

**Title:** Genetic aspects of the diamond morphology

**Authors:** Sonin, VM; Zhimulev, EI; Afanas'ev, VP; Chepurov, AI

**Source:** Geology of Ore Deposits **Volume:** 44 **Issue:** 4 **Pages:** 291-299 **Published:**  
JUL-AUG 2002

УДК 542.211:553.81

## ГЕНЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МОРФОЛОГИИ АЛМАЗОВ

© 2002 г. В. М. Сонин\*, Е. И. Жимулев\*\*, В. П. Афанасьев\*, А. И. Чепуров\*\*

\*Институт минералогии и петрографии СО РАН  
630090, Новосибирск, просп. акад. Коптюга, 3

\*\*Конструкторско-технологический институт монокристаллов СО РАН  
630058, Новосибирск, ул. Русская, 43

Поступила в редакцию 25.03.2002 г.

На основании анализа данных по морфологии приводятся наиболее характерные поверхностные скульптуры, встречающиеся на гранях октаэдра и поверхностях ромбододекаэдрида природных алмазов из кимберлитов. По принципу совместной встречаемости на природных кристаллах поверхностные скульптуры объединены в три группы, что свидетельствует об их едином генезисе внутри выделенных групп. Приводятся экспериментальные данные по травлению кристаллов алмаза, доказывающие зависимость их морфологии от внешних условий травления. При изменении внешних условий главным образом флюидного режима и окислительно-восстановительных условий установлено три типа морфогенеза алмаза в процессе травления, совпадающие с выделенными группами поверхностных скульптур на природных алмазах. Делается вывод о формировании внешней морфологии природных алмазов преимущественно в процессе природного растворения. На основании известных статистических данных по алмазам в месторождениях Якутской кимберлитовой провинции предполагается только два варианта распределения морфологических типов, что связано с преимущественным развитием скульптур растворения и примерно равным развитием скульптур роста и растворения.

### ВВЕДЕНИЕ

На природных кристаллах алмаза из плоских граней имеются только грани октаэдра. Тем не менее плоскогранные и остросеберные октаэдры алмаза достаточно редки. Более часто форма {111} на природных алмазах присутствует совместно с искривленными или грубо скульптурированными поверхностями ромбододекаэдра и куба, которые в кристаллографическом понимании не являются гранями и относятся к граням торможения или граням растворения (Квасница, 1985). Округлые индивиды в зависимости от их подобия плоскогранным формам называют кривогранными (округлыми) октаэдрами, ромбододекаэдрами, кубами и т.д., добавляя к соответствующим названиям окончание "оид" (Орлов, 1973; Бартошинский, Квасница, 1991; Афанасьев и др., 2000). Кроме того, существует собирательное название "додэкаэдроид". Под ним подразумевают индивиды ряда октаэдроид–ромбододекаэдроид–тетрагексаэдроид, различающиеся кривизной поверхностей {110} вдоль длинной диагонали. До настоящего времени алмазы делят на следующие габитусные типы: алмазы октаэдрического габитуса, алмазы переходной формы, алмазы ромбододекаэдрического габитуса. При этом под кристаллами ромбододекаэдрического габитуса подразумеваются индивиды кривогранной формы, а к

алмазам переходной формы относятся соответственно плоскогранно-кривогранные индивиды (Бобриевич и др., 1959). По классификации М.А. Гневушева и З.В. Бартошинского (1959), выделяются следующие наиболее распространенные морфологические типы алмазов: 1) плоскогранные октаэдры; 2) кристаллы, сложенные тригональными слоями; 3) алмазы с полицентрическим строением граней; 4) кристаллы, сложенные дитригональными слоями; 5) кристаллы с занозистой штриховкой; 6) кристаллы с округлоступенчатыми гранями; 7) алмазы с блоковой скульптурой; 8) округлые алмазы; 9) кристаллы кубического габитуса (Гневушев, Бартошинский, 1959).

Хотя гранная морфология алмазов изучена достаточно детально, генезис многих скульптур остается предметом дискуссии. Поэтому экспериментальные исследования являются в настоящее время основным способом изучения генезиса морфологических поверхностных скульптур на кристаллах алмаза. В данной работе обобщены результаты по изучению морфологии алмазов, в том числе результаты наших экспериментальных исследований в этом направлении. В статье не затронута морфология кристаллов кубического габитуса в связи со специфичностью их внутреннего строения, отражающейся во внешней морфологии, что требует специального рассмотрения.

Адрес для переписки: В.М. Сонин. E-mail: sobolev@uiggm.nsc.ru

## ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ ТИПОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ СКУЛЬПТУР НА ПРИРОДНЫХ АЛМАЗАХ

В основу нижеприводимой систематики положены материалы работы (Бартошинский, Квасница, 1991) с необходимыми дополнениями из других литературных источников. В соответствии с темой статьи мы исключили из рассмотрения скульптуры, встречающиеся на кубических гранях, и скульптуры, развивающиеся на любых поверхностях природных алмазов.

### *Скульптуры на гранях октаэдра*

*Обратнопараллельные треугольные впадины.* Треугольные впадины в противоположной ориентации относительно контуров граней октаэдра (отрицательные тригоны по (Frank, Puttick, 1958)). Подразделяются на плоскостные и пирамидальные отрицательные пирамидки (Кухаренко, 1955). Боковые стенки впадин обычно ступенчатые и представляют собой геометрическое место тригонтриоктаэдров, редко ромбододекаэдр. На гониометре отражения от них образуют лучи, соединяющие сигналы от смежных граней {111}.

*Четырех-, пяти-, шестигранные впадины.* Отрицательные фигуры, образующиеся вследствие притупления углов треугольных впадин. Отдельно встречаются симметрично развитые шестиугольные ямки, обладающие ламинарным строением стенок и плоским дном. Стенки впадин представляют собой геометрическое место тригонтриоктаэдров и тетрагонтриоктаэдров, редко гранки {100}.

*Прямопараллельные треугольные выступы* (Бобриевич и др., 1959). Положительные формы рельефа, контуры которых совпадают с контурами граней {111}. Встречаются в виде тонких пачек слоев или рельефных пирамидальных выступов. Контуры выступов либо тригональные, либо дитригональные. Сигналы от верхних гранок выступов совпадают с отражениями от плоскости {111} или близки к ним. Отражения от склонов выступов, обычно покрытых продольной штриховкой, соответствуют световым полям от искривленных поверхностей ромбододекаэдроида. Система таких фигур в некогерентном сочленении создает *полицентрическое строение* граней (Гневушев, Бартошинский, 1959).

*Прямопараллельные ступенчатые вицинальные бугорки* (Sunagawa et al., 1984). Очень пологие ступенчатые бугорки, ориентированные согласно с контурами граней. Их образование связывают с группами винтовых дислокаций и считают доказательством спирально-слоевого роста кристаллов. В работе (Бобриевич и др., 1959) описаны бугорки (пирамидки), сложенные дитригональными по форме ступеньками.

