

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК • УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
КОМИ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР • ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ

В.И. Ракин

МОРФОЛОГИЯ АЛМАЗОВ УРАЛЬСКОГО ТИПА

ЕКАТЕРИНБУРГ, 2013

УДК 548.54:549.21
ББК 26.31
Р19

Ответственный редактор академик РАН **А.М. Асхабов**

Рецензенты доктор геолого-минералогических наук профессор **Б.А. Мальков**
кандидат геолого-минералогических наук **В.П. Лютов**

Ракин В.И.

Р19 **Морфология алмазов уральского типа.** – Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. – 396 с.
ISBN 978-5-7691-2371-9

Описан авторский метод анализа поверхности округлых кристаллов минералов. Исследована морфология алмазов уральского (бразильского) типа различных месторождений Якутии, Урала и Бразилии. Выделены признаки кривогранных форм растворения алмазов, включая формы обратимого растворения и необратимого травления, а также признаки механического износа поверхности и пластического течения структуры алмаза. Установлены закономерности эволюции формы природного округлого алмаза уральского (бразильского) типа.

Книга адресована кристаллографам, специалистам по минералогии алмаза и физике минералов.

Табл. 30. Ил. 158. Библиогр. 138.

УДК 548.54:549.21
ББК 26.31



ISBN 978-5-7691-2371-9

© Ракин В.И., 2013
© РИО УрО РАН, 2013

Округлые кристаллы алмаза уральского (бразильского) типа, добываемые из россыпей, привлекают внимание в первую очередь благодаря их высокому качеству. У них отмечается высокий процент ювелирных разновидностей. Исторически принято называть их алмазами бразильского типа, поскольку они попали в Европу впервые из Бразилии в начале XVIII в. В Европе и России первый алмаз такой формы был найден на Урале в начале XIX в. Теперь округлые алмазы, или ромбододекаэдрониды (додекаэдрониды), часто называют алмазами бразильского (уральского) типа. Нам представляется, что их по праву можно называть округлыми алмазами или алмазами уральского типа, отдавая дань отечественным исследователям А.Е. Ферсману, И.И. Шафрановскому, А.А. Кухаренко и многим другим, внесшим наиболее значительный вклад в изучение округлых алмазов.

История исследований форм кристаллов алмаза богата интересными фактами и интерпретациями. Первоначально округлые формы алмазов рассматривались как сложные плоскогранные тела полностью в соответствии с классическими кристаллографическими представлениями о кристаллах-многогранниках. Такой точки зрения придерживались практически все исследователи алмазов. Это утверждение в классической монографии «Der Diamant» А.Е. Ферсмана и В. Гольдшмидта 1911 г. (Ферсман, 1955) определило почти на столетие единственное направление исследований морфологии округлых алмазов через описание полиэдров, грани которых слагают округлую поверхность. Фундаментальные исследования И.И. Шафрановского (1940а, б; 1953) и А.А. Кухаренко (1955), выполненные в духе этой идеи, внесли существенный вклад в исследование округлых алмазов. Ими были описаны и детализированы кристаллографические характеристики многогранников, через которые можно аппроксимировать округлые формы алмаза, составлены многочисленные таблицы индексов плоских сеток, «слагающих» криволинейные поверхности. Выделены характерные направления, в которых реализуется кривизна грани, определено их кристаллографическое значение, установлена связь симметрии алмаза с видом рефлекса от поверхности на кристаллографической проекции. Определены статистические закономерности в частотах появления тех или иных плоских сеток на криволинейных поверхностях алмазов. И.И. Шафрановским апробирован метод компликации простых форм для описания протяженного светового рефлекса от поверхности округлого алмаза. Им выделены 14 условных конусов с осями, совпадающими с четверными и тройными осями симметрии кристалла алмаза, ограничивающих рефлексы от округлых граней додекаэдронидов алмаза, и таким образом сделана первая попытка описать форму округлого алмаза с определенной криволинейной поверхностью.

Неплоскогранные поверхности кристаллов алмаза уральского типа большинство исследователей относят к формам растворения. Еще А.Е. Ферсманом и В. Гольдшмидтом в монографии «Алмаз» округлая фор-

ма алмазов интерпретировалась как результат растворения. Позже А.Е. Ферсман признавал, что округлые кристаллы алмаза имеют сложный генезис, допуская сохранение таких форм при росте алмаза – при многократной смене роста и растворения, иными словами, при растворении и регенерации. Эта идея оказалась весьма продуктивной и, как показано в данной работе, позволила объяснить не только облик, но и тонкий рельеф на криволинейных поверхностях алмаза. Однако ряд исследователей придерживались иной точки зрения на генезис округлых форм алмаза (Гневушев, Бартошинский, 1959; Гневушев и др., 1964; Бартошинский, 1983; Бартошинский, Квасница, 1991). Открытая в научной печати (Орлов, 1963) дискуссия по этому поводу не привела к какому-либо положительному результату, поскольку обе стороны опирались на косвенные доводы и часто умозрительные заключения. Точки зрения сформировались на основе общей убежденности, часто не до конца осознанной, в том, что причиной таких форм кристаллов является специфическое взаимодействие кристалла со средой и главную его особенность составляет неравновесность переноса вещества в среде и фазового перехода на поверхности кристалла. Прямые эксперименты по моделированию формы кристалла алмаза в высокопараметрических условиях были впервые проведены в конце 1980-х – начале 1990-х годов в Новосибирске (Хохряков, Пальянов, 1990; Хохряков и др., 2002). Образование круглых форм додекаэдроидов, напоминающего природные алмазы, было показано в экспериментах при растворении (травлении) алмаза в среде, содержащей воду. Позже аналогичные эксперименты проводились другими исследователями (Kozai, Arima, 2005; Arima, Kozai, 2008).

Многочисленные кристалломорфологические исследования алмаза, проводившиеся в течение пяти десятилетий после работ И.И. Шафрановского и А.А. Кухаренко, практически не привели к существенному прогрессу. Более того, минералогические описания морфологии алмаза продемонстрировали отход от кристаллографически точного определения формы алмазов в стиле А.Е. Ферсмана, И.И. Шафрановского, А.А. Кухаренко в сторону приближенного, субъективного, исторически устаревшего способа с использованием не принятых в кристаллографии, но принятых в минералогии, часто эмоционально окрашенных определений. Например, при описании алмазов широко применяются термины «ламинарная», «леденцовая» форма, «сноповидная», «занозистая» штриховка, «шагреновый» рельеф, «черепитчатая» скульптура граней, «полицентрическое строение» поверхности и др. Информативность таких определений низка. Факты свидетельствуют об объективном отставании кристаллографии алмазов и в целом кристаллографии форм растворения кристаллов от темпов развития естественных наук.

Актуальность попыток разработки новых подходов к описанию криволинейных форм кристаллов и алмазов, в частности, очевидна. В первую очередь необходимо разработать практичный, рациональный, естественно-научно обоснованный способ описания округлых поверхностей кристаллов.

Проблема кривогранных форм кристаллов алмаза уральского типа включает в себя ряд разрабатываемых, нерешенных и только обозначенных научных задач, главными из которых являются следующие:

– количественное описание криволинейной формы кристалла алмаза;

– установление основных тенденций в эволюции криволинейных форм алмаза во времени в ходе растворения или многочисленных этапов растворения–регенерации;

– выявление морфологических критериев глубинного растворения алмаза и растворения в транспортёре при более низких P – T -параметрах или в ходе коровых метасоматических, гидротермальных и метаморфических процессов, когда термодинамические условия среды обеспечивают равновесную устойчивость структуры графита;

– генезис грубого и тонкого рельефа на поверхности алмаза;

– выделение форм растворения кристалла, отличающихся от форм механического износа поверхности.

Производственные компании, занятые добычей алмазов, активно прибегают к минералогическому и, в частности, кристалломорфологическому описанию представительных партий алмазов текущей добычи. В настоящее время назрела необходимость модифицировать широко используемую в таких научно-исследовательских центрах методику морфологического анализа алмазов, основанную на визуально-морфологическом (физиографическом) описании кристаллов. С этой точки зрения, методы гониометрии, обладающие достаточно простой приборной базой, еще далеко не исчерпали свои возможности.

Обратим внимание на один важный аспект кристалломорфологических исследований природного алмаза. Особенности состава и дефектной структуры алмаза, выявляемые, например, современными спектроскопическими методами, обусловлены в первую очередь кристаллизацией и отражают в основном глубинные мантийные условия его нахождения. В морфологии же алмаза отражены последние (но не все) этапы эволюции: от начала формирования очага вулканизма в ходе преобразования выносимого глубинного материала, далее при прерывистом движении мантийных пород к дневной поверхности при активном воздействии сопровождающих флюидов, затем при выветривании и переносе кристаллов водными и воздушными потоками по поверхности земли до формирования россыпей и, наконец, при промышленной добыче. На перечисленных этапах истории алмаза происходят его растворение, травление, естественное и техногенное механическое разрушение, рассеивание и селекция, определяющие наиболее значимые экономические показатели месторождения и технологии добычи. Поэтому инструментальные кристалломорфологические исследования должны представлять исключительную ценность для компаний и корпораций, добывающих алмазы.

Целью данной работы является разработка нового подхода к описанию криволинейных форм кристаллов на примере алмаза уральского типа. К задачам данного исследования относятся

– поиск и теоретическое обоснование морфологических признаков роста, растворения и механической деградации поверхности кристалла алмаза;

– построение основы рациональной записи криволинейных форм алмаза в рамках неравновесной кристаллографии форм растворения;

– разработка критериев оценки механической деградации поверхности алмаза уральского типа;

– разработка критериев оценки процессов необратимого растворения (травления) алмаза, произошедших в поле метастабильности структуры;

– анализ статистических закономерностей растворения, механического износа и травления округлых алмазов различных россыпных и коренных месторождений Якутии, Бразилии, Урала.

В работе осуществлена попытка вскрыть механизмы деградации и описать последовательность эволюции формы алмаза в природных условиях, разработаны морфологические критерии оценки вариаций термодинамических характеристик вещества в основании литосферы Земли и земной коре, вызывающих зарождение, рост, растворение, регенерацию и травление алмаза, выполнено минералого-статистическое описание коллекций алмазов.

