каналов. Кромки их часто округлены (как ребра на октаэдрических кристаллах), а в случае развития каналов на округлых гранях округлые поверхности кромок каналов совершенно органически сливаются с гранями кристалла. Когда каналы на округлых кристаллах развиваются у ребер, то последние обгибают их или разветвляются у канала. Это объясняется тем, что при развитии каналов травления появля-

ются новые ребра, которые представляют собой линии пересечения поверхностей растворения, развивающихся от каналов, с округлыми гранями кристалла (рис. 1, а).

Что служит доказательством образования таких каналов и трещин в процессе растворения? ¹ Во-первых, это вполне очевидно из характера их развития: они разбивают на отдельные части выкристаллизовавшиеся как единое целое монокристаллы, пересекая и разделяя на части скульптурные элементы граней (например, пачки треугольных пластин на октаэдрических гранях). Во-вторых, часто трещины травления, развиваясь от поверхности грани с одной стороны кристалла, сужаясь, проникают глубоко внутрь него, а в некоторых случаях проходят через весь кристалл насквозь, образуя каверну или узкий вытянутый канал также и на поверхности грани с противоположной стороны кристалла. В-третьих, нередко каналы и трещины травления целиком «распиливают» кристалл, образуя оригинальные, как бы сложнотрашеобразные формы кристаллов, представляющие собой часть кристаллов октаэдрической, кубической и другой формы. Стенки трещин травления, вскрытые в результате полного «распиливания» кристаллов, имеют характерные скульптуры, отличающие эти «осколки» кристаллов от механических осколков.

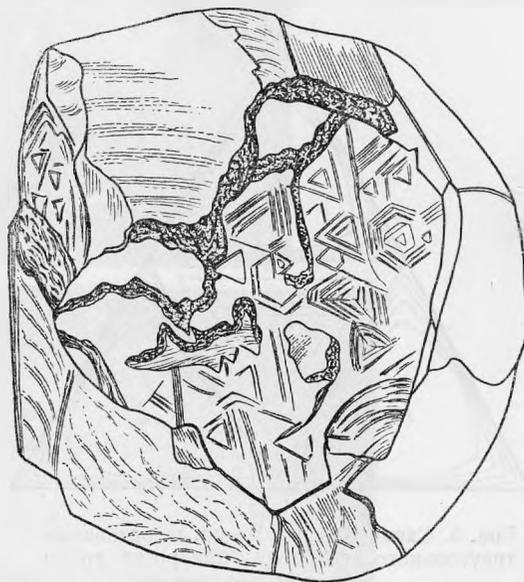


Рис. 2. Характер стенок каналов травления, вскрытых путем раздробления алмаза. Видна скульптура, аналогичная наблюдаемой на октаэдрических гранях кристаллов алмаза

В том случае когда трещины травления развиваются по направлению спайности, их стенки близки или соответствуют плоскостям октаэдра и на них образуются слоистость и треугольные углубления, аналогичные наблюдаемым на октаэдрических гранях кристаллов алмаза. Это хорошо видно на рис. 2, где приведена зарисовка одного из таких кристаллов, у которого нами вскрыта при раздроблении протравленная поверхность стенки трещины, глубоко проникавшей в глубь кристалла. Если трещины травления ветвистые и изогнутые, то вскрытые стенки представляют собой неровную поверхность, которая имеет вид сколов и раковистых выколов, со сложной штриховкой и скульптурой на их поверхности. Такого характера «выколы» часто наблюдаются на кристаллах алмаза; при описании их называют протоматематическими сколами. Некоторые исследователи, наблюдая на них скульптуры с множеством мелких треугольных углублений, подобных развивающимся на октаэдрических гранях, полагают, что это скульптуры роста, и считают протоматематические сколы регенерировавшимися сколами, образовавшимися в магматическом расплаве. На самом деле «сколы» на

¹ В книге «Алмазные месторождения Якутии» при описании алмазов каналы травления отнесены к формам невыясненного происхождения.

таких кристаллах представляют собой стенки трещин травления, разветвленных кристалл. Для генетических выводов имеет большое значение правильное понимание природы треугольных и четырехугольных углублений соответственно на октаэдрических и кубических гранях кристаллов алмаза, а также на стенках трещин травления. Образовались ли эти геометрически правильные ямки в процессе вытравливания или это скульптуры роста, образующиеся на гранях согласно схеме Ван дер Веена (рис. 3), которая

все время приводится в работах сторонников теории роста?

Образование единичных треугольных углублений на алмазах иногда происходит на октаэдрических гранях при их росте, когда они развиваются треугольными пластинами из нескольких центров или при параллельном срастании трех октаэдрических кристаллов и т. д. Такие углубления наблюдаются не только на кристаллах алмаза, но и других минералов: сфалерита, магнетита, шпинели, на пинокоидах кристаллов корунда, а также на искусственно выращенных кристаллах алюмо-калиевых кварцов и т. д. Однако эти одиночные углубления не могут

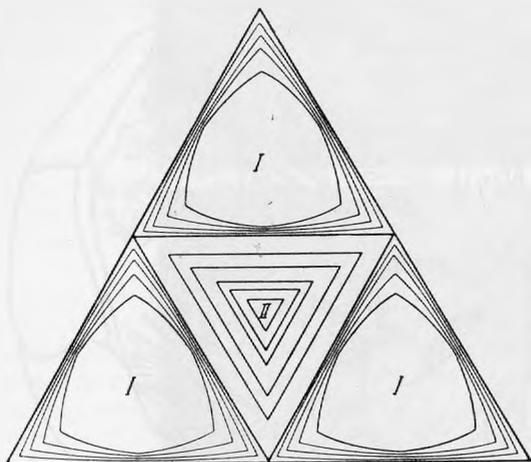


Рис. 3. Схема Ван дер Веена. Образование треугольного углубления при росте грани из трех центров