*Лесенковидные узоры (зубчатые скульптуры;* Орлов, 1963). Скульптуры в виде серий ступенек с заметным наклоном к выходам осей симметрии четвертого порядка. Особенно часто проявляются у вершин кристаллов, если на месте последних развито ребро. Ограничены поверхностями, представляющими собой геометрическое место тетрагонтриоктаэдров, отражения от которых на гониометре проявляются в виде лучей, соединяющих выходы осей {111} и {100}.

*Рифовая скульптура.* Представляет систему правильных, вставленных друг в друга колец, в центре обычно с дискообразным выступом. Контуры колец плавные, реже извилистые, иногда разорванные. Рифовая скульптура встречается совместно с обратнопараллельными треугольными впадинами и прямопараллельными треугольными выступами. Очень редкая скульптура. В отличие от дисковых скульптур проявляется исключительно на гранях {111}.

*Прямопараллельные треугольные впадины.* Треугольные впадины со сторонами, параллельными контурам граней {111} (положительные тригоны; Frank, Puttick, 1958). Стенки впадин соответствуют геометрическому месту тетрагонтриоктаэдров.

*Параллелепипедальный узор.* Представляет собой систему параллелепипедальных бугорков, образующихся при слиянии большого количества прямопараллельных треугольных впадин (Tolansky, 1955; Орлов, 1963).

*Копьевидные выступы.* Копьевидные бугорки с острыми вершинками, направленными перпендикулярно ребрам. При большом их количестве проявляется узор в виде черепитчато надвинутых друг на друга бугорков.

### *Скульптуры на поверхностях ромбододекаэдроида (додэкаэдроида)*

*Параллельная штриховка.* Комбинационная штриховка, направленная вдоль длинной диагонали поверхности {110}, т.е. строго параллельно направлению [110]. Встречается на кристаллах алмаза, сложенных тригональными слоями (Гневушев, Бартошинский, 1959). Отражения от поверхностей с параллельной штриховкой представляют собой лучи, соединяющие смежные грани {111}, то есть являются геометрическим местом различных тригонтриоктаэдров, среди которых встречается ромбододекаэдр.

*Дитригональная штриховка (цитовидная;* Гневушев, Бартошинский, 1959). Комбинационная штриховка на округлых поверхностях {110}, субпараллельная длинной диагонали, но в той или иной степени расходящаяся у вершин кристалла. Встречается на кристаллах, сложенных дитригональными слоями. Совокупность тупых углов ди-

тригональных слоев формирует *гранный шов* (Кухаренко, 1955). Между тригональной (параллельной) и дитригональной штриховками имеются плавные переходы даже на отдельных кристаллах. Отражения от поверхностей с дитригональной штриховкой являются геометрическим местом разнообразных форм, в порядке встречаемости образующих ряд:  $\{hkl\}$ ,  $\{hhl\}$ ,  $\{hk0\}$ ,  $\{hkk\}$ ,  $\{110\}$ . Дитригональную штриховку обычно разделяют на два типа: 1) *сноповидную*, представляющую собой непрерывную дитригональную штриховку без ступенчатого сочленения торцов слоев (Кухаренко, 1955), и 2) *занозистую*, представляющую прерывистую штриховку с кулисообразным наложением торцов слоев друг на друга (Гревушев, Бартошинский, 1959). Занозистую штриховку можно рассматривать как вариант сноповидной штриховки, состоящей из набора прерывистых ступенек (штрихов).

*Черепитчато-шестоватый узор* (Кухаренко, 1955). Это скульптура, состоящая из большого числа черепитчато наложенных друг на друга пластинок или шестиков с прямолинейными или закругленными контурами. Грубоступенчатый аналог занозистой штриховки. Прямолинейные очертания элементов скульптуры характерны для кристаллов, сложенных тригональными слоями. Двугранные углы между ступеньками на торцах пластинок составляют  $120^\circ$ . Округлые контуры пластинок характерны для индивидов с дитригональными слоями. Вершинки ступенек, обращенные к выходам осей симметрии четвертого порядка, образуют лесенковидный узор. Отражения от поверхностей кристаллов с черепитчато-шестоватым узором образуют дуги, соединяющие смежные выходы осей симметрии третьего порядка, и лучи, направленные к вершинам кристаллов. Поверхности с данной скульптурой являются геометрическим местом следующих форм в порядке встречаемости:  $\{hkl\}$ ,  $\{hhl\}$ ,  $\{hkk\}$ ,  $\{hk0\}$ ,  $\{110\}$ ,  $\{100\}$ . Согласно Ю.Л. Орлову (1963), черепитчатые скульптуры непосредственно связаны с пирамидальными впадинами.

*Каплевидные холмики* (Кухаренко, 1955). Положительные элементы рельефа каплевидной или трехгранной форм, вытянутые вдоль длинных диагоналей поверхностей  $\{110\}$ . В плане холмики имеют форму равнобедренного сферического треугольника, реже эллипса или овала. Острые вершины холмиков направлены перпендикулярно гранному шву. В огранении фигур участвуют формы  $\{111\}$ ,  $\{hhl\}$ ,  $\{hk0\}$ , реже встречаются формы  $\{hkk\}$  и  $\{hkl\}$ . Каплевидные холмики на кристаллах алмаза часто связаны с черепитчато-шестоватым узором, шагренью и блоковой скульптурой.

*Шагрень* (Кухаренко, 1955). Скульптура представляет собой систему мельчайших фигур с плавными очертаниями в виде шестиков и холми-

ков, ориентированных по длинной диагонали поверхности  $\{110\}$ . Встречается в основном на скрыто- и тонколаминарных кристаллах. Данную скульптуру можно рассматривать как вариант занозистой штриховки, "разбитой" полосами пластической деформации.

*Блоковая скульптура* (Кухаренко, 1955). Представляет собой систему плавных возвышений и понижений на поверхности кристаллов, придающей ей бугристый или "натечный" вид. Скульптура обычно проявляется совместно со сноповидно-занозистой штриховкой, черепитчато-шестоватым узором, каплевидными холмиками, т.е. основной мотив скульптуры состоит, как правило, из элементов, вытянутых в направлении  $[110]$ . Иногда блоковая скульптура осложняется более тонким фасеточным строением. Ее вариантами являются скульптуры типа "гофрировки" и "складчатости", выделенные А.А. Кухаренко (1955) на уральских алмазах.

*Дисковая скульптура* (Кухаренко, 1955). Представляет собой систему разных по величине диско-, эллипсовидных, реже неправильной формы плоских возвышений. Может проявляться в виде правильных колец, дуг, округлых линий, выполненных мелкими ямками (Орлов, 1963). Встречается на округлых додекаэдрических поверхностях совместно с другими, характерными для них скульптурами. Особенностью дисковой скульптуры является то, что она не связана с симметрией граней кристаллов алмаза и может развигаться по поверхности других скульптур.

*Сетчатый узор* (Tolansky, 1959). Представляет собой систему выпуклых ячеек с округлыми, реже почти прямолинейными контурами, похожую на рыболовную сеть. Ячейки оконтурены неглубокими каналами. Иногда контуры прерывистые и состоят из мелких ямок. Узор не имеет кристаллографической ориентации относительно симметрии алмазов. По (Sunagawa, 1984) имеется тесная связь между сетчатым узором и дисковыми скульптурами.