Основные коллекции алмазов предоставлены автору для морфологических исследований в рамках соглашения о сотрудничестве между Институтом геологии Коми научного центра УрО РАН и Департаментом геологии Федерального университета штата Минас Жерайс (Бразилия), договора № 22/2007 «Инструментальное (фотогониометрическое) изучение морфологии округлых алмазов Якутской алмазоносной провинции» с ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА» (ЗАО). Коллекции алмазов Тимана и Урала были исследованы автором в ходе составления научных экспертиз и консультаций.

Коллекции изученных алмазов, как правило, не обладают полнотой и представительностью для выработки заключений и выводов, касающихся геологии и минералогии месторождений, но происхождение подавляющего большинства алмазов не вызывает сомнений. В шестой и последующих главах результаты практических исследований природных алмазов ограничиваются только макроскопической кристалломорфологией, поскольку автор не ставил перед собой цель максимально полно и всесторонне охарактеризовать алмазы конкретных рудопроявлений, месторождений и провинций. Специфика такого подхода связана не только с отсутствием необходимой в таких случаях дополнительной геологической информации, но и с попыткой соблюсти права соавторов по серии совместных публикаций, предоставивших фактический материал для исследований.

Автор выражает искреннюю благодарность д.г.-м.н. В.А. Петровскому, доктору М. Мартинсу, профессору И. Карфункелю, предоставившим бразильские коллекции алмазов для исследования, руководству и сотрудникам ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА» А.В. Герасимчуку, С.В. Овчинникову, Б.С. Помазанскому, О.Е. Ковальчуку, З.В. Специусу за возможность изучить богатые коллекции якутских алмазов, а также за помощь в работе и полезные консультации, д.г.-м.н. В.И. Силаеву, д.г.-м.н. И.И. Чайковскому за предоставленную коллекцию уральских алмазов и плодотворное обсуждение результатов работы. Автор искренне признателен академику А.М. Асхабову за доброжелательное и внимательное отношение к данной работе, коллегам к.г.-м.н. В.П. Лютоеву, к.г.-м.н. Н.Н. Пискуновой, к.г.-м.н. А.Е. Сухареву за консультации и помощь в работе и сотрудникам Института геологии Коми НЦ УрО РАН за постоянный интерес и критические замечания, высказываемые в ходе выполнения исследования.

На отдельных этапах работа выполнялась при финансовой поддержке программ фундаментальных исследований РАН № 12-У-5-1026, научной школы НШ-1310.2012.5.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ ПОВЕРХНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛА АЛМАЗА

Мир кристаллических форм минералов, согласно академику А.Е. Ферсману (1955), включает плоскогранные формы роста и кривогранные формы растворения. Можно дополнить мир динамических кристаллических форм А.Е. Ферсмана множеством идеальных статических равновесных форм, а к формам роста отнести наблюдаемые в природе и эксперименте макроскопически кривогранные формы роста (поверхности пинакоида {0001} на искусственных кристаллах или скрученные грани природных кристаллов кварца, гематита, карбонатов и др.). Равновесные формы, являясь абстракцией, фактически не встречаются в природе, но они важны в теоретическом плане как звено, замыкающее непрерывную эволюцию форм кристаллов.

1.1. ФОРМА ПОВЕРХНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛА

1.1.1. Классические представления о поверхности кристалла

Прежде чем обсуждать формы кристаллов алмаза, определим, что такое форма кристалла. Под формой кристалла, так же как и любого тела, состоящего из конденсированного вещества, понимается поверхность, отделяющая данное тело, обладающее определенным составом и структурой, от других тел, окружающих его. Строение поверхности кристалла является предметом изучения кристалломорфологии.

Согласно классической кристаллографии, пространственная периодическая упорядоченность идеальной равновесной кристаллической структуры отражается в правильной форме кристалла-полиэдра, для макроскопически плоских граней которого справедлив закон рациональных отношений отрезков – закон Гаюи. Однако кристаллы минералов далеки от совершенства и часто ограничены криволинейными поверхностями. Нарушение закона рациональных индексов для них обычно объясняется структурным несовершенством кристалла или своеобразным распределением элементарных ступеней на гранях, образовавшихся в ходе неравновесного роста или растворения кристалла.

В традициях кристаллографии для описания формы кристалла требуется перечислить все его грани с указанием их относительных площадей. Таким образом, под формой кристалла можно понимать полный список плоских сеток (граней), записанных, например, с помощью индексов Миллера в выбранной системе координат, и набор их центральных расстояний. Центральное расстояние до данной плоской сетки, служащей гранью кристалла,

отсчитывается относительно одного условного геометрического центра кристалла, не обязательно совпадающего с его физическим зародышем. Плоскость в трехмерном пространстве математически можно описать уравнением первого порядка с четырьмя параметрами, три из которых представляют, например, индексы Миллера (для кубических кристаллов), а четвертый связан с кратчайшим расстоянием плоскости от начала координат. В идеальном случае форма кристалла представляет собой полиэдр, вырезанный набором плоскостей в трехмерном пространстве. Поэтому, в соответствии с геометрией идеального кристалла, для описания кристалла-полиэдра достаточно привести четыре параметра каждой его плоской грани.

Задача описания формы кристалла упрощается, если использовать симметрию кристаллической структуры. Так, одна плоская грань «размножается» элементами точечной группы симметрии кристалла в семейство симметрично эквивалентных граней с равными центральными расстояниями, которые представляют одну простую форму. Часто под формой кристалла в кристаллографии понимают только набор простых форм с указанием точечной группы структуры кристалла (Шаскольская, 1984). При этом центральные расстояния не упоминаются, поскольку, во-первых, операции точечной симметрии «выравнивают» центральные расстояния всех граней, принадлежащих одной простой форме; во-вторых, решетка кристалла обладает свойством трансляционной инвариантности, а физические свойства структурно эквивалентных граней кристалла одинаковы и не зависят от центральных расстояний (не учитываются поверхностные эффекты). По этой причине идеализированное понятие формы кристалла без учета и упоминания центральных расстояний в классической кристаллографии вполне закономерно и обоснованно.

Однако в термодинамике и минералогии важна «реальная форма» кристалла минерала, выросшего в далеко не идеальных условиях, поэтому форма должна включать информацию о центральном расстоянии до каждой отдельной грани в совокупности с ее индексами Миллера. Из равновесной термодинамики с учетом теоремы Вульфа следует, что изменчивость центральных расстояний до граней одной простой формы может служить одним из показателей степени отклонения от равновесия термодинамической системы. В частности, математически строго доказывается, что поверхностная энергия кристалла-полиэдра в равновесных условиях тем больше, чем больше дисперсия центральных расстояний до граней одной простой формы. Поэтому в термодинамическом равновесии совершенный кристалл должен приобрести наиболее симметричную форму, для которой каждая простая форма содержит равные по площади грани (с одинаковым центральным расстоянием), а грани разных простых форм должны иметь близкие по площади грани или, точнее, форма должна обладать наименьшей поверхностной энергией.

В идеальном случае под формой кристалла следует понимать совокупность поверхностей кристаллического тела, описанных строго математически, например в декартовой системе координат, связанной с центром масс кристалла. Математический способ описания поверхности кристалла одновременно фиксирует не только геометрические свойства самой поверхности, но и

местоположение каждого ее участка относительно начала координат как геометрического центра кристалла и осей системы координат, не обязательно совпадающих с осями кристаллографической системы координат.

Описать гладкую криволинейную поверхность, встречающуюся часто на природных монокристаллах, с помощью набора плоских сеток практически невозможно. Поэтому в минералогии часто заменяют точный количественный кристаллографический способ записи формы кристалла качественными понятиями «облик» и «габитус» кристалла (Бетехтин, 2007) и в лучшем случае дополняют их перечислением наиболее выделяющихся плоских участков – граней, непрерывно входящих в криволинейную поверхность кристалла (Кухаренко, 1955; Шафрановский, 1957, 1961; Мокиевский, 1983). Ограничиваясь только качественным способом описания формы кристалла, удобно пользоваться понятиями габитуса и облика. В совокупности обе характеристики позволяют судить о наборе основных простых форм кристалла и вариациях центральных расстояний до их граней и таким образом сохранить главную кристалломорфологическую информацию об индивидуальных особенностях развития индивида.

Наиболее распространенная точка зрения на кривогранные кристаллы достаточно полно изложена И.И. Шафрановским в работе «Кристаллы минералов. Кривогранные, скелетные и зернистые формы» (1961). Уже с конца XIX в. кривогранные формы кристаллов минералов рассматриваются как «переходные грани» (по В. Гольдшмидту), они могут возникать как при росте, так и при растворении. К неплюскогранным формам, по наблюдениям многих исследователей, могут также приводить особенности срастания кристаллов, механические деформации и собственно механический износ. Тем не менее влияние структуры кристалла на криволинейную форму признавалось только в случае, если криволинейность поверхности образована неравномерной ультратонкой штриховкой в процессе неравномерного распространения ступеней роста или растворения. Иногда влияние структуры проявляется в процессах двойникования или расщепления кристаллов, приводящих к внешне округлым формам. Влияние структуры монокристаллов на сложные формы двойной кривизны на примере алмазов было отмечено в работе А.Е. Ферсмана и В. Гольдшмидта «Der Diamant» (1911 г.).

Теперь общепризнано, что форма кристалла отражает не только его структуру (Donnay, Harker, 1937; Hartman, Perdok, 1955a, b), но и условия роста (и растворения) в некотором обобщенном, интегрированном виде, неся следы изменения параметров кристаллообразующей системы.

Форма кристаллов минералов, выросших в квазиравновесных условиях, выступает важнейшим диагностическим признаком, который широко используется для оценки условий минералообразования (Евзикова, 1958, 1972; Григорьев, 1961; Юшкин, 1968, 1977; Григорьев, Жабин, 1975; Кристалломорфологическая эволюция..., 1981). В настоящее время для большого числа минералов установлена эмпирическая зависимость между формой и физико-химическими условиями их нахождения. На этом основании построены эволюционные габитусные ряды и схемы развития месторождений (Евзикова, 1972; Кристалломорфологическая эволюция..., 1981; Попов В.А., Попова В.И., 1996).

Пытаясь подробнее разобраться в характере взаимосвязей формы кристалла с условиями его квазиравновесного роста, ученые сталкиваются с проблемами разного порядка.

1. Что понимать под среднестатистической формой кристалла, если исследователь располагает некоторой совокупностью кристаллических индивидов, выросших при определенных, пусть достаточно близких или даже тождественных, физико-химических условиях, но обладающих индивидуальными особенностями (Niggli, 1923; Юшкин, 1968; Краснова, Петров, 1997)?