отождествляться с характерными скульптурами, развивающимися в связи с вытравливанием на поверхности граней кристаллов многочисленных геометрически правильных углублений. Последние образуются, как правило, на гранях кристаллов многих подвергнутых природному растворению минералов: топаза, берилла, кварца, аугелита и других, а также на искусственно растворенных кристаллах алюмо-калиевых квасцов, шпинели, куприта и т. д. При искусственном травлении самих алмазов на октаэдрических гранях их появляются многочисленные треугольные углубления, правда они ориентированы согласно конфигурации октаэдрических граней, а на природных кристаллах треугольные фигурки обычно ориентированы обратно конфигурации граней. Однако известно, что ориентировка фигурок вытравливания и даже их геометрическая форма зависит от химического состава и условий травления (Mollengraaf, 1888; Hettich, 1926; Royer, 1930; Фекличев, 1962 и др.).

Имеется много признаков, которые свидетельствуют о том, что наблюдаемые на природных кристаллах алмаза треугольные и четырехугольные углубления (соответственно на гранях октаэдра и куба) образуются в результате травления алмазов в процессе растворения. Обычно образование треугольных фигурок и характерной слоистости на октаэдрических кристаллах алмаза начинается с вершин и ребер, а также у трещин травления, развивающихся по спайности, двойниковым швам, плоскостям двойникового срастания полисинтетических микродвойников и обычных шпинелевых двойников. В некоторых случаях над протравленной поверхностью октаэдрических граней с многочисленными треугольными фигурками наблюдаются возвышающиеся реликты первоначальных граней, имеющие со-

вершенную зеркально гладкую поверхность. Контуры этих реликтов явно коррозионные, на их поверхности иногда при очень большом увеличении и косом освещении видны микроскопические треугольные углубления.

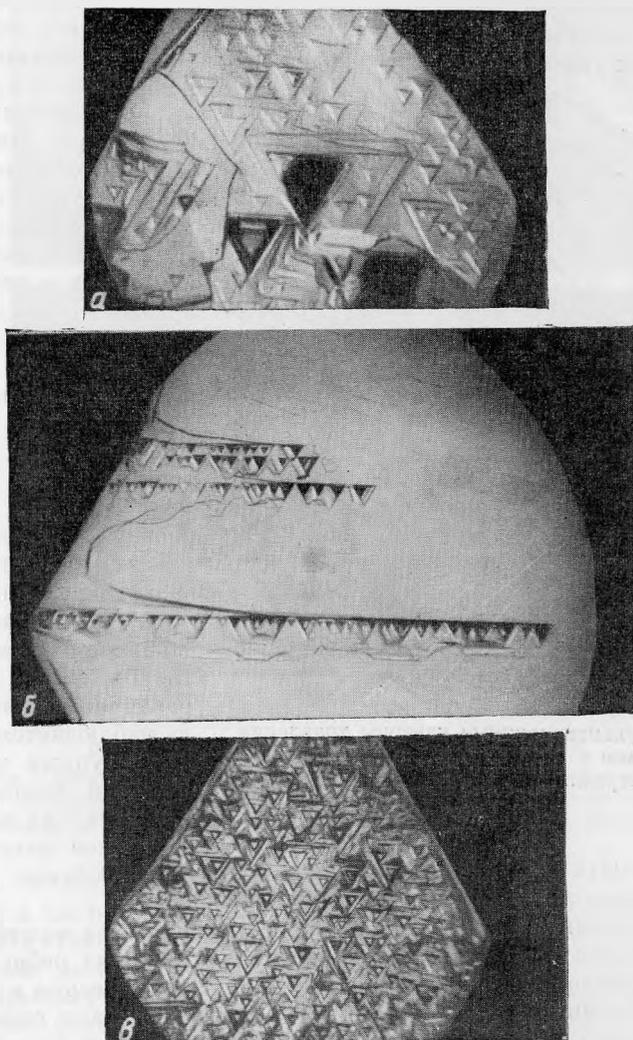


Рис. 4. Образование геометрически правильных фигурок вытравливания на плоскостях (111) кристаллов алмаза

- а — реликт первоначальной зеркально-гладкой поверхности октаэдрической грани, возвышающийся над протравленной частью грани с треугольными фигурками;
- б — цепочки треугольных фигурок, приуроченные к протравленным швам полисинтетических микродвойников на зеркально-гладких гранях (111);
- в — сильно изъеденная треугольными углублениями грань октаэдра на кристалле желтого алмаза

стенки которых представляют собой грани тригон-триоктаэдра. Это начало образования более крупных треугольных фигурок травления (рис. 4, а). Характерно, что кристаллы с совершенно прямыми острыми ребрами

и вершинами, а также пластинчатые кристаллы с треугольными слоями роста, не имеют на гранях подобных треугольных углублений, в то время как на кристаллах с округлыми ребрами и вершинами, как правило, наблюдаются на гранях треугольные фигурки. Это очень хорошо видно на некоторых октаэдрических кристаллах, на которых имеется только одна или две вершины с округлыми ребрами, а остальные — острые с прямыми ребрами: треугольные углубления и каналы или трещины травления