*Каверны*. Овальные, эллипсовидные, многоугольные или неправильной формы углубления. Редко каверны имеют треугольную или трапециевидную формы. Как и элементы дисковой скульптуры, располагаются без кристаллографической ориентировки относительно симметрии кристаллов. Часто на стенках каверн развиты различные типы штриховок, черепитчато-шестоватый узор. Отражения от стенок каверн представляют собой геометрическое место форм  $\{hhl\}$ ,  $\{hkk\}$ ,  $\{110\}$ .

Перечисленные скульптуры в разном сочетании и степени развития являются наиболее распространенными на кристаллах природных алмазов из кимберлитов и связанных с ними россыпей. Анализ приводимых в литературе данных по морфологии алмазов из метаморфогенных коренных

источников (Надеждина, Посухова, 1990; Шацкий и др., 1998; Квасница и др., 1999; Лаврова и др., 1999) свидетельствует, что их габитусные формы и особенности микроморфологии отчасти соответствуют вышеприведенной систематике. Отличием является то, что среди метаморфогенных алмазов часто встречаются скелетные кристаллы, поэтому они имеют характерные особенности, заключающиеся в неполном развитии граней и соответственно в *ступенчато-пластинчатом строении* с ломано-извилистыми контурами не заросших участков граней.

Макроморфология кристаллов и микроморфология их граней определяются условиями роста и растворения. В зависимости от исходной формы при изменении внешних условий морфология кристаллов эволюционирует вплоть до появления стационарных форм и соответствующих им микроморфологических особенностей. Этот процесс мы будем называть морфогенезом кристаллов. Необходимо отметить, что постростовые изменения кристаллов накладываются на формы роста, в той или иной мере модифицируя или уничтожая их. Соотношение реликтов форм роста и новообразованных форм растворения может сильно меняться, поэтому, априори не зная степень растворения кристалла, очень сложно диагностировать скульптуры роста и растворения. Большинство поверхностных скульптур на кристаллах природных алмазов укладывается в вышеприведенные нами 18 типов (9 – на гранях октаэдра и 9 – на поверхностях ромбододекаэдроида). Причем многие из выделенных скульптур встречаются, во-первых, совместно, и, во-вторых, имеются непрерывные плавные переходы между ними, что, вероятно, обусловлено общей генетической природой. Поэтому выделенные скульптуры можно объединить в несколько групп.

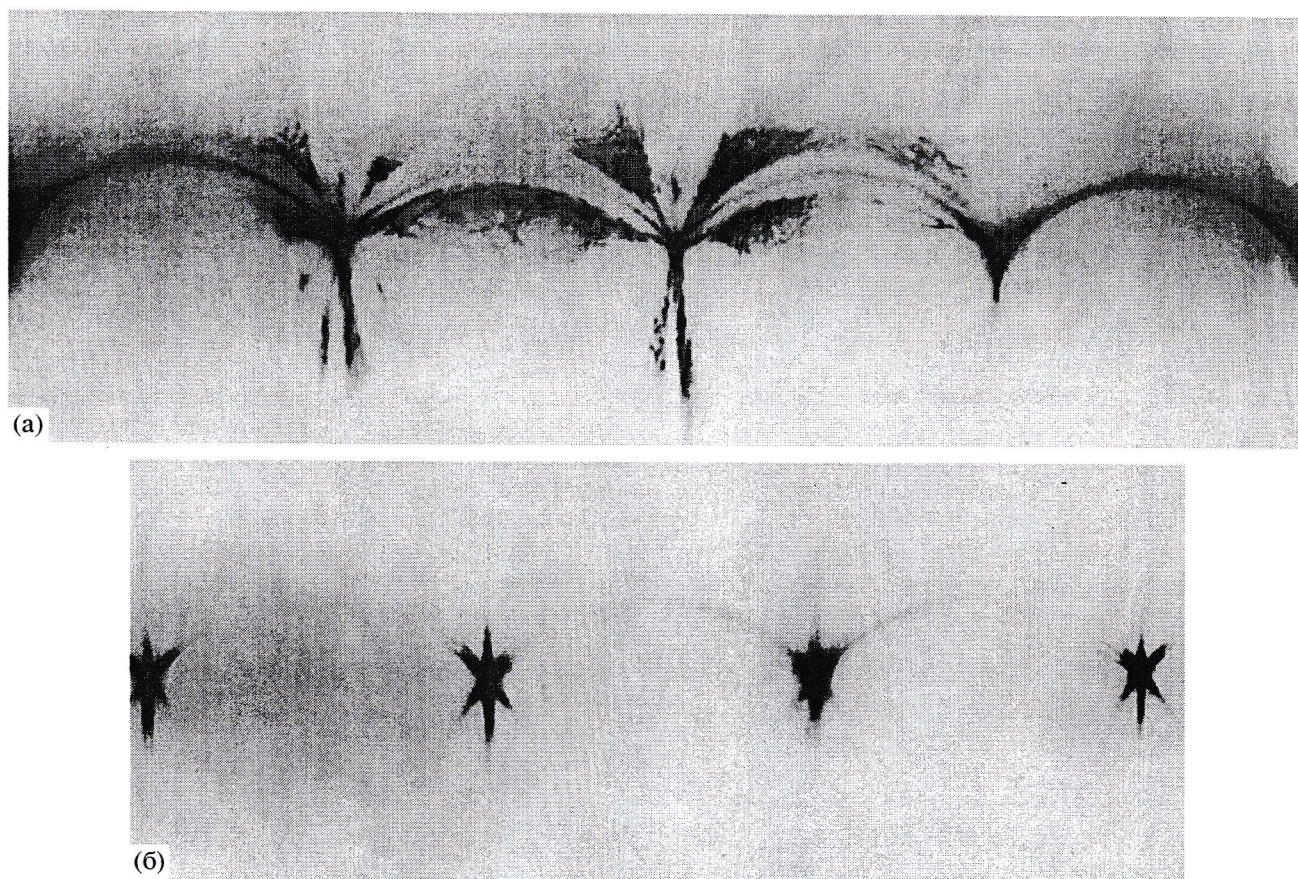
Скульптуры, характерные для октаэдрических кристаллов, делятся на две группы: О1 и О2 (О – октаэдр). К группе О1 относятся обратнопараллельные треугольные впадины, прямопараллельные треугольные выступы, лесенковидный узор, прямопараллельные ступенчатые вицинальные бугорки. Рифовая скульптура обнаружена на единичных кристаллах, поэтому информации о генетической связи ее с другими скульптурами недостаточно. По мнению З.В. Бартошинского (1957), она может возникать при спирально-дислокационном росте граней {111}. Но с данным механизмом роста связывают ступенчатые вицинальные бугорки (Sunagawa, 1984; van Enckevort, 1992). Вместе с тем морфологически рифовая скульптура во многом подобна дисковой скульптуре на округлых поверхностях ромбододекаэдра, поэтому может быть ее вариантом на плоских гранях {111}. Группа О2 включает прямопараллельные треугольные впадины, параллелепипедальный узор,

копьевидные выступы. Связь между группами осуществляется через шестиугольные впадины.