2. Какой вид среднестатистической формы для выборки кристаллов наиболее приемлем с точки зрения описания условий минералообразования (Богданов, 1990)?

3. Какие физико-химические параметры системы кристалл–среда можно считать независимыми и ответственными за изменение среднестатистической формы роста кристалла (Rakin, 1995)?

4. Какова роль кинетики роста и различных механизмов роста граней простых форм кристалла?

На эти и другие вопросы исследователи отвечают по-разному, и сегодня, как и много лет назад, нет общепризнанных ответов ни на один из перечисленных вопросов. При этом относительно форм растворения еще меньше ясности, чем относительно форм роста. Но совершенно очевидно, что формы растворения аналогично формам роста должны отражать как структуру, так и условия растворения. Ситуация осложняется тем, что плоские грани роста трансформируются при растворении в округлые поверхности, например, в виде так называемых «конусов растворения». На кристаллах, находящихся в россыпях, многие округлые поверхности традиционно интерпретируются как результат истирания и механической полировки (Афанасьев и др., 2001). Однако для алмаза, как наиболее износостойчивого минерала, со времени выхода работы А.Е. Ферсмана и В. Гольдшмидта «Der Diamant» делается исключение, и округлые поверхности россыпных алмазов чаще принимают за формы растворения.

Кроме истинного растворения кристалла отдельно выделим процесс травления, вносящий свой вклад в трансформацию поверхности кристалла. Травление как особый специфический процесс растворения возможно обосновать термодинамически. Травлением можно называть поверхностную химическую реакцию растворения кристалла в таких термодинамических условиях, когда его структура метастабильна (термодинамически неустойчива). Предполагается, что в этих условиях существует другая, «равновесная» структурная модификация данного вещества, обладающая меньшей внутренней энергией, или данное вещество вообще не может находиться в каком-либо кристаллическом состоянии. Таким образом, в замкнутой системе при растворении кристалла с метастабильной структурой и постепенном насыщении активной среды растворенным компонентом неизбежно возникает ситуация, когда создаются условия зародышеобразования и роста другой, стабильной, структурной модификации вещества с меньшим значением химического потенциала структурообразующего главного химического компонента кристалла. В этих условиях может происходить одновре-

менный рост и других (нескольких) метастабильных фаз данного вещества, но только одна полиморфная разновидность может быть термодинамически стабильной. Если образуются зародыши новой фазы, то дальнейшее растворение–травление исходного кристалла происходит одновременно с ростом новообразованного кристалла. В то же время среда кристаллизации, насыщаясь веществом за счет растворения первого метастабильного вещества, теряет растворенный компонент в результате роста второго кристалла. Поэтому дальнейшее увеличение концентрации в среде будет ограничено. Если не учитывать массоперенос в среде, поскольку кристалл, растущий за счет вещества метастабильной фазы, находится в непосредственной близости к травящейся поверхности, между этими взаимно обратными процессами быстро устанавливается стационарное состояние (динамическое равновесие). Рост второго кристалла будет происходить со скоростью растворения первого кристалла, и, наоборот, возможна ситуация, когда скорость растворения метастабильной фазы будет ограничиваться скоростью роста новообразованного кристалла. Поэтому равновесие между первым кристаллом и средой в трехфазной системе будет недостижимо, но стационарное состояние для общего процесса перекристаллизации в этом случае практически гарантировано.

Можно предположить, что при соблюдении особых условий между активной средой и кристаллом с метастабильной структурой может быть достигнуто условное равновесие – скорость растворения уменьшится до нуля. Но при этом в среде будет создано пересыщение по основному компоненту, если принять в расчет структурно стабильную кристаллическую фазу, которая в системе не присутствует. Например, термодинамическое равновесие между активной средой, насыщенной углеродом, и кристаллом алмаза при нормальных условиях автоматически означает достижение движущей силы для зародышеобразования и последующей кристаллизации графита – разности химических потенциалов $\Delta\mu = 1,898$ кДж/моль (разность удельных энергий решеток графита и алмаза при нормальных условиях). Однако такое значительное пересыщение в активной среде в присутствии кристалла алмаза не может не иметь последствий. В этих условиях начнется зародышеобразование графита, а наиболее вероятно гетерогенное образование зародышей на грани октаэдра алмаза. Между плоской сеткой алмаза (111) и сеткой (0001) графита возможно слабое эпитаксиальное срастание для микроскопических кристаллов. В этих плоскостях с осью симметрии третьего порядка наблюдаются весьма близкие периоды расположения атомов: для графита – 0,246, алмаза – 0,252 нм.

Но травление отличается от растворения не только степенью отклонения от равновесия в форме разности химических потенциалов. Травление состоит из многих стадий и может быть ограничено как диффузией, так и скоростью различных реакций, происходящих не только на поверхности, но и вблизи нее. В частности, на поверхности травления могут происходить дополнительные реакции, превращающие вещество в новое устойчивое состояние, например оксидную или иную нерастворимую (выделяющуюся в особую фазу) форму, из-за чего процесс травления становится необратимым.

В отличие от травления при обычном растворении процесс протекает немного проще – осуществляется легко обратимый фазовый переход вещества из кристаллического состояния в среду (жидкую или газовую фазу), которая насыщается веществом, повышая его химический потенциал до равновесного. Если это происходит при высоких термодинамических параметрах, то скорость растворения будет чаще всего ограничена скоростью диффузии. К такому заключению в отношении алмаза можно прийти, если учесть, что скорость поверхностных реакций растворения (окисления и травления), согласно уравнению Аррениуса, экспоненциально зависит от температуры. Экспериментально установлено, что при атмосферном давлении и температуре до 1200 °С энергия активации окисления алмаза кислородом воздуха составляет около 230 кДж/моль (для графита – около 180 кДж/моль), а диффузия не лимитирует скорости окисления алмаза в диапазоне температур 450–600 °С (Успенская и др., 1969). Однако большое значение энергии активации создает сильную зависимость скорости окисления от температуры. Например, при повышении температуры от 600 до 1000 °С скорость реакции окисления алмаза и графита должна увеличиваться, согласно уравнению Аррениуса, в 20 000 раз. При этом известно, что коэффициент диффузии в газах увеличивается с температурой при фиксированном давлении медленнее – по степенному закону с показателем степени 1,5, а с ростом давления коэффициент диффузии уменьшается. Дополнительно надо учитывать, что в гетерогенной среде диффузия заторможена зернами твердой фазы. Таким образом, если принять энергию активации процесса растворения алмаза равной энергии активации окисления, то при высоких параметрах в поле стабильности структуры алмаза процесс растворения (и окисления) будет, вероятнее всего, диффузионно-лимитированным.

Приведенные аргументы позволяют сделать вывод о том, что травление алмаза следует отличать от истинного растворения кристалла в поле термодинамической стабильности его структуры. При этом стационарный, кинетически лимитированный процесс травления в неравновесных (сильно неравновесных) метастабильных условиях должен отражаться на поверхности алмаза особым образом, отличаясь от диффузионно-лимитированного процесса травления и квазиравновесного процесса истинного растворения кристалла в условиях стабильности его структуры.

Формы механического износа на природных кристаллах алмаза заслуживают особого внимания. Термодинамические условия механического износа алмаза имеют широкий диапазон: от экстремальных отклонений от равновесия при полном механическом разрушении алмаза до малых отклонений от равновесия при небольшом полирующем истирании поверхности. Причем в условиях полирующего износа весьма вероятно достижение некоторого стационарного режима, при котором кристалл приобретает особую форму, продиктованную анизотропией механических свойств структуры алмаза.

Необходимо отметить, что на сегодняшний день относительно округлых форм кристаллов алмаза отсутствуют: 1) теоретические модели образования того или иного типа нелинейной поверхности роста, растворения,

истирания или травления; 2) система количественного описания формы округлых поверхностей растворения, в том числе среднестатистической формы растворения; 3) критерии, позволяющие различать формы растворения, истирания и травления и устанавливать эволюцию округлой поверхности кристалла.

Формам растворения кристаллов (телу растворения) посвящена обширная литература, восходящая к работе Ф. Мооса 1824 г., наблюдавшего преобразование кристалла галита в насыщенной влагой атмосфере (Хейман, 1979). Наблюдения за кальцитовыми, доломитовыми и арагонитовыми шарами при растворении (точнее травлении) показали, что при медленном процессе (вероятно стационарном) формируется полиэдрическая форма тела. Зависимость формы тела растворения (травления), составленного из участков плоских граней, от структуры послужило основой кинематической теории растворения монокристаллов И. Франка (Frank, 1958), изоклинного метода Гросса, геометрического метода описания тел растворения Ямамото и Клебера и молекулярно-кинетической теории растворения шаров Лакмана, Франка и Хеймана (Хейман, 1979). Однако весьма многочисленные экспериментальные исследования форм растворения кристаллов в большинстве случаев осуществлялись только с позиции полиэдра растворения, зависящего от структуры кристалла, влияние транспортных характеристик среды кристаллизации не учитывалось. Здесь важно заметить, что опыты проводились с шарами, пластинами, кольцами, механически вырезанными из монокристаллов и в специфических средах – травителях, в которых обратный процесс чаще всего был невозможен. Эти два дополнительных существенных момента указывают на то, что богатый экспериментальный материал содержит, во-первых, только формы травления кристаллов, а во-вторых, по крайней мере, начальные этапы травления развиваются по «испорченному», с механическими дефектами, кристаллическому материалу. Поэтому результаты, полученные перечисленными предшественниками, можно считать ограниченными.

1.1.2. Мера неравновесности кристаллообразующей системы

Современные теоретические подходы к изучению роста кристаллов и описанию формы поверхности базируются в основном на молекулярно-кинетических представлениях об элементарных процессах присоединения и отрыва строительных частиц на поверхности кристалла (Современная кристаллография, 1980). Термодинамика, описывающая макроскопические процессы, используется в таких теориях обычно для согласования параметров локальной молекулярной модели с макропеременными, измеряемыми в опыте. Анализируя реальную криволинейную поверхность кристалла, некоторые экспериментаторы приходят к выводу, что кинетика поверхностных реакций и неконтролируемое множество случайных факторов (дефекты структуры, адсорбированные примеси, гидродинамика растворов, диффузия и др.) в ходе роста или растворения так модифицируют поверхность, что влияние структуры кристалла на форму минимизируется (Гликин, Гла-

зов, 1979). При рассмотрении сильнонеравновесных условий синтеза с таким выводом можно согласиться. Однако в стационарных и так называемых «линейных» неравновесных термодинамических режимах структура кристалла отчетливо проявляется в его форме, а максимальное влияние структуры на форму кристалла, безусловно, реализуется при термодинамическом равновесии. Таким образом, известная дискуссия кристаллогенетиков и кристаллографов о степени влияния структуры на форму реального кристалла лежит в области неравновесной термодинамики и на термодинамической шкале неравновесности для системы кристалл–среда.