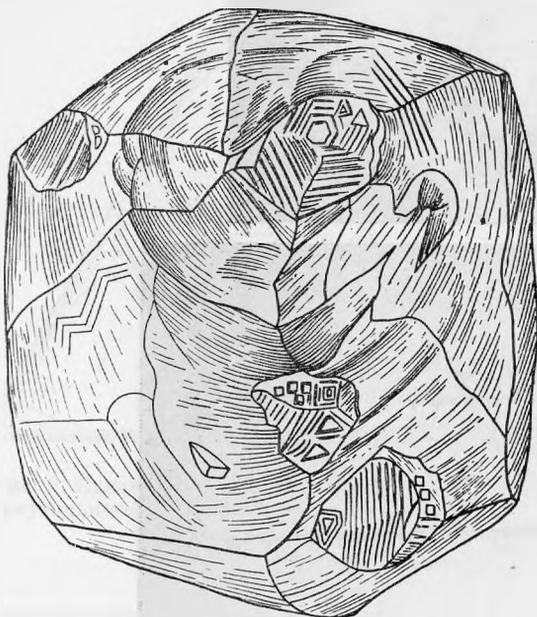


Рис. 5. Скульптурированные каверны травления с треугольными и четырехугольными фигурками вытравливания на стенках

по спайности в этих случаях по появляются на вершинах с округлыми ребрами. Причем обычно треугольные фигурки приурочены к каналам и трещинам травления и вытягиваются вдоль них в виде цепочки, которая часто переходит с одной грани на другую (рис. 4, б).

На комбинационных плоскогранно - округлых кристаллах так называемого типа О — Д (октаэдр — додекаэдрон), на которых ребра замещены широко развитыми округлыми поверхностями на плоскостях (111), как правило, развит очень характерный узор из треугольных углублений различного размера. Иногда наблюдается, как на более крупные треугольные фигурки наложен узор из очень мелких треугольничков более поздней генерации;

в некоторых случаях такие очень мелкие треугольные углубления развиты на каком-либо одном участке граней. Правда, травление октаэдрических кристаллов алмаза может произойти и без образования округлых поверхностей, замещающих ребра, т. е. в самом начале растворения. Например, обычно октаэдрические и кубические грани плоскогранных кристаллов желтых алмазов бывают сплошь покрыты многочисленными треугольными и четырехугольными (на гранях куба) углублениями явно коррозионного происхождения, так как они имеют самый различный размер и накладываются друг на друга, сильно изъедая грань (рис. 4, в). Представить себе образование такой скульптуры в процессе роста по схеме Ван дер Веена очень трудно, тем более, что в некоторых случаях на этих кристаллах наблюдаются возвышающиеся реликты граней с гладкой поверхностью, а на тех участках, где имеются многочисленные треугольные фигурки, как правило, развиваются ветвящиеся сложные трещинки травления.

Часто на гранях кристаллов алмаза образуются кавернообразные воронки, которые в некоторых случаях очень глубоко проникают внутрь кристалла и так же, как и трещины травления, иногда насквозь «просверливают» кристалл. На октаэдрических гранях эти каверны имеют треугольную или шестиугольную форму. На округлых кристаллах, если травление

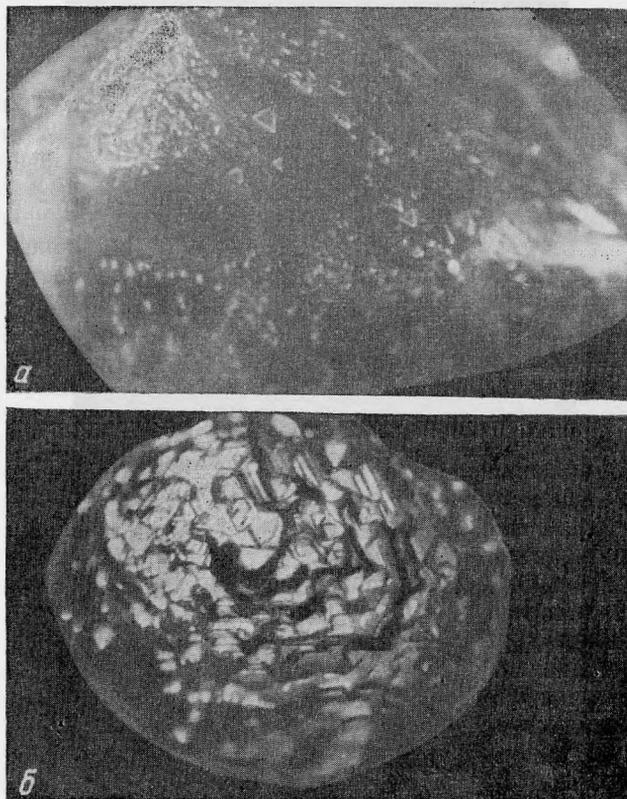


Рис. 6. Образование геометрически правильных фигурок на округлых гранях кристаллов алмаза

a — ямки травления на октаэдроиде желтого алмаза, имеющие треугольную форму; *б* — ямки травления на додекаэдрическом кристалле, имеющие треугольную и шестиугольную форму и образующие скульптуру, как на октаэдрических гранях

происходит в направлении оси третьего порядка, они приобретают такую же форму. На стенках и дне каверн наблюдаются характерные скульптуры, такие же, как на гранях куба или октаэдра (рис. 5). Образование таких скульптурированных каверн на округлом кристалле с совершенно гладкими гранями необъяснимо по схеме Ван дер Веена и с точки зрения теории роста округлых кристаллов алмаза. Особенно хорошо видно, что образование геометрически правильных углублений на кристаллах алмаза происходит в процессе травления, на округлых кристаллах додекаэдрической или другой формы.

Нередко на гранях округлых кристаллов наблюдаются небольшие и неглубокие ямки, которые при своем развитии обычно сливаются вместе, протравливая целые участки граней. Очень важно обратить внимание на характер этих ямок и скульптур, которые развиваются на протравленных участках граней.

Ямки бывают округлые, овальные, ограниченные изогнутыми и прямыми линиями, но в некоторых случаях, еще в самом начале травления, они имеют и правильные геометрические очертания.