Скульптуры, характерные для кристаллов, имеющих искривленные поверхности на месте ромбододекаэдра (от октаэдра с притупленными ребрами через кристаллы переходной от октаэдра к ромбододекаэдру формы до кривогранного ромбододекаэдра) также можно разделить на две группы: Д1 и Д2 (Д – додекаэдроид). К группе Д1 относятся скульптуры на кристаллах, сложенных тригональными слоями. Главным мотивом микроморфологии таких индивидов является параллельная штриховка. В группу Д2 входят скульптуры на кристаллах, сложенных дитригональными слоями, поэтому основным мотивом микроморфологии таких кристаллов является сноповидная штриховка.

Остальные скульптуры, характерные для кривогранных поверхностей ромбододекаэдра, могут встречаться на кристаллах как из группы Д1, так и из группы Д2. Главным отличием в данном случае является наличие гранного шва. Степень преломления кривогранной поверхности ромбододекаэдра по гранному шву определяет появление октаэдроидов, ромбододекаэдроидов и тетрагексаэдроидов (в данном случае под этими названиями мы подразумеваем их близость плоскогранным формам). По-видимому, независимое положение имеют дисковая скульптура и сетчатый узор. Появление дисковой скульптуры определяется гетерогенностью среды травления (Сонин и др., 1998; 2000<sub>1</sub>), поэтому она не входит в морфогенетические ряды поверхностных скульптур. Сетчатый узор имеет определенное морфологическое подобие с дисковыми скульптурами, вероятно, поэтому они выделены в один таксон (Sunagawa, 1984). На кристаллах переходной формы, т.е. у которых грани {111} сочетаются с развитыми в разной степени искривленными поверхностями на месте {110}, скульптуры, присущие кривогранным поверхностям, ассоциируют с гранными аксессуарами на гранях {111} из группы О1. Поэтому выделенные группы можно объединить: О1–Д1 и О1–Д2.

Обобщенный вариант включает всего три ассоциированных группы скульптур. Подчеркнем, что их выделение основано исключительно на морфологии природных алмазов и вскрывает генетическую связь между ними, т.е. определенные типы морфогенеза алмазов как эволюцию форм кристаллов. Первый тип морфогенеза О1–Д1: октаэдр – ламинарный октаэдр (октаэдр, сложенный тригональными слоями) – додекаэдроид без гранного шва (который также можно представить как тригон-триоктаэдроид с параллельной штриховкой по направлению [110]). Второй тип О1–Д2: октаэдр – октаэдр, сложенный дитригональными слоями, – додекаэдроид с гранным



Фиг. 1. Рефлексограммы протравленных кристаллов алмаза (пояснения в тексте).

швом. Третий тип О2–Т (здесь Т означает тригон-триоктаэдрон): октаэдр – тригон-триоктаэдрон со штриховкой, перпендикулярной направлению [110], но последняя форма среди природных алмазов встречается чрезвычайно редко, поэтому третий тип для простоты лучше обозначить как О2.

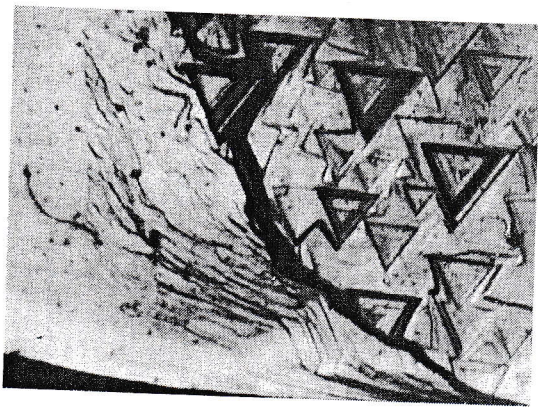
#### СООТВЕТСТВИЕ ТИПОВ МОРФОГЕНЕЗА ПРИРОДНЫХ АЛМАЗОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Выделенные на природном материале типы морфогенеза реализованы экспериментально при травлении октаэдрических кристаллов алмаза.

Первый тип морфогенеза О1–Д1 искусственно воспроизведен при высоком давлении в присутствии “сухого” силикатного расплава (Чепуров и др., 1985; Сонин и др., 2001). Второй тип О1–Д2 экспериментально получен также только при высоком давлении в присутствии силикатного расплава (Чепуров и др., 1985; Хохряков, Пальянов, 1990). Появление дитригональных слоев при травлении октаэдрических кристаллов обусловлено высоким значением соотношения  $H_2O/(CO_2 + CO)$  в системе (Сонин и др., 1997).

Появление третьего типа (О2) связано с окислением алмазов в среде с высокими парциальными давлениями кислорода,  $H_2O$  или  $CO_2$ . Именно поэтому он осуществлен в многочисленных исследованиях по травлению алмазов в различных по химическому составу расплавах, контактировавших с воздухом (Григорьев, Шафрановский, 1942; Рундквист, 1952; Кухаренко, Титова, 1957; Жихарева, 1980), водяным паром или углекислым газом (Руденко и др., 1979; Гераськина и др., 1981; Скворцова и др., 1983). В последнее время появились данные об экспериментальном осуществлении данного типа морфогенеза при высоком давлении (7 ГПа) в присутствии карбоната кальция (Хохряков, Пальянов, 2000). Однако данный тип морфогенеза алмазов относительно редко реализуется в природных условиях (Бартошинский, Квасница, 1991; Харьков и др., 1998); в Якутской кимберлитовой провинции он обусловлен воздействием на алмазы в кимберлите (трубка Краснопресненская) или на алмазы в россыпях гидротермальных растворов, связанных с интрузиями дифференцированных траппов.

Следует подчеркнуть, что морфогенез алмазов при травлении в силикатном расплаве определяется в основном флюидным режимом. Все три



Фиг. 2. Фрагмент исходной грани кристалла алмаза. Увел. 65.

вышеуказанных типа морфогенеза были искусственно получены при травлении исходно плоскогранных кристаллов в силикатном расплаве одного состава (щелочной базальт) и при одинаковых значениях температуры и давления, но с различным флюидным режимом (Сонин и др., 2001). В экспериментальных работах в совокупности реализованы практически все поверхностные скульптуры, выделенные на природных кристаллах и соответствующие вышеуказанным типам морфогенеза. Вместе с тем резкие переходы между типами морфогенеза как на искусственно протравленных, так и на природных кристаллах алмаза, отсутствуют. Более того, существуют кристаллы алмаза со смешанными типами морфогенеза. В качестве примера на фиг. 1а приведена рефлексограмма кристалла 12П из работы (Сонин и др., 1997), протравленного в водосодержащем силикатном расплаве при высоком давлении. Специфика данного кристалла заключается в том, что с одной стороны, он растворялся с образованием дитригональных слоев, а с другой – с образованием тригональных слоев. На рефлексограмме из точек, соответствующих по положению форме  $\{111\}$ , отходят либо раздвоенные, либо одинарные лучи. Раздвоение лучей свидетельствует о наличии на округлых поверхностях гранного шва и соответственно принадлежности кристалла к типу О1–Д2. Одинарные лучи являются следствием присутствия на поверхности кристалла тригональных слоев, т.е. параллельной штриховки на поверхностях, притупляющих ребра октаэдра, и соответственно выявляет принадлежность кристалла к первому типу морфогенеза О1–Д1. На фиг. 1б представлена рефлексограмма кристалла алмаза № 3 из работы (Сонин и др., 2001), растворенного в “сухом” силикатном расплаве при высоком давлении. На рефлексограмме из точек, соответствующих по положению форме  $\{111\}$ , отходят лучи в виде шестиконечных звезд. Данные лучи отвечают по положению геометричес-

кому месту точек форм  $\{hhl\}$ ,  $\{hkk\}$  и являются отражением от стенок присутствующих на кристалле гексагональных ямок травления и параллельной направлению  $[110]$  штриховки. Поэтому морфология данного кристалла является переходной между типами О1–Д1 и О2.