Известно, что для описания системы в сильнонеравновесных нелинейных термодинамических условиях Г. Циглером был предложен принцип максимального производства энтропии (Циглер, 1966; Мартюшев, Селезнев, 2006). Меньшие отклонения от равновесия, при которых также существуют нелинейные взаимозависимости между так называемыми термодинамическими потоками и термодинамическими силами, можно описать с помощью принципа наименьшего принуждения (наименьшей скорости диссипации энергии) И. Дьярмати (1974). В случае, когда силы и потоки связаны линейными соотношениями Л. Онсагера, справедливы принцип наименьшего принуждения и его частный случай – принцип минимального производства энтропии И. Пригожина (Пригожин, Кондепуди, 2002). При небольших отклонениях от равновесия открытая термодинамическая система обычно стремится к стационарному режиму с минимальным производством энтропии (минимальным принуждением). Три релятивно выделенных нами диапазона неравновесных условий неразрывно связаны. Но, к сожалению, выбор руководящего принципа и соответствующей феноменологической модели для открытой минералообразующей системы зависит обычно не столько от свойств самой системы, сколько от предпочтений исследователя.

Отдельного внимания заслуживают квазиравновесные условия минералообразования, реализующиеся чаще всего в природе, особенно в недрах Земли. Подчеркнем, что мы ведем речь о чрезвычайно малых отклонениях от термодинамического равновесия, но не о равновесных условиях. Малые отклонения от равновесия, при которых кристалл минерала тем не менее вырастает до макроскопических размеров, требуют исключительного по длительности роста, не сопоставимого с возможностями экспериментального синтеза того же кристаллического вещества. Поэтому в квазиравновесных условиях в природе можно достаточно вероятно предполагать стационарный (без учета флуктуаций) режим роста кристаллов.

Обычно движущей силой кристаллизации при росте кристаллов называют отклонение от термодинамического равновесия, выраженное в форме разности химических потенциалов. За результат отклонения системы от термодинамического равновесия обычно принимается масса выросшего за определенное время кристалла. Однако только на основе равновесных термодинамических представлений нельзя функционально связать разность химических потенциалов и массовую скорость роста кристалла. Такая задача решается, в частности, в рамках кинетических теорий роста кристаллов. Получается, что понятие «степень отклонения от

равновесия», выраженное вполне точно и строго в равновесной термодинамике, к росту кристаллов как к кинетическому процессу, результатом которого является масса закристаллизовавшегося вещества, может быть применимо только условно. На практике специально подбираются условия, обеспечивающие технологически значимую скорость роста кристалла при определенной степени отклонения от равновесия, для обозначения которой принято пользоваться другими термодинамическими переменными – пересыщением Δc или переохлаждением ΔT (Выращивание кристаллов..., 1983). При этом бывают случаи, когда в неравновесных условиях некоторые грани кристалла практически не растут. Для описания такого феномена часто используют понятие «мертвая зона» или «мета-стабильная область». Таким образом, создается определенный парадокс: степень отклонения от термодинамического равновесия принимает не нулевое значение, а движения системы к равновесию не наблюдается. Поэтому в сознании многих исследователей понятие «степень отклонения от равновесия» имеет устойчивый качественный оттенок, но не является точной количественной характеристикой процесса.

Противоречие можно снять, если ввести понятие «степень неравновесности» для заведомо неравновесного процесса и принять ее количественную характеристику – удельное производство энтропии, включающую не только термодинамическую силу, но и термодинамический поток. В неравновесной термодинамике в так называемом линейном режиме при выходе на стационарное состояние реализуется принцип минимума производства энтропии открытой системой (Пригожин, Кондепуди, 2002). Значение производства энтропии в стационарном состоянии показывает истинную степень неравновесности такой системы. Даже в нестационарном состоянии системы с помощью величины производства энтропии можно оценивать ее «неравновесность», учитывая не только «степень отклонения от равновесия» – термодинамическую силу, но и скорость, с которой система движется к равновесию, – термодинамический поток. В нелинейном режиме также возможны стационарные состояния – диссипативные структуры, в которых производство энтропии системой принимает вполне определенные фиксированные значения. Производство энтропии удобнее рассчитывать на единицу массы или объема системы. Эта величина является вполне определяемой для растущего кристалла и многих других физико-химических систем, их можно сравнивать и делать определенные заключения о неравновесности систем. В определенном смысле производство энтропии аналогично понятию «уровень метаболизма» в биологии.

Однако расчет производства энтропии для конкретной физико-химической системы обычно представляет собой сложную задачу (Пригожин, Кондепуди, 2002). Только в рамках той или иной упрощенной модели удастся получить относительно простую формулу для его расчета (Ракин, 2006, 2009).

Например, при росте кристалла из раствора при небольших отклонениях от термодинамического равновесия и диффузионном массопереносе вещества в пограничном слое у поверхности кристалла нами получена при-

ближенная формула для расчета удельного производства энтропии поверхностью кристалла и прилегающим слоем пограничного раствора в квазистационарном случае (Ракин, 2006):

$$P = \frac{1}{S_0 \delta} \frac{d_i S}{dt} = \frac{DR}{\delta^2} \left[\frac{\Delta c_\delta^2}{c_{sc}} + \frac{\Delta c \Delta c_\delta}{c_{s0}} \right],$$

где $d_i S/dt$ – внутреннее производство энтропии системой кристалл–раствор, S_0 – площадь поверхности кристалла с бесконечно тонким слоем кристаллического вещества, δ – толщина пограничного слоя прилегающего раствора с градиентом концентрации в нем, D – коэффициент диффузии растворенного вещества в растворе, Δc_δ – перепад молярных концентраций в пограничном слое, Δc – пересыщение раствора за пределами пограничного слоя, c_{sc} – молярная концентрация раствора на поверхности кристалла, c_{s0} – концентрация насыщения раствора при данных P – T -условиях, R – газовая постоянная.

В теориях роста кристаллов обычно выделяют два режима роста – диффузионный и кинетический. При диффузионном режиме обычно полагают, что $c_{sc} \approx c_{s0}$ и соответственно $\Delta c = \Delta c_\delta$. Тогда приведенное выше выражение упрощается:

$$P = \frac{2DR}{c_{s0} \delta^2} \Delta c^2.$$

В кинетическом режиме роста кристалла пересыщение раствора у поверхности кристалла и перепад концентрации в пограничном слое могут принимать разные и независимые друг от друга значения, но в предельном случае обычно предполагают, что $\Delta c \gg \Delta c_\delta$, и формула для меры неравновесности приближается к следующему виду:

$$P = \frac{DR}{c_{s0} \delta^2} \Delta c \Delta c_\delta.$$

Выделение двух предельных режимов роста кристалла является обычной практикой в теории кристаллогенезиса (Современная кристаллография, 1980), но мы считаем, что такие упрощения можно использовать только в исключительных случаях. С учетом объективно соблюдающегося баланса вещества в ходе роста или растворения кристалла обе стороны фазового перехода – транспорт вещества в среде и поверхностные реакции – должны в равной степени учитываться в теоретических построениях при анализе степени неравновесности термодинамической системы и, тем более, при обсуждении форм роста и растворения кристаллов.

1.2. КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ФОРМЫ АЛМАЗА

В кристалломорфологии различают кроме общеизвестных форм роста, растворения и равновесия стационарную, предельную, динамическую, комбинированную, среднестатистическую и идеальную формы кристалла. Минералоги также используют понятие идеальной формы кристалла минерала, отличающейся от формы идеального кристалла в кристаллографии. Некоторые из этих понятий очевидны и широко используются, но есть такие, которые вызывают неоднозначное толкование и поэтому подробно обсуждаются в ряде кристаллографических и кристаллогенетических работ (см., например: Юшкин, 1977; Краснова, Петров, 1997).

Одним из принципиальных вопросов является масштабный уровень описания формы кристалла. Границу *макроскопического масштаба* при изучении поверхности кристалла с помощью главного инструмента для морфологических исследований – гониометра – определим на основании интерференционного предела. Если точность измерения углов в измерительном приборе – параболическом гониометре – составляет 1° , то надежное разрешение интерференционной картины на экране гониометра произойдет при отражении от дифракционной решетки, содержащей более 30 штрихов на 1 мм (период решетки будет менее 34 мкм). Первый порядок дифракции отклонится на угол 1° , и появится достоверно разрешенный в гониометре рефлекс, обусловленный только законом интерференции и не имеющий прямого отношения к исследуемому полярному комплексу кристалла. Таким образом, минимальный фрагмент поверхности кристалла, имеющий самостоятельное значение, должен составлять не менее 34 мкм. С этого размера и более будем определять макроскопический масштаб инструментальных кристалломорфологических исследований на параболическом гониометре. В нашем случае детали поверхности размером менее 30 мкм относятся к микроскопическому масштабу описания, а для участков поверхности более 30 мкм точность измерения составит не менее 1° .

Для одно- и двукружных гониометров разных конструкций, например гониометра ZRG-3, гониометра В. Гольдшмита или Е.С. Федорова, обычная точность измерения углов между гранями кристаллов составляет $1'$. Согласно интерференционному ограничению, с заявленной точностью в одну угловую минуту на этих приборах может быть установлена ориентация плоской зеркальной грани кристалла протяженностью не менее 2 мм. Другой пример: ГОСТ 8.266–77 регламентирует точность измерения углов на однокружном гониометре Г5 – $2,5''$. Для работы на таком приборе с максимальной точностью зеркальная грань объекта должна иметь размер не менее 50 мм в поперечнике. Поэтому, чем выше точность измерения углов, тем крупнее становится минимальная элементарная поверхность описываемого кристалла. Соответственно для более мелких элементов поверхности точность измерения углов падает и в каждом конкретном случае она принимает свое значение.