Рис. 7. Образование черепитчатой скульптуры на округлых кристаллах алмаза

a — кристаллы с реликтами первоначальной поверхности гладких, блестящих округлых граней и мелкой черепитчатой скульптурой на протравленных участках; *b* — аналогичный кристалл с более крупной ясно выраженной черепитчатой скульптурой

На додекаэдроидах в центре граней ямки имеют форму квадратиков, удлинённых прямоугольников, ромбиков, а по направлению к вершинам осей третьего порядка приобретают форму треугольника (рис. 6, *a*). Иногда встречаются округлые кристаллы, на гранях которых, на отдельных участках или сплошь, в результате травления образовались многочисленные слившиеся вместе ямки, имеющие у вершин осей третьего порядка правильную треугольную форму. Строение этих углублений совершенно аналогично строению треугольных углублений, наблюдаемых на октаэдрических гранях. Сливаясь вместе, они протравливают грани на округлом

кристалле и на протравленной поверхности образуют скульптуру, совершенно тождественную скульптуре октаэдрических граней, хотя сам кристалл, в целом, сохраняет округлый габитус додекаэдроида (рис. 6, б). На протравленной поверхности такого кристалла видны останцы первоначальных округлых поверхностей граней. В некоторых случаях на протравленных участках додекаэдрических граней образуется так называемая черепитчатая скульптура. Останцы, возвышающиеся над протравленной поверхностью первоначальных блестящих граней определенно свидетельствуют о происхождении этой скульптуры в результате травления кристалла (рис. 7, а, б). Иногда блестящие грани додекаэдроида совершенно уничтожаются и поэтому по всему кристаллу, сохраняющему додекаэдрический габитус, развита черепитчатая скульптура. Возможно, что именно такие случаи убеждают некоторых исследователей в том, что черепитчатая скульптура является скульптурой роста.

Другой, редкой наблюдаемой скульптурой, которая относится некоторыми исследователями к оригинальным образованиям роста (Квоков, 1959), является так называемая дисковая скульптура (рис. 8, а).

Имеется ряд фактов, доказывающих, что образование дисковой скульптуры происходит в процессе травления.

Во-первых, на кристаллах с дисковой скульптурой встречаются иногда округлые грани, на которых наблюдаются мелкие, в виде точек, ямки травления, образующие правильные кольца. Эти ямки представляют собой самую начальную стадию образования дисковой скульптуры (рис. 8, б). Во-вторых, на кристаллах с дисковой скульптурой обычно сохраняются рельефно выступающие реликты первичных гладких округлых граней, на которых видны четкие ребра и гранные швы, тогда как на расположенных

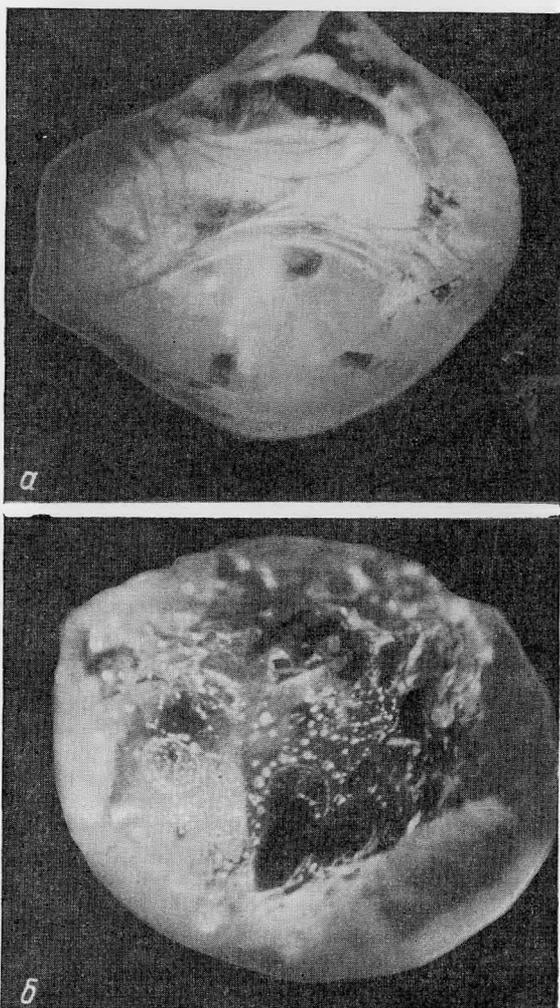


Рис. 8. Образование дисковой скульптуры на округлых кристаллах алмаза

- а — округлый кристалл алмаза с дисковой скульптурой на протравленных участках граней; внизу видны блестящие не протравленные грани и острые ребра.
- б — ямки травления, образующие правильные кольца на округлой поверхности кристалла алмаза с дисковой скульптурой (начальная стадия возникновения дисковой скульптуры)