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЯ ТРАВЛЕНИЯ НА МОРФОЛОГИЮ КРИСТАЛЛОВ АЛМАЗА

На образование скульптур и форм растворения кристаллов оказывают влияние как внутренние, так и внешние факторы (Сангвал, 1990). К внутренним относятся симметрия минерала и наличие макро- и микродефектов в реальной структуре кристаллов. Среди внешних факторов наибольшее значение имеют: природа растворителя, температура, степень недосыщения, наличие ингибиторов или катализаторов процесса. Существует мнение, что влияние на морфогенез дефектности реальной структуры алмазов преобладает над влиянием внешних условий (Mendelssohn, Milledge, 1995). Тем не менее, не умаляя значения реальной структуры, мы считаем, что макроморфология и соответственно конечная форма растворения алмазов, как и других веществ, должна определяться постепенным удалением вещества с поверхности кристаллов. Поэтому морфогенез алмазов зависит главным образом от внешних условий.

Нами проведена специальная серия экспериментов с целью оценки влияния изменений в условиях травления на морфологию кристаллов алмаза. При этом процесс травления проводили в силикатных расплавах и с одним кристаллом алмаза, что было необходимо для устранения влияния дефектности реальной структуры как индивидуального фактора.

Для исследования был отобран природный кристалл алмаза октаэдрического габитуса, уплощенный по тройной оси симметрии, с округлыми ребрами и плоскими гранями, весом 11.99 мг. На округлых поверхностях присутствовали ясно выраженные сноподобная штриховка и гранный шов. На одной из граней наблюдались “слоистость” и крупные отрицательные тригоны (фиг. 2).

Травление проводили по ранее опубликованным методикам (Чепуров и др., 1997; Сонин и др., 2000<sub>1, 2</sub>). При атмосферном давлении травление кристалла осуществляли в искусственном силикатном расплаве состава, мас. %:  $\text{Na}_2\text{O}$  (20)– $\text{B}_2\text{O}_3$  (40)– $\text{SiO}_2$  (40) и в расплаве природного легкоплавкого щелочного базальта состава, мас. %:  $\text{SiO}_2$  – 47.0,  $\text{TiO}_2$  – 2.20,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 16.3,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 3.79,  $\text{FeO}$  – 8.12,  $\text{MnO}$  – 0.15,  $\text{CaO}$  – 6.4,  $\text{MgO}$  – 4.55,  $\text{Na}_2\text{O}$  – 5.69,  $\text{K}_2\text{O}$  – 5.0, П. п. п. – 0.54, сумма – 99.82. Стандартная навеска в опытах составляла  $100 \pm 0.5$  мг. В ходе экспериментов расплав находился в контакте с

Условия и результаты экспериментов

№ опыта	Травитель	Время опыта	T, °C	P	Вес кристалла, мг	Скульптуры травления
1	Na <sub>2</sub> O–B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub>	1 ч	1100	1 атм		Матировка, иррегулярные ямки травления, дисковые скульптуры
2	Na <sub>2</sub> O–B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub>	8 ч	1000	1 атм	11.96	Матировка, иррегулярные ямки травления, мелкие отрицательные тригоны
3	Кимберлит	2 ч	1100		(11.87)*	
3	Кимберлит	30 мин	1300	3 ГПа	11.75	Отрицательные тригоны, субпараллельная ребрам штриховка, “лесенковидный узор”
4	(Na <sub>2</sub> O–B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub> )– базальт (1 : 1)	40 мин	1200	1 атм	11.68	Положительные тригоны
5	Базальт	30 мин	1300	3 ГПа	11.53**	Сильная матировка, многочисленные плоские округленные бугорки
6	»	15 мин	1200	1 атм	(11.41)	Мелкие положительные тригоны, иррегулярные бугорки
					1.99	

\* После растворения поверхностного графита.

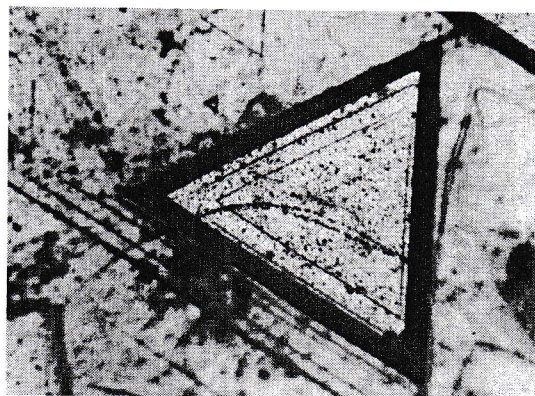
\*\* Кристалл раскололся.

воздушной атмосферой. При высоком давлении кроме базальта использовали природный кимберлит состава, мас. %: SiO<sub>2</sub> – 29.98, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 1.92, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (общее) – 7.9, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0.20, TiO<sub>2</sub> – 0.73, CaO – 7.71, MgO – 34.15, MnO – 0.14, Na<sub>2</sub>O – 0.12, K<sub>2</sub>O – 0.90, H<sub>2</sub>O – 0.43. П. п. п. – 15.4 (CO<sub>2</sub> – 6.6), сумма – 99.22. Эксперименты выполнены в герметичных платиновых ампулах. Навеска силикатной шихты в опытах составляла 150 ± 0.5 мг.

Условия и результаты опытов приведены в таблице. Процесс травления в расплаве Na<sub>2</sub>O–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> сопровождался появлением на поверхности кристалла большого количества газовых пузырей, состоящих, вероятно, из продуктов окисления алмаза (CO<sub>2</sub>, CO), которые при атмосферном давлении не растворяются в силикатном расплаве (Сонин и др., 2000<sub>1</sub>). В результате травления на гранях {111} кристалла появилась пятнистая матировка, состоящая из мельчайших (менее 1 мкм) иррегулярных ямок травления, и многочисленные дисковые скульптуры – округлые фигуры разного размера, контуры которых также состоят из мельчайших ямок неправильной формы. Контуры дисков повторяют границы газовых пузырей. В качестве примера на фиг. 3 представлена фотография фрагмента грани кристалла с крупным исходным тригоном и пересекающим его контуром дисковой фигуры. При дальнейшем травлении дисковые скульптуры исчезли вследствие прогрессирующего развития матировки. Контуры исходных тригонов потеряли контрастность. Форма новообразованных ямок травления, создающих матировку, в большинстве случаев неправильная, но некоторые из них имеют треугольные контуры с ориентировкой обратнопараллельной контурам грани и прямопараллельной исходным тригонам. Появление матировки на кристалле сопровождалось почернением граней вследствие поверхностной графитизации алмаза.