С учетом современных настроений и интересов многих исследователей можно также выделить нанометрический масштаб исследования, начинающийся с уровня 100 нм по общепринятому определению размеров нано-

объектов. Однако в данной работе мы остановимся только на макроскопическом масштабе исследований формы кристаллов с учетом точности отражательного параболического гониометра.

1.2.1. Основные определения

Дадим ряд определений, базирующихся на понятиях грани и ребра кристалла в указанном выше макроскопическом масштабе.

Грань кристалла – плоский или криволинейный участок гладкой поверхности кристалла с непрерывной касательной во всех направлениях, ограниченный от других участков ребрами.

Ребро кристалла – линия на поверхности кристалла, на которой касательная к поверхности испытывает скачок.

Элементарная поверхность – участок поверхности кристалла в пределах фундаментальной области. Например, фундаментальную область структуры алмаза, согласно точечной группе симметрии $m\bar{3}m$, определим с помощью трехгранного телесного угла величиной $\pi/12$ стерadian, проведенного из центра кристалла, ребрами которого служат векторы структуры $[010]$, $[111]$ и $[0\bar{1}1]$.

Динамическая форма в широком смысле – неравновесная форма кристалла, развивающаяся в процессе активного взаимодействия со средой (антоним статической равновесной формы), в узком смысле – мгновенная форма растущего (растворяющегося) кристалла.

Простая форма – совокупность граней кристалла, полученных из одной плоской сетки его кристаллической структуры преобразованиями точечной группы симметрии. Простая форма криволинейных поверхностей растворения и роста также объединяет совокупность гладких граней, образованных из одной элементарной криволинейной поверхности элементами симметрии формы кристалла.

Формы роста и растворения – соответственно формы растущего и растворяющегося кристалла. Обычно под ними понимают динамические формы кристалла, сформировавшиеся в ходе непрерывно развивающегося, достаточно длительного процесса фазового перехода – роста или растворения.

Формы травления – разновидности формы растворения кристалла в условиях термодинамической метастабильности его структуры.

Формы износа (деградации) поверхности – искажения поверхности кристалла, полученные в результате механического разрушения поверхности – пластической деформации, сколов, истирания, полирующего износа. Самостоятельного значения они не имеют и развиваются по формам роста или растворения, обычно округляя выступающие участки поверхности кристалла, в первую очередь вершины и ребра.

Комбинированная форма – форма кристалла, на котором наблюдаются одновременно поверхности роста и растворения или поверхности, отражающие разные стадии эволюции формы кристалла при сложных или длительных процессах роста (растворения) и характеризующие физически различные условия роста (растворения). Например, комбинированная форма,

сочетающая элементы идиоморфного (плоскогранного) и скелетного кристалла. Обычно под комбинированной формой понимают наличие на кристалле граней нескольких кристаллографических простых форм. Последний случай было бы правильно называть *сложной формой*, оставив термин *комбинированная форма* для вариантов сложного генезиса.

Равновесная форма – статическая идеальная форма, которую принимает кристалл, находясь в состоянии термодинамического равновесия с кристаллообразующей средой, сохраняющаяся теоретически бесконечно долго при данном термодинамическом равновесии (в противовес динамической форме). Для нее справедлив принцип Гиббса–Кюри: энергия поверхности кристалла, находящегося в состоянии термодинамического равновесия со средой, принимает минимально возможное значение. Для равновесной формы применима также теорема Вульфа: все центральные расстояния до граней разных простых форм пропорциональны удельным поверхностным энергиям (Вульф, 1952). Каждому равновесному состоянию гетерогенной системы кристалл–среда соответствует своя равновесная (сложная) форма кристалла. Она имеет важное теоретическое значение для реконструкции термодинамических условий минералообразования.

Стационарная форма – форма, которую приобретает кристалл в ходе стационарного роста (растворения). Стационарное состояние является некоторым «предельным» состоянием открытой неравновесной термодинамической системы и широко распространено в природе. Если стационарный рост (растворение) кристалла происходит в так называемом линейном неравновесном режиме, то процесс характеризуется минимальным производством энтропии, согласно теореме И. Пригожина (Пригожин, Кондепуди, 2002), или, в соответствии с принципом И. Дьярмати (1974), минимальным «принуждением». Для стационарной формы кристалла выполняется теорема: все центральные расстояния до граней простых форм пропорциональны скоростям роста (растворения). Поэтому стационарную форму кристалла можно считать индикатрисой скоростей роста (растворения). Каждому стационарному режиму роста (растворения) соответствует своя стационарная форма кристалла.

Предельная форма – форма-аттрактор, к которой стремится кристалл в широком диапазоне условий роста (растворения). При достижении кристаллом предельной формы теряется генетическая связь между физико-химическими условиями процесса и формой кристалла. Реконструкция условий роста по форме кристалла становится невозможной. Она реализуется только для высокосимметричных кристаллов в виде одной замкнутой простой формы. Важное значение этого понятия для минералогии следует из объективных ограничений в онтогенетических построениях, особенно для алмаза.

Среднестатистическая форма – набор простых форм кристалла с указанием их частоты встречаемости (таблица данных), которая рассчитывается по совокупности кристаллов выделенного генезиса. Ее можно выразить в виде обобщенного полиэдра, построенного из граней всех наблюдаемых простых форм с площадями, пропорциональными частотам встречаемости (Глазов, 1981). Однако расчет такого полиэдра может быть весьма трудоемким.

Идеальная форма кристалла в минералогии – форма полиэдра, построенная путем пересечения плоскостей, касательных к произвольной сфере в точках выхода нормалей реальных граней данного кристалла из единого центра (Шафрановский, 1957). Иногда под идеальной формой кристалла понимают предельно статистически обобщенную форму кристалла данного минерала, встречающуюся в природе. Идеальная форма не имеет большого значения для генетических построений, но может быть весьма полезна в образовательных целях.

Рассмотрим подробнее некоторые из приведенных выше понятий применительно к алмазу.

1.2.2. Равновесная форма

Равновесной формой алмаза, по-видимому, является октаэдр. Об этом косвенно свидетельствуют многочисленные статистические данные. Так, все добываемые в природе плоскогранные кристаллы алмаза – это разновидности октаэдра. Однако, представляет ли октаэдр конкретного кристалла алмаза его равновесную форму, можно установить только по его анатомии и с некоторой погрешностью. Если грани кристалла по форме и площади не совпадают с основаниями пирамид роста и отсутствуют признаки растворения и регенерации в близповерхностных слоях, тогда можно утверждать, что данным кристаллом достигнута равновесная форма. Чем больше наблюдаемое различие в площадях граней октаэдра и оснований пирамид их роста, тем увереннее можно говорить о достижении данным кристаллом равновесной формы и соответственно равновесных условий в среде кристаллизации к началу эвакуации кристалла на дневную поверхность.

Равновесная форма алмаза с позиции принципа Гиббса–Кюри. Согласно опубликованным данным (Новиков и др., 1987), для алмаза удельная поверхностная энергия граней $\{111\}$ составляет 5,3, $\{110\}$ – 6,5, $\{100\}$ – 9,2 Дж/м². Приведенные значения удельной поверхностной энергии нетрудно получить на основании энергии связи С–С в структуре алмаза, которая хорошо известна и составляет 352 кДж/моль (Илиел и др., 2007). Она была рассчитана через тепловой эффект реакции распада молекулы этана C_2H_6 по данной связи. С учетом расположения атомов в структуре алмаза число связей на единицу площади плоских сеток $\{111\}$, $\{110\}$, $\{100\}$ составляет соответственно $1,823 \cdot 10^{15}$, $2,233 \cdot 10^{15}$ и $3,158 \cdot 10^{15}$ см⁻². При разрыве указанных связей и образовании граней октаэдра, ромбододекаэдра и куба получим значения удельных поверхностных энергий – 5,33, 6,53 и 9,23 Дж/м², совпадающие с приведенными выше литературными данными. Однако выведенные таким способом теоретические параметры структуры алмаза нельзя считать точными.

Идеальный октаэдрический кристалл алмаза объемом 1 мм³, массой 3,5 мг имеет поверхность 5,7 мм². Поверхностная энергия с учетом теоретического значения удельной энергии составит 30,4 мкДж. Если кристалл той же массы будет иметь форму гексаэдра (куба), то площадь поверхности незначительно увеличится до 6 мм², а поверхностная энергия составит 55,4 мкДж. Ромбододекаэдр таких же объема и массы имеет наименьшую

площадь поверхности $5,34 \text{ мм}^2$, а поверхностная энергия составит $34,8 \text{ мкДж}$. Следовательно, наибольшие шансы стать равновесной формой, согласно принципу Гиббса–Кюри, будут у октаэдра. Многочисленные природные статистические данные свидетельствуют о том, что ромбододекаэдр и куб не могут быть равновесными формами алмаза при взаимодействии с активной средой, при высоких P – T -параметрах, когда структура алмаза термодинамически стабильна. Однако следует учесть, что значения удельной поверхностной энергии плоских сеток на свободной поверхности алмаза зависят не только от его структуры, но и от физико-химических переменных и свойств окружающей кристаллообразующей среды: давления, температуры, молекулярного состава, а также адсорбционных свойств поверхности алмаза при высоких параметрах. Тем не менее расчеты, выполненные нами без учета влияния среды, подтверждают наблюдаемый факт, что октаэдр, по-видимому, является равновесной формой алмаза.

1.2.3. Стационарная форма

При достижении стационарной формы роста в анатомии кристалла формируются правильные пирамиды роста всех граней с вершинами, направленными к единому «центру», не обязательно совпадающему с зародышем. Этот условный «центр» может быть расположен и вне кристалла. Стационарная форма кристалла обладает одним важным свойством: все центральные расстояния до граней разных простых форм, отсчитываемые от такого центра, пропорциональны скоростям роста. Каждому стационарному режиму роста соответствует своя стационарная форма кристалла. Для алмаза ростовая стационарная форма имеет смысл, когда в анатомии индивида различаются пирамиды роста, по крайней мере, двух простых форм – октаэдра и куба, что наблюдается обычно во внутренних частях природных кристаллов алмаза. Для октаэдрического кристалла алмаза понятие стационарной формы не применимо.