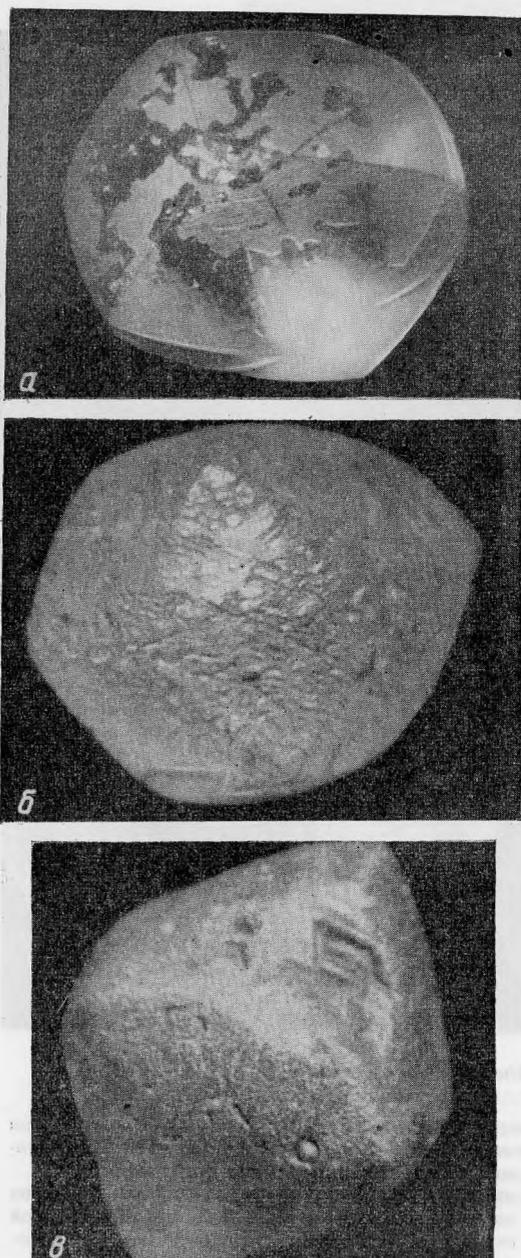


Рис. 9. Виды коррозии кристаллов алмаза при автометаморфизме алмазоносных пород
 а — коррозионная матировка граней кристалла; видны останцы первоначальной блестящей поверхности; б — матовая, сильно корродированная поверхность кристалла с разведенной сеткой трещинок; в — шестиугольная округлая пирамидка, окруженная рвом, на округлой грани, сильно корродированного кристалла

ниже протравленных участках они уничтожены или имеют совсем другой характер.

На основании изучения разнообразных форм травления можно прийти к следующему выводу. При растворении плоскогранные формы кристаллов алмаза преобразуются в округлые и одновременно с этим происходит травление кристалла, в результате которого на плоских гранях, а также и округлых поверхностях появляются геометрически правильные фигурки вытравливания, форма и симметрия которых соответствуют структуре граней. При широком развитии этих фигурок образуются характерные скульптуры на октаэдрических и округлых гранях кристаллов. Кроме этого, на протравленных участках граней образуются своеобразные черепитчатая и дисковая скульптуры, а также каверны и трещины травления, развивающиеся по спайности, плоскостям двойниковых сростков и двойниковым швам.

Растворение и травление кристаллов алмаза происходит обычно со всех сторон, что свидетельствует о том, что процесс этот протекает в магматическом расплаве. Растворяются алмазы не в результате воздействия на них каких-либо компонентов, а, по всей вероятности, под влиянием падения концентрации углерода и изменения термодинамических условий в магме (Кухаренко, 1954).

Кимберлиты, являясь алмазоносными породами, обычно подвергаются различным преобразованиям в процессе автометаморфизма. Могут ли условия автометаморфизма как-либо воздействовать на кристаллы алмаза?

На кристаллах алмаза наблюдается коррозия поверхности граней, происхождение которой по всем признакам совер-

шенно иное, чем описанных выше форм травления. Коррозия начинается с развития на гранях кристаллов алмаза матовости.

Часто на матовой поверхности граней видны различной формы реликты блестящих граней (рис. 9, а). При более интенсивном травлении вся поверхность граней делается матовой, кристалл становится непрозрачным, теряет свой алмазный блеск. Часто при коррозии на поверхности округлых граней по спайности начинают развиваться трещинки, которые, пересекаясь, образуют своеобразную ромбическую сетку на поверхности граней (рис. 10). При дальнейшем травлении трещины разведаются, и гладкая поверхность кристалла становится неровной (рис. 9, б). Иногда на ней возникают своеобразные бугорки или шестигранные пирамидки, окруженные глубоким рвом (рис. 9, в), образовавшимся в результате травления по гексагональному контуру, как это показано на схеме (рис. 10). Часто такое травление происходит не по всему гексагональному контуру, поэтому образуются серповидные трещинки и углубления.

При коррозии трещины сильно разведаются вершины и ребра кристалла и при достаточно интенсивном процессе он теряет правильный кристаллографический облик, превращаясь в матовое зерно с шероховатой поверхностью. В некоторых случаях на кристаллах развиваются глубокие каверны, имеющие вид воронок с неровным ячеисто-пористым дном и стенками. Эти формы травления кристаллов алмаза легко воспроизводятся экспериментально. В. М. Титовой совместно с А. А. Кухаренко проведена большая работа по искусственному травлению различных морфологических типов кристаллов алмаза и получены исключительно интересные данные, которые приведены в их опубликованных работах (Титова, 1960; Кухаренко, Титова, 1957). Образование матовой коррозионной поверхности и ромбических трещинок на кристаллах алмаза вызывалось травлением их в расплаве NaOH при $t = 700-850^\circ$, в силикатном расплаве — при $t = 900-920^\circ$, а также при нагревании на воздухе при $t = 700^\circ$.

На природных кристаллах алмаза иногда очень сильная коррозия такого вида наблюдается только с одной стороны кристалла или даже на небольшом его участке. Можно предположить, что такая коррозия происходит уже тогда, когда алмазы заключены в твердую породу и от степени пористости породы или ее трещиноватости зависит локальное воздействие корродирующих агентов на кристалл. Исходя из этого и условий эксперимента, можно сделать вывод, что образование матовой коррозионной поверхности и сетки поверхностных трещинок на кристаллах алмаза происходит в результате воздействия на них раскаленных паров и газов при автотематоморфизме алмазосодержащих пород. Конечно, этот процесс протекает при более низких температурах, чем указанные температуры экспериментального травления кристаллов алмаза. Очевидно, большую роль играет длительность процесса, т. е. фактор времени. Если бы кристаллы алмаза подвергались травлению при столь же высоких температурах, как и при экспериментах, то они очень быстро бы уничтожались.