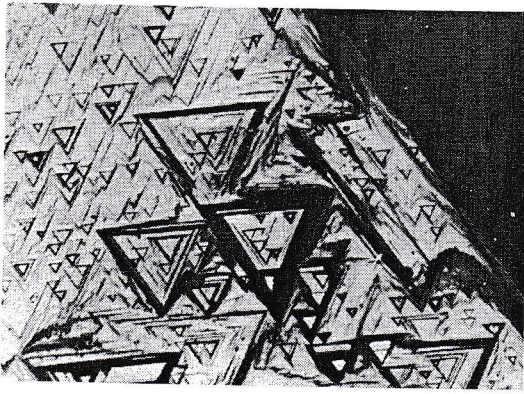
После травления при высоком давлении в расплаве кимберлита микроморфология граней резко изменилась. Матировка исчезла, грани стали блестящими. Огранка крупных тригонов восстановилась. На гранях, в том числе и на тех, на которых первоначально не было поверхностных скульптур, образовалось большое количество мелких тригонов, обратнопараллельных контурам граней (фиг. 4). На округлых поверхностях около ребер восстановился гранный шов и субпараллельная штриховка. У вершин кристалла появился тонкий лесенковидный узор, состоящий из плоских треугольных бугорков.

При последующем травлении при атмосферном давлении в расплаве, по составу, отвечающему смеси натрий-боро-силикатного стекла и базальта в отношении 1 : 1 (по весу), грани кристалла приобрели незначительную матовость вследствие развития на них большого количества мелких (до 6 мкм) плоскодонных треугольных ямок травле-

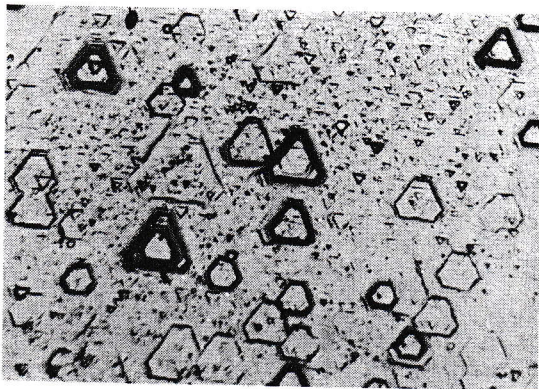


Фиг. 3. Контур дисковой скульптуры, пересекающий исходную треугольную впадину (тригон), на грани (111) кристалла алмаза. Увел. 210.

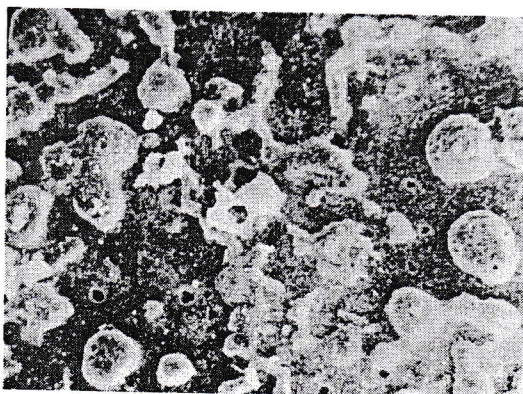




Фиг. 4. Фрагмент грани (111) с отрицательными тригонами после травления кристалла алмаза в кимберлитовом расплаве при высоком давлении. Увел. 95.



Фиг. 5. Фрагмент грани (111) с переограниченными отрицательными тригонами и мелкими новообразованными положительными тригонами после травления кристалла алмаза в системе базальт-натрий-боро-силикатный расплав при атмосферном давлении. Увел. 210.



Фиг. 6. Поверхность кристалла алмаза после травления в расплаве базальта при атмосферном давлении. Увел. 380.

ния, прямоориентированных относительно контуров граней {111}. Более крупные (15–65 мкм) обратноориентированные треугольные впадины, образовавшиеся в результате травления в ким-

берлите при высоком давлении, изменили форму вследствие притупления вершин и появления шестиугольных впадин (фиг. 5).

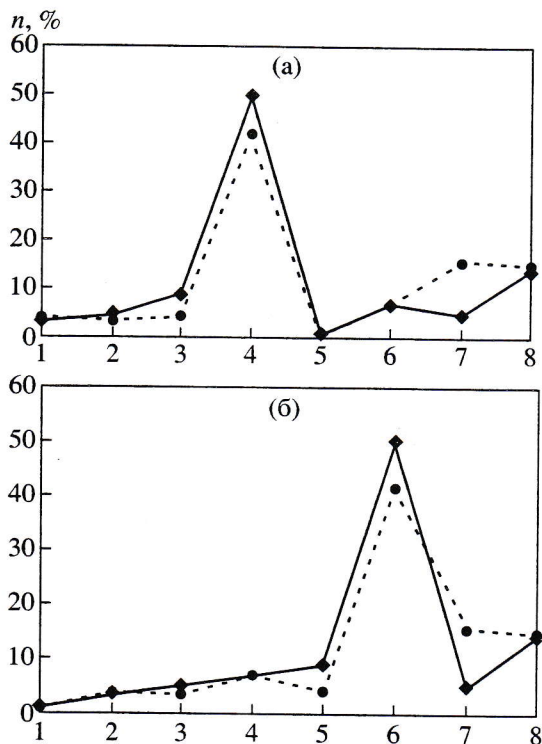
Эксперимент № 5 проведен с расплавом базальта при высоком давлении. Во время опыта кристалл сломался на несколько фрагментов. Сколы на обломках лишены поверхностных скульптур, что позволяет сделать вывод о разрушении кристалла после охлаждения на этапе сброса давления. Грани всех фрагментов после опыта были покрыты плотной корочкой тонкозернистого графита. Очищенные от графита грани алмаза сильно матированы, кристалл практически стал непрозрачным. Основным элементом поверхностной скульптуры являлись плоские бугорки с округлыми контурами, размером порядка 10–25 мкм, и неправильные ямки травления. Сочетание многочисленных бугорков и ямок создает эффект матовости, непрозрачности граней. Все аксессуары, присутствовавшие на кристалле до опыта, исчезли. Таким образом, если даже кристалл испытывал травление в начале эксперимента, то затем превалирующим стал процесс поверхностной графитизации с отложением графита на гранях в виде округлых агрегатов. Результат данного эксперимента полностью повторяет результаты раннего исследования в подобных условиях (Сонин и др., 1994).

Конечным стал эксперимент по травлению фрагментов кристалла в базальтовом расплаве при атмосферном давлении. Участки граней {111} покрылись сплошным узором из мелких (порядка нескольких микрон) прямоориентированных треугольных ямок травления и округлых или неправильной формы бугорков (фиг. 6), что соответствует результатам работы (Сонин и др., 2000<sub>2</sub>).