Согласно наблюдениям, октаэдр является наиболее распространенной формой роста при небольших отклонениях от термодинамического равновесия. Когда говорят «при небольших пересыщениях», подразумевают небольшое избыточное содержание углерода как основного компонента алмаза в среде кристаллизации у поверхности кристалла по сравнению с его равновесным значением при данном давлении, температуре и концентрации остальных компонентов многокомпонентной среды. Об октаэдре как преобладающей форме роста алмаза свидетельствует анатомия кристаллов, определяемая методами люминесцентной УФ-интроскопии и катодной люминесценции (Бескрованов, 1992; Помазанский и др., 2003; Палажченко, 2008). Среди форм роста алмаза при больших пересыщениях в эксперименте выделяются также куб и ромбододекаэдр, которыми часто огранены искусственные кристаллы алмаза (Properties ..., 2001; Чепуров и др., 2009). Пирамиды роста граней куба иногда ясно различаются на природных кристаллах по люминесцентным картинам рассеяния света (Бескрованов, 1992; Помазанский и др., 2003; Палажченко, 2008) и картинам интерференции поляризованного света (Варшавский, 1968). На природных алмазах и алмазах с

оболочкой проявляются также поверхности ромбододекаэдра, но только в процессах регенерации, при многократных сменах роста–растворения (Бескрованов, 1992).

Стационарное состояние открытой неравновесной термодинамической системы, результатом которого является стационарная форма кристалла, – это некоторое предельное состояние, аналогичное равновесному. Термодинамическая система достигает стационарного состояния только при достаточно продолжительных и стабильных неравновесных условиях.

Тем не менее существование стационарного состояния термодинамической системы необходимо, но не достаточно для образования стационарной формы кристалла. Наличие только стационарной формы на кристалле однозначно указывает на длительность и стабильность условий роста, которые, в свою очередь, свидетельствуют о большом геологическом масштабе этого явления и позволяют прийти к заключению об аналогичном строении других кристаллов данной геологической провинции, сформировавшихся в той же обстановке. Если в выборке кристаллов конкретного месторождения встречается стационарная форма, то она должна обнаруживаться максимально часто, и по этому признаку можно выделить однородное статистическое множество кристаллов единого генезиса.

Для растворяющегося кристалла-полиэдра также можно применять понятие стационарной формы, для которой центральные расстояния до граней разных простых форм будут пропорциональны скоростям растворения. Однако в отличие от роста доказать наличие стационарной формы при растворении по одному выделенному кристаллу нельзя. Только по представительной выборке кристаллов можно установить присутствие стационарной формы, если кристаллы одного генезиса демонстрируют одну среднестатистическую форму полиэдра с небольшой дисперсией параметров.

Вместе с тем кристалл чаще при растворении теряет плоские грани, поскольку процесс растворения не «симметричен» процессу роста. В результате растворения кристалл приобретает криволинейную поверхность. Анализ теоретических моделей кристаллов Косселя (Странский, Каишев, 1939; Козлова, 1972; Хейман, 1979) убедительно показал, что в результате многочисленных элементарных процессов присоединения и отрыва строительных частиц на кристалле при росте формируется плоскогранная форма, а при растворении – округлая. Эти процессы в моделях кристалла Косселя управляются вероятностями присоединения и отрыва частицы в различных позициях на кристаллической поверхности, зависящими от энергии связи частицы с поверхностью и направления действия ближайших химических связей. Поэтому в округлых поверхностях растворения кристалла, так же как и в плоских гранях роста, неизбежно должна проявляться симметрия решетки и химических связей. Криволинейные поверхности растворения, как будет показано ниже, можно описать уравнениями второго порядка. Криволинейные поверхности содержат от одного до трех параметров, определяющих форму. Причем при переходе к масштабно-инвариантному способу описания формы кристалла число параметров уменьшается на единицу. Таким образом, стационарная форма растворения определяется сохраняющимся во времени набором относительных параметров криволинейной формы.

1.2.4. Предельная форма

Октаэдр, очевидно, можно также считать предельной формой роста при небольших пересыщениях, когда в габитусе кристалла остается единственная форма роста. Куб, ромбододекаэдр и ограниченный ряд форм тригонтриоктаэдра и тетрагонтриоктаэдра – это замкнутые простые формы, теоретически они могут быть предельными формами роста, однако, согласно наблюдениям, таковыми для алмаза не являются. Это тем более удивительно, что куб образован F-гранями, а ромбододекаэдр и ряд 24-гранников (тригонтриоктаэдры и тетрагонтриоктаэдры) – S-гранями по теории Хармана–Пердока и, таким образом, весьма вероятны на кристалле алмаза. Формально обобщенные замкнутые формы – тригонтриоктаэдр, тетрагонтриоктаэдр и гексоктаэдр – нельзя назвать предельными формами, поскольку каждая представляет собой множество кристаллографически разных форм. Поскольку октаэдр для кристалла алмаза является одновременно равновесной и предельной формой роста, только по форме октаэдрического алмаза без привлечения данных анатомии кристалла или микрорельефа поверхности нельзя установить, находился ли данный алмаз в состоянии термодинамического равновесия или в процессе роста.

При растворении (и травлении) алмаза в общем смысле обобщенной предельной формой считают округлый ромбододекаэдроид с гранным швом (Хохряков и др., 2002). Однако, как будет показано ниже, каждый ромбододекаэдроид может быть описан набором трех относительных параметров, поэтому он образует целое семейство разных «простых форм» ромбододекаэдроидов, зависящих от условий и стадии растворения в ходе эволюции формы кристалла. По этой причине округлый ромбододекаэдроид с гранным швом нельзя считать предельной формой растворения (и травления). Для алмаза в целом пока не известна предельная форма растворения и даже не доказан факт ее существования.

1.2.5. Среднестатистическая форма

Для создания изображения кристалла-многогранника с обобщенной среднестатистической формой Г.Е. Богдановым (1990), например, было предложено рассчитывать центральные расстояния каждой простой формы обратно пропорционально частоте встречаемости. Однако в этом случае редко наблюдаемые грани могут исчезнуть на обобщенном кристалле-многограннике. А.И. Глазовым (1981) вместо частоты встречаемости было предложено измерять среднюю площадь граней данной простой формы и ее долю в общей площади поверхности кристалла. Усреднение полученных значений по разным простым формам и по совокупности кристаллов позволяет наиболее точно охарактеризовать среднестатистическую форму. Однако трудности измерительных процедур не позволяют широко использовать данный метод. Ранее А.В. Шубниковым (Богданов, 1990) была предложена методика построения среднестатистической формы по измерениям центральных расстояний до граней кристалла. Но и в этом случае возникают сложности, например для кристаллов, не обладающих центром инверсии.

Если обсуждение среднестатистической формы для кристалла-многогранника в научной литературе длится уже более полувека, то среднестатистическая форма для округлых кристаллов до сих пор не определена. Особую сложность представляет сама округлая форма кристаллов. Для алмаза уральского типа описание среднестатистической формы было выполнено А.А. Кухаренко (1955) через частоты встречаемости кристаллографических плоских сеток на поверхности кристалла. Такой метод (Шафрановский, 1948, 1957, 1961; Кухаренко, 1945, 1955) приводит к накоплению больших массивов данных, которые тем не менее нельзя трансформировать в компактный способ представления среднестатистической формы.

Нами предложен способ описания криволинейных естественных поверхностей кристаллов с помощью уравнений второго порядка (Ракин, 2004). По совокупности кристаллов данного генезиса параметры уравнения поверхности можно усреднять в рамках той или иной статистической модели, и таким образом может быть легко получена среднестатистическая форма округлого кристалла.

Для расчета среднестатистической формы на основе комбинированных форм кристалла с плоскими и округлыми поверхностями наиболее адекватным представляется метод А.И. Глазова (1981), учитывающий относительные площади поверхностей разных типов. Тем не менее построение среднестатистической комбинированной формы представляет собой достаточно трудную задачу.

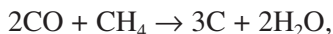
1.3. УСЛОВИЯ РОСТА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФОРМА КРИСТАЛЛА АЛМАЗА

Согласно современным представлениям, большинство добываемых алмазов сформировались в основании литосферы или в верхней мантии древних кратонов на глубинах 150–200 км, где термодинамические условия (температура 900–1300 °С и давление около 5 ГПа) соответствуют области стабильности структуры алмаза (Лейпунский, 1939; Bundy, 1963; Bundy et al., 1996). Иногда генезис алмазов на основании состава минеральных включений в них связывают с субдукцией океанической коры и трансформацией ее углеродсодержащего вещества на уровне нижней мантии (Ringwood, 1991; Sautter et al., 1991; Stachel et al., 2005).

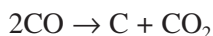
1.3.1. Химический состав среды алмазообразования

Твердые породы, составляющие среду алмазообразования, в основном определяются ограниченным набором элементов: Si, O, Mg, Fe, Ca, Al, Ti, Na, K, C, H, S. Частично твердые породы литосферы могут расплавляться, и в точках эвтектики расплав будет иметь особый состав, не совпадающий с валовым составом пород, но связанный с ним. Подвижный флюид (газовая фаза) состоит из еще меньшего числа элементов, образующих летучие соединения CO, CO₂, CH₄, H₂O, H₂S, S₂ и карбонилы металлов переходных элементов. Допускается, что алмаз формируется в восстановительной ква-

зиравновесной обстановке в результате следующих реакций между компонентами (Гаранин и др., 2006):



Предполагается, что первая реакция идет при кристаллизации перидотитовых или эклогитовых магм из расплава (Маракушев, 1981), а вторая – из флюида (в газовой фазе) (Гаранин и др., 2006). В неравновесных каталитических условиях возможно протекание реакции Будуара

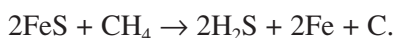
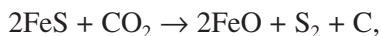


и реакции



Реакция диспропорционирования Будуара при повышении давления смещается вправо, и поэтому моноксид углерода, присутствующий в большом количестве в составе мантийных флюидов, может выступать как один из основных источников углерода для кристаллизации алмазов. Хорошо известно, что равновесное распределение между моноксидом и диоксидом углерода сильно зависит от температуры. При высоких температурах моноксид преобладает.

Согласно широко известной модели образования алмазоносных кимберлитов С. Хаггерти (Haggerty, 1986; Haggerty, Sautter, 1990), к появлению свободного углерода могут быть причастны также сульфиды железа. Возможные реакции сводятся к следующим:



Большая роль в транспорте углеродсодержащей газовой фазы может принадлежать более сложным соединениям – карбонилам металлов, в первую очередь пентакарбонилу железа $\text{Fe}(\text{CO})_5$, который обладает летучестью и устойчивостью при высоких температуре и давлении в восстановительной обстановке.