На кристаллах алмаза значительно реже, чем все описанные выше формы травления, наблюдается еще одна форма травления. Иногда в природных условиях октаэдрические кристаллы алмаза преобразуются в тригонтриоктаэдры. Процесс начинается с образования у ребер октаэдра тригонтриоктаэдрических поверхностей со штриховкой, перпендикулярной

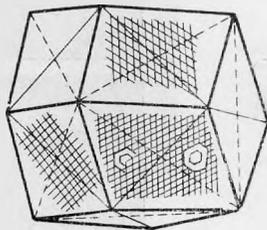


Рис. 10. Схема образования ромбической сетки трещинок, шестигранных пирамидок и серповидных углублений

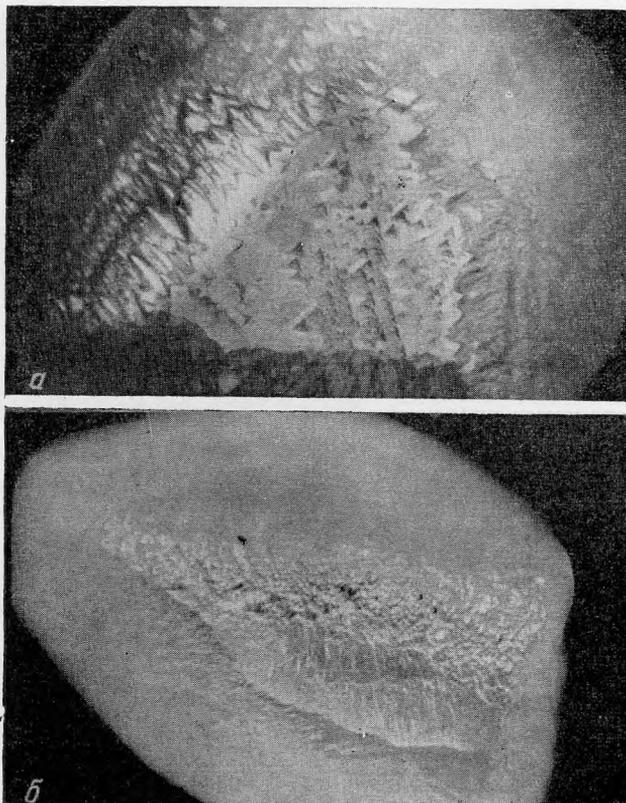


Рис. 11. Скульптуры на природных кристаллах, аналогичные получаемым при искусственном травлении алмазов в расплавах NaOH и др.

a — образованные на октаэдрах тригон-триоктаэдрических граней, с характерной скульптурой и согласно ориентированными треугольными углублениями на (111); *б* — округлый кристалл алмаза с характерной скульптурой из клиновидных холмиков, ориентированных к центру додекаэдрической грани

ребру октаэдра. На октаэдрических гранях появляются треугольные углубления, ориентированные согласно конфигурации октаэдрической грани, а также многочисленные пирамидки (рис. 11, *a*). На округлых кристаллах алмаза наблюдается образование ельчатой штриховки у ребер и оригинальной рельефной скульптуры (рис. 11, *б*). Сторонники теории роста описывают такие кристаллы, как единственные формы и виды растворения кристаллов алмаза, и противопоставляют их природным округлым кристаллам алмаза, относя последние к формам роста. Основанием для этого служит то, что эти формы и скульптуры кристаллов алмаза легко воспроизводятся путем искусственного травления их в расплаве NaOH, KHSO_4 и других веществ, это неоднократно было описано в ряде работ (Rose, 1872; Григорьев, Шафрановский, 1942; Рундквист, 1951; Кухаренко, Титова, 1957; и др.).

Однако условия искусственного травления кристаллов алмаза в расплаве селитры, NaOH и других реагентов несомненно с условиями, которые существуют на больших глубинах в магматическом расплаве. Трудно ожидать, чтобы процесс растворения кристаллов алмаза в расплавах раз-



Рис. 12. Октаэдрический пластинчатый кристалл алмаза, растворенный с одной стороны вершины оси четвертого порядка. Округлая вторичная поверхность наследует все особенности исходной формы роста

личных веществ, применяемых при искусственном их травлении, при обычном давлении и сравнительно низких температурах протекал так же, как и в магматическом очаге. Выше мы описывали различные формы травления кристаллов алмаза при растворении их в магматическом расплаве. Они отличаются от тех форм, которые получаются при искусственном травлении алмазов. Доказательством же того, что в магматическом расплаве при растворении алмазов образуются не тригон-триоктаэдрические, а округлые формы, могут служить комбинационные кристаллы, растворение которых произошло неравномерно. На таких образцах хорошо видна первичная форма плоскогранного кристалла, подвергнутого растворению, и характер преобразования его в округлую форму. Такие алмазы были описаны нами ранее (Орлов, 1959), но для примера покажем один очень характерный образец этого типа кристаллов. На рис. 12 изображен комбинационный кристалл алмаза, который имеет форму октаэдра с пластинчатым строением граней, но с одной стороны вершины оси четвертого порядка у него образована округлая поверхность. Эта поверхность как бы вырезана из плоскогранного кристалла (она располагается гипсометрически ниже плоских граней и отделяется от них рельефным уступом). Округлая часть кристалла наследует особенности исходной плоскогранной формы: волнистость округлой поверхности по длинной диагонали ромбической грани додекаэдроида соответствует прубопластинчатому строению граней октаэдра, микродвойниковая штриховка с октаэдрических граней переходит и на округлую поверхность, но здесь она имеет вид возвышающихся рубцов.

Все это, наряду с характером сочленения округлой и плоскогранной частей кристалла, а также конфигурацией октаэдрических граней по границе с округлой поверхностью, однозначно свидетельствует о вторичном характере округлых поверхностей на этом кристалле. Они образовались в результате растворения, которое наиболее интенсивно развивалось с одной стороны кристалла. Поскольку округлая поверхность на этом кристалле имеет характер, совершенно тождественный граням

широко распространенных округлых кристаллов алмаза, то естественно полагать, что последние представляют собой результат всестороннего растворения плоскогранных форм роста.