Таким образом, проведенная серия экспериментов показывает, что морфология алмаза очень чувствительна к изменению внешних условий травления независимо от реальной структуры, поскольку опыты проводились, во-первых, с одним кристаллом и, во-вторых, полученные результаты повторяют ранее полученные результаты в подобных условиях, но на других кристаллах.

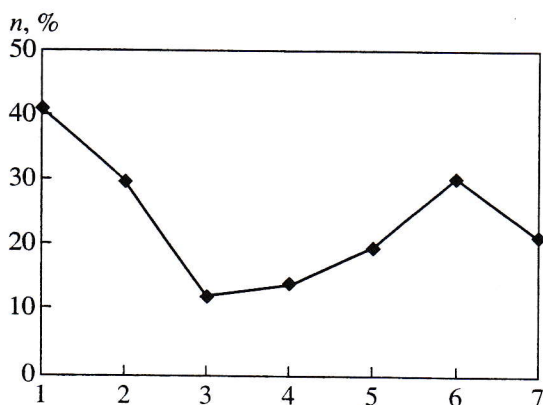
## ЗНАЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСТВОРЕНИЯ В МОРФОГЕНЕЗЕ ПРИРОДНЫХ АЛМАЗОВ

Практически каждое месторождение алмазов имеет определенный набор морфологических особенностей кристаллов. В монографии (Бартошинский, Квасница, 1991) приводятся распределения морфологических типов алмазов по Якутской кимберлитовой провинции, но с использованием произвольного порядка расположения типов на гистограммах. Например, на фиг. 7а нами воспроизведено распределение алмазов по типам в Далдыно-Алакитском районе из указанной работы. На гистограмме присутствуют два пика. Деталь-



**Фиг. 7.** Гистограммы распределения морфологических типов кристаллов алмаза в Далдыно-Алакитском районе Якутской кимберлитовой провинции (1 – далдынская группа тел, 2 – алакитская группа тел). а – данные (Бартошинский, Квасница, 1991; рис. 27); б – распределение в соответствии с порядком морфологических типов, принятом с настоящей статье (пояснения в тексте).

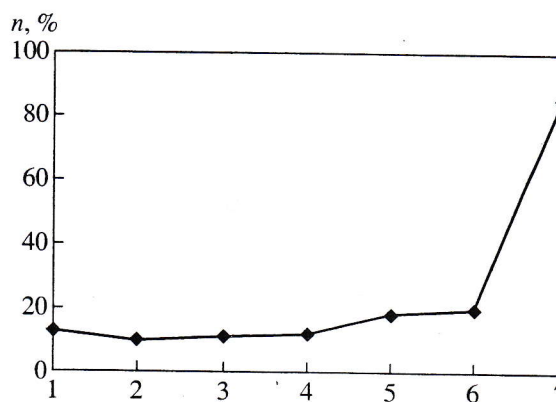
ные описания выделенных морфологических типов кристаллов приведены в работе (Гневушев, Бартошинский, 1959). С учетом вышеприведенных экспериментальных данных, по нашему мне-



**Фиг. 8.** Гистограмма распределения морфологических типов кристаллов алмаза в кимберлитовом теле из южной части Якутской кимберлитовой провинции, по данным (Бартошинский, Квасница, 1991; рис. 29, кривая (а, А)), но в соответствии с порядком морфологических типов, принятом в настоящей статье (пояснения в тексте).

нию, более обоснован следующий порядок расположения морфологических типов: 1 – кристаллы с полицентрическим строением граней (как случай дефектности при росте); 2 – плоскогранные октаэдры; 3 – кристаллы с параллельной штриховкой; 4 – округлоступенчатые кристаллы; 5 – кристаллы со сноповидной штриховкой; 6 – с занозистой штриховкой; 7 – с блоковой скульптурой; 8 – округлые кристаллы. При таком расположении ряд начинается с ростовых признаков и кончается морфологическими особенностями, обусловленными процессами растворения, характерными для морфогенетических типов О1–Д1 и О1–Д2. В данном случае на гистограмме только один ярко выраженный пик (фиг. 7б), принадлежащий на кристаллы с занозистой штриховкой. Это дает основание предполагать, что большинство кристаллов алмаза Далдыно-Алакитского района подвергалось частичному растворению. Два пика на гистограммах распределения морфологических типов кристаллов алмаза могут быть при относительно равнозначном проявлении ростовых и постростовых признаков как, например, в кимберлитовых телах южной части Якутской провинции (фиг. 8). При значительном проявлении процессов растворения алмазов увеличивается частота встречаемости округлых форм относительно плоскогранно-кривогранных.

На фиг. 9 приведено распределение морфологических типов алмазов в россыпях северной части провинции. При предложенном нами порядке расположения морфологических типов кристаллов некоторая неопределенность остается с алмазами с блоковой скульптурой, поскольку в выделении данного типа совмещены как ростовой (груболамнарное, полицентрическое строение граней, возможно, мозаичное строение самих кристаллов (Ку-



**Фиг. 9.** Гистограмма распределения морфологических типов кристаллов алмаза в россыпи из северной части Якутской кимберлитовой провинции, по данным (Бартошинский, Квасница, 1991; рис. 29, кривая (а, Е)), но в соответствии с порядком морфологических типов, принятом в настоящей статье (пояснения в тексте).

харенко, 1955; Орлов, 1963)), так и постростовой (дитригональные слои травления, придающие округлый облик кристаллам) признаки. Но блоковые скульптуры практически всегда встречаются на округлых алмазах (Афанасьев и др., 2000), поэтому, если индивиды с блоковой скульптурой объединить с округлыми кристаллами (как это сделано на фиг. 8 и 9), то неопределенность исчезнет.

В работе (Бартошинский, 1976) приведено другое выделение морфологических типов природных алмазов: 1) почти остросереберные плоскогранные октаэдры; 2) кристаллы, сложенные тригональными слоями; 3) полуокруглые кристаллы; 4) округлые кристаллы; 5) индивиды с несомненными признаками природного растворения (тригонтриоктаэдрониды). Кристаллы, выделенные в 3-ю и 4-ю группы, сложены дитригональными слоями. Данная классификация имеет более определенный генетический смысл по сравнению с приведенной в работе (Гневушев, Бартошинский, 1959). Группа 2 соответствует типу морфогенеза О1–Д1; группы 3, 4 – типу О1–Д2; группа 5 – типу О2. В свете последних экспериментальных данных несомненные признаки растворения имеют кристаллы алмаза не только группы 5, но и групп 2, 3, 4.