Транспортные свойства носителя (кимберлита, лампроита) зависят от состава первичного вещества. Например, если первичный состав кальциево-карбонатитовый, то начальная жидкая и одновременно вязкая кимберлитовая магма на глубине порядка 100 км (давление меньше 3 ГПа) начинает испытывать реакцию декарбонатизации с выделением газовой фазы CO_2 (Шарыгин и др., 2013). Подвижность транспортера возрастает с увеличением доли газовой фазы в трехфазной системе.

В искусственном синтезе алмазов при высокой температуре и давлении чаще используются принципиально иные среды кристаллизации – расплавы Ni, Mn, Co, Fe, Pt и других металлов, в которых атомарный углерод хорошо растворим. Однако природные условия отличает не только существенно

иной состав среды кристаллизации, но и длительность процесса, который позволяет природным алмазам приобретать стационарную, предельную и даже равновесную формы.

1.3.2. Теория периодических цепей сильных связей и структура алмаза

Согласно равновесной теории периодических цепей химических связей (ПЦС), созданной П. Хартманом и В. Пердоком (Hartman, Perdok, 1955a, b) для описания формы кристалла в условиях, близких к термодинамическому равновесию, все грани кристалла подразделяются на три типа: F-грани $\{hkl\}$, для которых в слое толщиной, равной минимальному межплоскостному расстоянию (d_{hkl}), по этому направлению содержатся две или более непараллельные цепи химических связей кристалла; S-грани, имеющие одну цепь сильных связей в слое d_{hkl} ; К-грани, которые не содержат ни одной цепи сильной связи в слое. Согласно теории, F-грани должны быть плоскими и расти по послойному и дислокационному механизму, поскольку энергия образования элементарной ступени велика и скорость образования элементарной ступени существенно ограничивает скорость роста грани. S- и К-грани, по П. Хартману и В. Пердоку, могут быть атомарно шероховатыми и растут главным образом по нормальному механизму, поскольку энергия образования ступени на S- и К-гранях близка или равна нулю. На S-гранях возможно образование макроступеней, ориентированных по цепям сильных связей. Наименьшая скорость роста должна быть у F-граней, и они должны определять габитус кристалла.

В алмазе периодическая цепь сильных связей –C–C–, имеющая пилообразную форму, параллельна направлениям $\langle 110 \rangle$. Полоса ПЦС лежит в плоской сетке ромбододекаэдра и имеет ширину $a/4$ (0,89 Å). Для грани октаэдра можно установить, что в слое толщиной, равной наименьшему межплоскостному расстоянию $d_{111} = 2,055$ Å, содержатся три непараллельные периодические цепи сильных химических связей шириной 0,51 Å. Поэтому грань $\{111\}$ можно считать F-гранью алмаза. Для грани куба $\{100\}$ две непараллельные ПЦС шириной 0,89 Å лежат в слое $d_{100} = 3,56$ Å, и, согласно определению П. Хартмана и В. Пердока, грани гексаэдра также можно считать F-гранями.

Рассмотрим последовательно некоторые плоские сетки (hkl) с небольшими индексами Миллера, принадлежащие зоне $[01\bar{1}]$ в пределах дуги 90° (табл. 1.1). Кроме граней куба (100), октаэдра (111) и ромбододекаэдра (011), принадлежащих данной зоне, в нее входят сетки, образующие на алмазе грани тригонтриоктаэдра $(hkk)_{h < k}$ и тетрагонтриоктаэдра $(hkk)_{h > k}$. Установим тип грани согласно теории ПЦС.

Межплоскостное расстояние и ширину полосы ПЦС в направлении нормали к грани можно рассчитать по формулам

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}, \quad b_{\text{ПЦС}} = \frac{a}{4} \sin \alpha, \quad (1.1)$$

где $a = 3,56$ Å – параметр элементарной ячейки алмаза, α – угол между нормалью к плоскости ПЦС и нормалью к грани (hkl).

Таблица 1.1

**Характеристики плоских сеток
алмаза, принадлежащих зоне [00 $\bar{1}$]**

<i>hkl</i>	<i>d_{hkl}</i> , Å	<i>b_{плс}</i> , Å	Тип грани
0 1 1	2,517	0,000	S
1 9 9	0,279	0,070	—"
1 5 5	0,498	0,125	—"
1 4 4	0,620	0,155	—"
1 3 3	0,817	0,204	—"
2 5 5	0,484	0,242	—"
3 7 7	0,344	0,258	—"
4 9 9	0,267	0,267	—"
1 2 2	1,187	0,297	—"
5 9 9	0,260	0,325	K
4 7 7	0,333	0,333	S
3 5 5	0,463	0,348	—"
5 8 8	0,288	0,360	K
2 3 3	0,759	0,379	S
5 7 7	0,321	0,401	K
3 4 4	0,556	0,417	S
4 5 5	0,438	0,438	—"
6 7 7	0,308	0,461	K
7 8 8	0,268	0,468	—"
8 9 9	0,237	0,474	—"
9 10 10	0,212	0,478	—"
1 1 1	2,055	0,514	F
9 8 8	0,246	0,554	K
8 7 7	0,280	0,559	—"
7 6 6	0,324	0,566	—"
6 5 5	0,384	0,576	—"
5 4 4	0,472	0,589	—"
4 3 3	0,611	0,611	S
7 5 5	0,358	0,626	K
3 2 2	0,863	0,648	S
8 5 5	0,333	0,667	K
5 3 3	0,543	0,679	—"
7 4 4	0,396	0,692	—"
9 5 5	0,311	0,700	—"
2 1 1	1,453	0,727	S
9 4 4	0,335	0,754	K
5 2 2	0,620	0,775	—"
8 3 3	0,393	0,786	—"
3 1 1	1,073	0,805	S
7 2 2	0,472	0,825	K
4 1 1	0,839	0,839	S
5 1 1	0,685	0,856	K
6 1 1	0,578	0,866	—"
7 1 1	0,498	0,872	—"
8 1 1	0,438	0,876	—"
1 0 0	3,560	0,890	F

Остальные грани алмаза с большими индексами Миллера, включая все грани гексоктаэдра и тетрагексаэдра, являются К-гранями. Следуя критерию теории, к F-граням алмаза следует отнести только две формы – октаэдр и куб, содержащие соответственно три и две периодические цепи сильных связей; к S-граням кроме граней ромбододекаэдра принадлежат также грани 13 разновидностей тригонтриоктаэдров и 5 тетрагонтриоктаэдров (см. табл. 1.1).

Встречаемость на алмазах уральского типа приведенных в табл. 1.1 граней и граней других форм гексоктаэдров была подробно изучена статистически А.А. Кухаренко (1955).

Обычно формой роста алмаза в природе является октаэдр, но нередко в анатомии кристалла методами катодной люминесценции, аномального двупреломления или УФ-интроскопии определяется более сложное внутреннее строение, свидетельствующее о наличии пирамид роста граней куба и ромбододекаэдра (Варшавский, 1968; Бескрованов, 1992; Помазанский и др., 2003; Хачатрян и др., 2008). В конечной форме природный алмаз никогда не демонстрирует плоских граней куба или ромбододекаэдра. Но при искусственном синтезе в камерах сверхвысоких давлений и температур алмазы приобретают форму в виде комбинации нескольких простых форм: октаэдра {111}, куба {100}, ромбододекаэдра {110}, тетрагонтриоктаэдра {311}, а в аппаратах выращивания алмаза из газовой фазы – октаэдра {111} и куба {100} (Properties..., 2001). Исследования анатомии природных алмазов с помощью катодной люминесценции (Хачатрян и др., 2008) показывают, что периоды квазиравновесного роста алмаза иногда сменяются быстрым существенно «неравновесным» ростом, когда формируются иное анатомическое строение кристаллов и другой состав дефектов.

Не вызывает сомнений утверждение, что условия искусственного синтеза обыч-

но длительностью считанные минуты или часы сильно неравновесны по сравнению с природными мантийными условиями. По этой причине представляется неправомерным сопоставлять статистику форм природных и искусственных кристаллов.

На синтетических кристаллах алмаза, выращиваемых чрезвычайно быстро, присутствуют плоские грани куба, на которых так же, как и на гранях октаэдра, в соответствии с теорией Хартмана–Пердока, наблюдаются холмики и спирали, свидетельствующие о послойном механизме роста. Существование плоских граней S- и K-типа на синтетических кристаллах алмазов, полученных, например, при высоких давлениях и температурах, может быть связано, по мнению ряда исследователей, с формированием на их поверхностях адсорбированных димеров C–C, которые затем встраиваются в структуру, или с образованием мостиковых связей Me–C (van Enckevort, 2001). Процессы образования и разрушения связей Me–C должны уменьшать поверхностную энергию алмаза, но создавать дополнительные трудности для формирования элементарных степеней роста и статистически ограничивать скорость роста грани. Поэтому в неравновесных условиях роста на поверхности кристалла алмаза образуются плоские грани S- и K-типа. Кроме того, на гранях искусственных алмазов часто проявляется эффект выключения, связанный с выходом из режима выращивания в конце эксперимента, когда одновременно реализуются сверхвысокие скорости роста и на поверхностях возникают отпечатки дендритов закристаллизовавшегося металла-растворителя. Этот эффект отсутствует на природных кристаллах. В природных квазиравновесных условиях процессы образования и разрушения димеров или соединений Me–C на поверхности кристалла также возможны на ранних стадиях роста алмаза, на этапах регенерации. Часто встречающееся в литературе утверждение, обусловленное, по-видимому, влиянием равновесной теории Хартмана–Пердока, о том, что рост гладких граней куба на кристалле алмаза всегда, включая условия искусственного синтеза, происходит по нормальному механизму, а октаэдра – по послойному, вероятно, ошибочно. Следует подчеркнуть, что существование гладких, плоских K-граней на искусственных кристаллах алмаза и, тем более, криволинейных поверхностей на природных алмазах уральского типа не может быть точно объяснено только в рамках равновесной теории Хартмана–Пердока.

Условия природного образования и сохранения алмазов можно считать главным образом квазиравновесными, учитывая: а) длительность геологических процессов, приводящих к образованию алмазов согласно многим литосферным и мантийным моделям; б) древний возраст алмазов; в) «равновесное» состояние многих естественных первичных дефектов в алмазе. Даже обсуждение теории Хартмана–Пердока применительно к форме природных алмазов косвенно свидетельствует о главенствующей точке зрения на квазиравновесное состояние алмаза в минералообразующей среде до начала кимберлитового процесса.