В рамках одной статьи невозможно привести весь большой фактический материал по морфологии кристаллов, свидетельствующий об образовании округлых поверхностей на кристаллах алмаза в результате частичного растворения плоскогранных многогранников роста. Многие факты приводились в работах А. А. Кухаренко (1954), И. И. Шафрановского (1948, 1961), Ю. Л. Орлова (1959).

Можно поставить следующие вопросы: почему алмаз должен кристаллизоваться, не подчиняясь обычным законам роста кристаллов, в то время как сингенетичные ему минералы, находящиеся в нем в виде включений, — оливин, пироп, хромшпинелид, диопсид и энстатит — развиваются в обычных для них кристаллографических формах? С другой стороны, почему кристаллы алмаза не могут закономерно растворяться с образованием округлых форм так же, как и кристаллы других минералов?

Существуют полные аналоги округлых кристаллов алмаза со многими скульптурными особенностями их граней среди форм растворения (природных и искусственных) других минералов (топаза, берилла, кварца, кальцита, шпинели, флюорита и др.), так же как и все разновидности плоскогранных кристаллов алмаза и характер строения их граней тождественны многогранникам роста ряда минералов и искусственных соединений (сфалерита, магнетита, алюмо-калиевых квасцов и др.). Совершенно логично сделать вывод, что алмазы подчиняются обычным законам роста кристаллов и что их округлые кристаллы образуются в процессе растворения, так как они не имеют себе аналогов среди форм роста, известных для всех других минералов.

Этот вывод подтверждается и морфологией кристаллов алмаза, полученных синтетическим путем. Кристаллы синтетических алмазов представляют собой острые реберные плоскогранные тетраэдры и комбинации их с кубом и ромбододэкаэдром. Их скелетные формы не отличаются от таковых форм, известных для других минералов, кристаллизующихся в кубической сингонии; часто наблюдается двойникование по шпинелевому закону и образование уплощенных и других форм, характерных и для природных плоскогранных кристаллов алмаза.

При просмотре несортированных кристаллов алмаза из различных месторождений, когда имеется возможность статистически установить распространенность тех или других кристаллических форм и других особенностей кристаллов алмаза, выявляется исключительно большое число кристаллов, подвергнутых растворению и травлению. Процессы эти настолько широко развиты, что они оставляют следы или существенно сказываются на морфологии подавляющего большинства кристаллов алмаза из всех месторождений. Это дает основание сделать вывод о постоянном изменении условий во вмещающей алмазы среде после их кристаллизации, что обусловлено, очевидно, определенной закономерностью в процессе формирования сложных по генезису коренных месторождений алмазов.

Исследования включений в кристаллах алмаза из различных месторождений Советского Союза и зарубежных стран (Футергендлер, 1960; Орлов, 1960; Гневушев и др., 1961) выявили постоянную характерную ассоциацию минералов, сингенетичных алмазу: оливин, пироп, хромшпинелид, энстатит и диопсид. Эта ассоциация убедительно свидетельствует о связи алмазов с сильно обогащенной MgO ультраосновной магмой и подтверждает точку зрения о связи алмазов с магмой перидотитового состава.

Алмаз очень легко реагирует на изменения физико-химических условий в расплаве: повышение температуры, активизация кислорода и лету-

чих, падение концентрации углерода — все эти факторы могут вызывать растворение и коррозию кристаллов алмаза. Следовательно, для сохранности алмазов имеют большое значение условия и время консолидации алмазоносного расплава, т. е. фациальные условия формирования интрузии.

Практически существует только один тип первичных коренных месторождений алмаза — кимберлиты, с которыми связаны все богатые его месторождения. Связь алмазов с глубинными перидотитовыми интрузиями (например, на Урале) нельзя считать установленной и вполне очевидной, хотя эти интрузии и считаются некоторыми исследователями источниками алмазов. Во всяком случае, богатые месторождения алмаза, связанные с глубинными перидотитовыми интрузиями, неизвестны, хотя эти интрузии имеют предпосылки для алмазоносности, так же как и кимберлиты, которые представляют собой другую фацию перидотитовой магмы. Очевидно, условия формирования кимберлитовых месторождений более благоприятны для консервации алмазов, по сравнению с условиями формирования глубинных перидотитовых интрузий типа лакколитов и батолитов.

Можно предположить, что в течение длительного процесса застывания глубинной интрузии в условиях закрытой системы происходит полное или почти полное уничтожение кристаллов алмаза. Возможно, что процессом растворения могут быть объяснены случаи падения концентрации алмазов с глубиной в некоторых кимберлитовых трубках.

Кроме кимберлитов, другими породами земной коры, в которых достоверно установлены алмазы, являются определенного типа эклогиты, находящиеся среди ксенолитов родственных пород в кимберлитах (Williams 1932; Бобривич и др., 1959). Как отмечается при описании алмазов и эклогитов, найденных в кимберлитах (как в Африке, так и в Сибири), они всегда представлены острыеберными плоскогранными октаэдрами. Этот факт очень интересен для решения вопроса об образовании округлых кристаллов: наличие в эклогитах только плоскогранных кристаллов представляет собой случай консервации кристаллов алмаза в формах роста, так как внедряющаяся перидотитовая магма захватывает в виде ксенолитов эклогиты, но не переплавляет их, и находящиеся в них алмазы сохраняются в той форме, в какой они выкристаллизовались. Открытие коренных месторождений алмазов в Советском Союзе дает возможность исследовать ряд вопросов: распространенность округлых и протравленных кристаллов алмаза в различных зонах коренных месторождений, характер кристаллов из различных кимберлитовых трубок и характер слагающих их пород и т. д. При этом правильное понимание генезиса различных морфологических типов кристаллов алмаза может помочь выявлению и объяснению ряда важных в научном отношении фактов.