Следует подчеркнуть, что мы не претендуем на ревизию существующих морфологических классификаций природных алмазов. Цель настоящей статьи заключается в попытке привлечь внимание к необходимости учета широкомащтабного проявления процессов растворения природных алмазов. Косвенным подтверждением высказанного положения является эмпирически установленная тенденция: с увеличением количества округлых кристаллов алмазоносность кимберлитовых месторождений уменьшается (Коптиль, 1994). При попадании кристаллов алмаза в кимберлитовую магму неизбежно их растворение, поскольку на этапе выноса температура и давление соответствует условиям термодинамической стабильности графита, а сама кимберлитовая магма является реакционноспособной средой по отношению к алмазу вследствие более высокого окислительного потенциала по сравнению с условиями мантии. Поэтому процессы природного растворения, несомненно, оказывали влияние на сохранность алмазов в кимберлитовых месторождениях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасьев В.П., Ефимова Э.С., Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Атлас морфологии алмазов России. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГТМ, 2000.
- Бартошинский З.В. О новой скульптуре на гранях алмаза // Минерал. сб. Львов. геол. о-ва. 1957. № 11. С. 340.
- Бартошинский З.В. О классификации природных алмазов по характеру их кривогранных поверхностей // Кристаллогенезис и процессы минералообразования. Л., 1976. С. 33–37.
- Бартошинский З.В., Квасница В.Н. Кристалломорфология алмаза из кимберлитов. Киев: Наук. думка, 1991.
- Бобривич А.П., Бондаренко М.Н., Гневушев М.А. и др. Алмазные месторождения Якутии. М.: Госгеолтехиздат, 1959.
- Гераскина О.Ю., Жихарева В.П., Кулакова И.И. и др. Скорости каталитического окисления кристаллов природного алмаза разного габитуса водяным паром // Минерал. сб. Львов. ун-та. 1981. № 35. Вып. 2. С. 52–56.
- Гневушев М.А., Бартошинский З.В. К морфологии якутских алмазов // Материалы по геологии полезных ископаемых Якутии // Тр. Якутского ф-ла АН СССР. 1959. Сб. № 4. С. 74–92.
- Григорьев Д.П., Шафрановский И.И. Новые опыты по растворению алмаза // Зап. ВМО. 1942. Ч. 71. № 1–2. С. 28–32.
- Жихарева В.П. Опыты по травлению синтетических алмазов // Минерал. сб. Львов. ун-та. 1980. № 34. Вып. 1. С. 73–76.
- Квасница В.Н. Мелкие алмазы. Киев: Наук. думка, 1985.
- Квасница В.Н., Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Типоморфизм микрокристаллов алмаза. М.: Недра, 1999.
- Коптиль В.И. Типоморфизм алмазов северо-востока Сибирской платформы в связи с проблемой прогнозирования и поисков алмазных месторождений: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук, Новосибирск, 1994. 34 с.
- Кухаренко А.А. Алмазы Урала. М.: Госгеолтехиздат, 1955.
- Кухаренко А.А., Титова В.М. Новые данные по растворению алмаза // Уч. зап. ЛГУ, Сер. геол. наук. 1957. № 215. Вып. 8. С. 108–134.
- Лаврова Л.Д., Печников В.А., Плешаков А.М. и др. Новый генетический тип алмазных месторождений. М.: Научный мир, 1999.
- Надеждина Е.Д., Посухова Т.В. Морфология кристаллов алмаза из метаморфических пород // Минерал. журн. 1990. Т. 12. № 2. С. 3–14.
- Орлов Ю.Л. Морфология алмаза. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
- Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. М.: Наука, 1973.
- Руденко А.П., Кулакова И.И., Штурман В.Л. Окисление природного алмаза // Новые данные о минералах СССР. М.: Наука, 1979. Вып. 28. С. 105–125.
- Рундквист Д.В. Новые опыты по оплавлению алмаза // Кристаллография. М.: Углетехиздат, 1952. С. 197–210.
- Сангвал К. Травление кристаллов: Теория, эксперимент, применение. М.: Мир, 1990.
- Скворцова В.Л., Кулакова И.И., Жихарева В.П. Морфология кристаллов алмаза, окисленных в разных условиях // Минерал. журн. 1983. Т. 5. № 6. С. 77–81.
- Сонин В.М., Багрянцев Д.Г., Федоров И.И., Чепуров А.И. К вопросу об образовании коррозионных фигур на кристаллах алмаза // Геология и геофизика. 1994. № 6. С. 67–72.

- Сонин В.М., Жимулев Е.И., Федоров И.И., Осоргин Н.Ю. Травление кристаллов алмаза в силикатном расплаве в присутствии существенно водного флюида при высоких Р-Т параметрах // Геохимия. 1997. № 4. С. 451–455.
- Сонин В.М., Чепуров А.И., Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н. О происхождении дисковых скульптур на кристаллах алмаза // Докл. РАН. 1998. Т. 360. № 5. С. 669–672.
- Сонин В.М., Наберухина А.В., Федорова Е.Н., Туркин А.И. Травление алмаза в силикатном расплаве при атмосферном давлении // Зап. ВМО. 2000<sub>1</sub>. № 5. С. 76–81.
- Сонин В.М., Жимулев Е.И., Наберухина А.В. Особенности травления алмазов в расплаве базальта при атмосферном давлении // Геология и разведка. 2000<sub>2</sub>. № 5. С. 44–50.
- Сонин В.М., Жимулев Е.И., Федоров И.И. и др. Травление кристаллов алмаза в “сухом” силикатном расплаве при высоких Р-Т параметрах // Геохимия. 2001. № 3. С. 305–312.
- Харькив А.Д., Зинчук Н.Н., Зуев В.М. История алмаза. М.: Недра, 1998.
- Хохряков А.Ф., Пальянов Ю.Н. Морфология кристаллов алмаза, растворенных в водосодержащих силикатных расплавах // Минерал. журн. 1990. № 1. С. 14–23.
- Хохряков А.Ф., Пальянов Ю.Н. Форы растворения кристаллов алмаза в расплаве CaCO<sub>3</sub> при давлении 7 ГПа // Геология и геофизика. 2000. Т. 41. № 5. С. 705–711.
- Чепуров А.И., Федоров И.И., Сонин В.М. Экспериментальное моделирование процессов алмазообразования. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1997.
- Чепуров А.И., Хохряков А.Ф., Сонин В.М. и др. О формах растворения кристаллов алмаза в силикатных расплавах при высоком давлении // Докл. АН СССР. 1985. Т. 285. № 1. С. 212–216.
- Шацкий В.С., Рылов Г.М., Ефимова Э.С. и др. Морфология и реальная структура микроалмазов из метаморфических пород Кокчетавского массива, кимберлитов и аллювиальных россыпей // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 7. С. 942–955.
- Frank F.C., Puttic K.E. Etch pits and trigons on diamond. II // Phil. Mag. 1958. V. 3. № 35. P. 1273–1279.
- Mendelsohn M.J., Milledge H.J. Morphological characteristics of diamond populations in relation to temperature-dependent growth and dissolution rates // Int. Geol. Rev. 1995. V. 35. P. 285–312.
- Sunagawa I. Morphology of natural and synthetic diamond crystals // Mater. Sci. of the Earth's Interior. Tokyo: TERRAPUB, 1984. P. 303–330.
- Sunagawa I., Tsukamoto K., Yasuda T. Surface microtopographic and x-ray topographic study of octahedral crystals of natural diamond from Siberia // Ibid. 1984. P. 331–349.
- Tolansky S. The microstructures of diamond surfaces. London, 1955.
- Tolansky S. Diamond dodecahedra – dome new observations // Indust. Diamond Review. 1959. V. 19. № 218. P. 6–13.
- van Enckevort W.J.P. Phase shifting interferometry of growth patterns on the octahedral faces of natural diamonds // J. Cryst. Growth. 1992. V. 119. P. 177–194.