ЛИТЕРАТУРА

- Алмазы Сибири. М., Госгеолтехиздат, 1957.
Аншелес О. М. Вывод формы кристаллов алмаза на основе их атомного строения.— Докл. АН СССР, т. 101, № 6, 1955.
Аншелес О. М. О природе округлых форм алмаза.— Уч. зап. ЛГУ. Кристаллография и кристаллохимия, вып. 4, № 173, 1954.
Аншелес О. М. К теории роста кристаллов.— Уч. зап. ЛГУ, серия геол. наук, вып. 8, № 215, 1957.
Бобривич А. П., Бондаренко М. И., Гневущев М. А., Красов Л. М., Смирнов Г. И., Юркевич Р. К. Алмазные месторождения Якутии. М., Госгеолтехиздат, 1959.
Бобривич А. П., Смирнов В. Г., Соболев В. С. Ксенолит эклогита с алмазами.— Докл. АН СССР, т. 126, № 3, 1959.
Гневущев М. А. О происхождении обратнопараллельных треугольных впадин на гранях алмаза.— Мин. сборн. Львовского геол. об-ва, № 9, 1955.

- Гневушев М. А. О следах травления на гранях алмаза.— Зап. ВМО, ч. 85, вып. 3, 1956.
- Гневушев М. А. Следы травления и растворения на якутских алмазах.— Мин. сборн. Львов. геол. об-ва, № 14, 1957.
- Гневушев М. А., Николаева Э. С. Твердые включения в алмазах месторождений Якутии. Алмазы Якутии.— Труды Якутского филиала Сибирского отделения АН СССР, 1961.
- Григорьев Д. П., Шафрановский И. И. Новые опыты по растворению алмаза.— Зап. Всерос. минер. об-ва, ч. LXXI, № 1—2, 1942.
- Еремеев П. В. Алмаз из платиновых россыпей Гороблагодатского округа.— Зап. СПб. минер. об-ва, ч. XXXIV, 1896.
- Квоков К. Г. Дисковая скульптура на алмазах и ее происхождение.— Зап. Всес. минер. об-ва, ч. 88, вып. 3, 1959.
- Кокшаров Н. И. О происхождении закругленных граней у кристаллов алмаза.— Зап. СПб. минер. об-ва, ч. IV, 1869.
- Кухаренко А. А. О генезисе округлых кристаллов алмаза.— Докл. АН СССР, т. 50, № 8, 1946.
- Кухаренко А. А. Об округлых кристаллах алмаза.— Уч. зап. ЛГУ им. А. А. Жданова. Кристаллография и кристаллохимия, 1954.
- Кухаренко А. А. Алмазы Урала. М., Госгеолтехиздат, 1955.
- Кухаренко А. А., Титова В. М. Новые данные по растворению кристаллов алмаза.— Уч. зап. Ленингр. ун-та, № 215, серия геол. наук, вып. 8, 1957.
- Орлов Ю. Л. К вопросу о генезисе округлых кристаллов алмаза.— Труды Минер. музея, вып. 9, 1959.
- Орлов Ю. Л. Сингенетические и эпигенетические включения в кристаллах алмаза.— Труды Минер. музея, вып. 10, 1960.
- Рундквист Д. В. Новые опыты по оплавлению алмаза. Кристаллография.— Труды федоровской научной сессии. Углетехиздат, 1951.
- Титова В. М. Ромбический узор поверхностных трещин на округлых кристаллах алмаза.— Материалы по изучению алмазов и алмазоносных районов СССР. Л., ВСЕГЕИ, нов. серия, вып. 40, 1960.
- Федоров Е. С. Курс кристаллографии. СПб., 1901.
- Фекличев В. Г. Скульптуры растворения на гранях кристаллов берилла из камерных пегматитов Волыни и другие их свойства.— Мин. сб. Львов. геол. об-ва, № 16. В печати.
- Фекличев В. Г. Исследование зональных кристаллов берилла из занорышей пегматитов.— Труды ИМГРЭ, № 8, 1962.
- Ферсман А. Е. Кристаллография алмаза. Изд-во АН СССР, 1955.
- Футергендлер С. И. Исследование включений в алмазах методом рентгеноструктурного анализа.— Зап. ВМО, ч. 85, вып. 4, 1956.
- Футергендлер С. И. Рентгенографическое изучение твердых включений в уральских и якутских алмазах.— Материалы по изучению алмазов и алмазоносных районов СССР. Л., ВСЕГЕИ, нов. серия, вып. 40, 1960.
- Шафрановский И. И. Кристаллография округлых алмазов. Изд. Ленингр. ун-та, 1948.
- Fersmann A., Goldschmidt V. Der Diamant. Heidelberg, 1911.
- Hauy R. J. Traité de Mineralogie. Paris, 1801, 3.
- Hettich H. Über die äussere scheidbare Unsymmetrie d. Alkalihalogenide.— Z. Krist., 4, 1926.
- Lindley W. Wachstumserscheinungen am Diamant.— Fortschr. Miner. Krest. u. Petr., 21, I. Berlin, 1937.
- Mollengraaf G. Studien am Quarz.— Z. Krist., 14, 1888.
- Royer L. Sur la décroissance du cristal dans un milieu isotrop actif.— Livre jubilaire, Soc. Min. de France, I, 1930.
- Rose G., Sadebeck A. Über die Kristallisation d. Diamanten.— Abhandl. Könige. Akad. Wiss. Berlin, 1876—1877.
- Scacchi A. Mem. sulla policidria della face dei crist.— Mem. Ac. Torino. (2), 21, 1863.
- Van der Veen A. Die Symmetrie des Diamanten.— Z. Kryst., Miner., 51, 1913.
- Williams A. The genesis of Diamand. London, 1932.