Однако даже квазиравновесность природных условий синтеза и сохранения алмаза в основании литосферы следует принимать с точностью до флуктуаций термодинамических параметров, учет которых помогает существенно скорректировать ряд генетических выводов.

1.4. ФОРМЫ КРИСТАЛЛОВ И ФЛУКТУАЦИИ СВОБОДНОЙ ЭНЕРГИИ

1.4.1. Минералы глубинных пород

Рассмотрим вопрос о сохранении гранной формы глубинных минералов в условиях высоких термодинамических параметров при термодинамическом равновесии.

Многочисленные термодинамические расчеты высокопараметрических минеральных систем, основанные на минимизации свободной энергии, подтверждают по алмазсодержащим ксенолитам из кимберлитов, что в условиях нижних частей литосферы при давлении 30–70 кбар (3–7 ГПа) и температуре 800–1400 °С реализуются равновесные парагенезисы минералов (Соболев, 1974; Маракушев, 1981; Haggerty, 1986; O'Neill, Wall, 1987; Гаранин и др., 1997, 2006; Анфилов, 2004, 2008; Рагозин и др., 2006, 2009;). В этих высокопараметрических системах алмаз как устойчивая модификация углерода является полноправным членом, находящимся также в квазиравновесных условиях со средой кристаллизации – С–О–Н-флюидом, который содержит в различных подвижных формах химические элементы, входящие в порообразующие минералы, часто в соединениях с серой, а также углерод в виде метана и углекислого газа, воду. Состав компонентов флюида и сохранность алмаза во многом определяются режимом летучести кислорода (Кадик, 2006). В квазиравновесной системе небольшие изменения состава флюида чрезвычайно медленно приводят к перераспределению масс зерен минералов.

Хорошо сохранившиеся ксенолиты глубинных пород – эклогиты и перидотиты – демонстрируют округлые зерна основных минералов: диопсида, энстатита, оливина, гранатов, омфацита, пироксенов. Каймы на зернах гранатов, образовавшиеся в результате метаморфических и метасоматических процессов при относительно низких значениях параметров, не меняют исходную неплоскогранную форму зерен (рис. 1.1). Замечено, что в алмазонасных ксенолитах глубинных пород только алмазы сохраняют естественную октаэдрическую огранку, а остальные, даже достаточно крупные монокристалльные зерна минералов, имеют округлую изометричную форму, но не содержат естественных плоских граней. Этот факт не только подтверждает уникальную прочность структуры алмаза, но и позволяет оценить параметры флуктуаций свободной энергии в термодинамической системе.

Известно, что термодинамическое равновесие предполагает достижение минимума потенциала Гиббса, в который составной частью входит поверхностная энергия всех фаз системы. Минимум потенциала Гиббса определяет также минимум поверхностной энергии зерен всех минералов. Согласно принципу Гиббса–Кюри, в состоянии термодинамического равновесия зерна минералов должны ограняться плоскими сетками с минимальной удельной поверхностной энергией. В условиях высокого давления и дефицита свободного пространства принцип Гиббса–Кюри не может реализовываться в полной мере для всех соседствующих кристаллических зерен. Тем не менее поверхность контакта минералов даже при случайной взаимной кристаллографической ориентации должна нести признаки кристаллической упорядоченности, сходные с индукционной поверхностью, образуя-

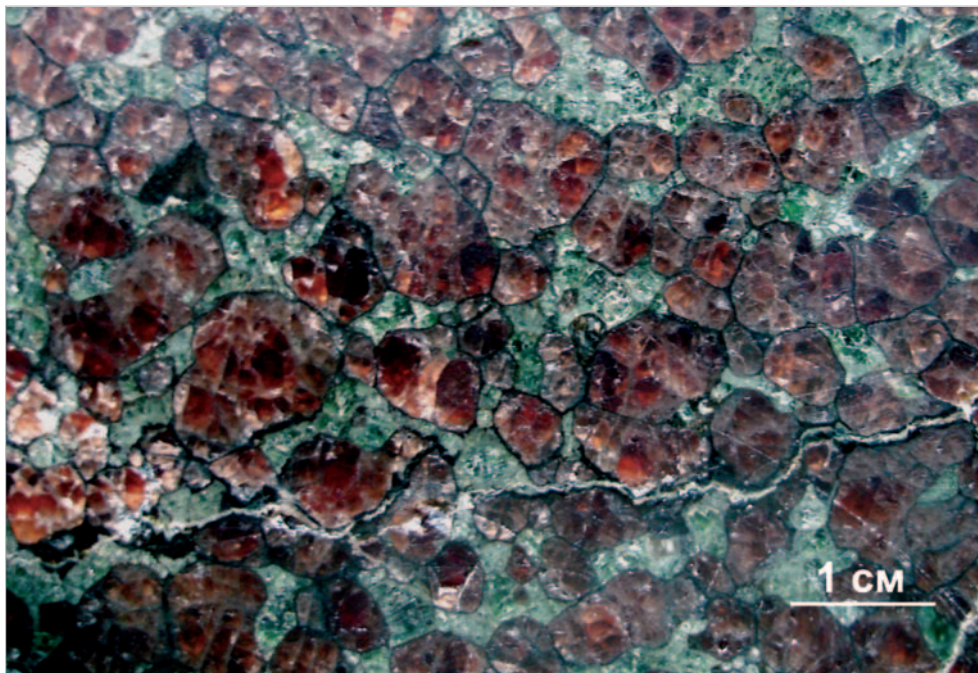


Рис. 1.1. Ксенолит гранат-оливинового эклогита. Фото экспоната из музея кимберлитов г. Мирный сделано автором с разрешения директора музея Д.И. Саврасова

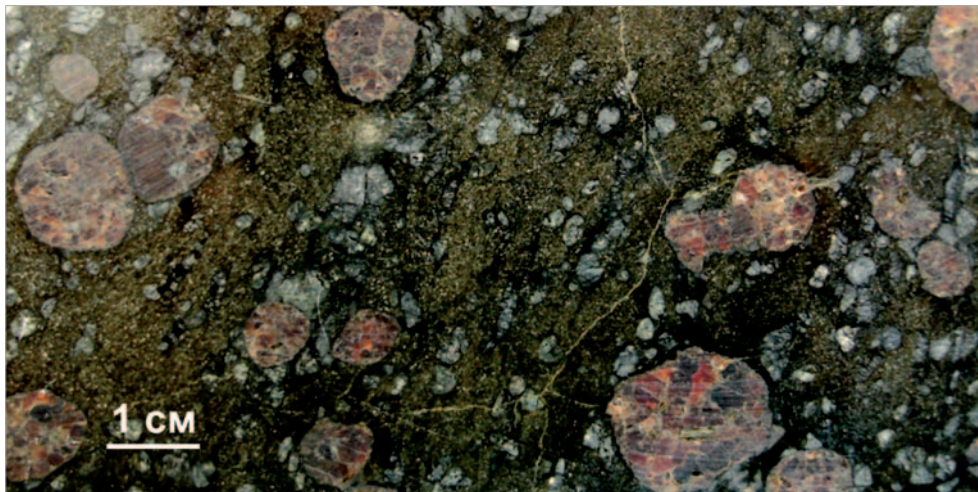


Рис. 1.2. Гранатовый ксенолит из трубки Мир. Музей кимберлитов, г. Мирный

щейся при одновременном росте соседних зерен случайно ориентированных минералов. Однако совместная поверхность минералов в мантийных ксенолитах напоминает структуру мыльной пены, в которой совсем не проявляется кристаллическая природа зерен (см. рис. 1.1).

Описанная ситуация в квазиравновесных условиях возможна только при больших флуктуациях свободной энергии термодинамической системы. Если средняя энергия флуктуаций в локальной области термодинамической системы превышает разность поверхностных энергий ограненного кристалла и кристалла-шара той же массы, то зерно минерала, находясь в термодинамическом равновесии, будет иметь не кристаллографическую, но тем не менее наиболее изометричную форму тела с минимальной поверхностью (рис. 1.2). В этом случае соседствующие кристаллические зерна приобретут форму полиэдров, определяемых структурой мыльной пены, но алмаз сохранит свою кристаллографическую огранку. Среднее число граней структурно независимого полиэдра мыльной пены – ячейки Коксетера – составляет 13,52 (Войтеховский, 2012).

Предположим, что разность поверхностных энергий кристалла-шара и кристалла-полиэдра близка по величине к поверхностной энергии кристалла-полиэдра. Если все зерна породообразующих минералов, кроме алмаза, теряют кристаллографическую огранку, то величина средней флуктуации свободной энергии термодинамической системы превышает поверхностную энергию среднего зерна любого из минералов, слагающего эклогит или перидотит, в расчете на объем зерна. При этом флуктуация, как и прежде, меньше поверхностной энергии единицы объема среднего кристалла алмаза, находящегося в парагенетической ассоциации. Такой критерий позволяет оценить порядок средней флуктуации свободной энергии в равновесной высокопараметрической системе.

По литературным данным, удельная поверхностная энергия высокобарических породообразующих силикатных минералов составляет первые единицы Дж/м². Например, для граней (001) и (010) оливина (минальный состав – Fo₈₈Fa₁₂) она равна соответственно 1,26 и 0,98 Дж/м² (Swain, Atkinson, 1978). Согласно Р. Jandacka с соавторами (2009), экспериментальное значение коэффициента поверхностного натяжения альмандина (в первоисточнике не указан индекс грани) при нормальных условиях составляет 2,48 Дж/м². Можно предположить, что значение удельной поверхностной энергии пироба близко таковой альмандина. Примем, что средний диаметр зерен оливина в ксенолитах составляет около 3, а граната – 5 мм (см. рис. 1.1). Соответственно удельная поверхностная энергия в расчете на 1 см³ объема зерен оливина достигает 2,2·10⁻³, а граната – 3,0·10⁻³ Дж/см³.

1.4.2. Гранулометрия природных алмазов

Гранулометрические характеристики кристаллов алмазов из коренных и россыпных источников изучены достаточно подробно (рис. 1.3). По данным, опубликованным в работе К.П. Аргунова (2001), построены графики встречаемости алмазов в разных типах месторождений Якутии (рис. 1.3, а). Гранулометрические диапазоны сит (–1...+0,5), (–2...+1), (–4...+2), (–8...+4)

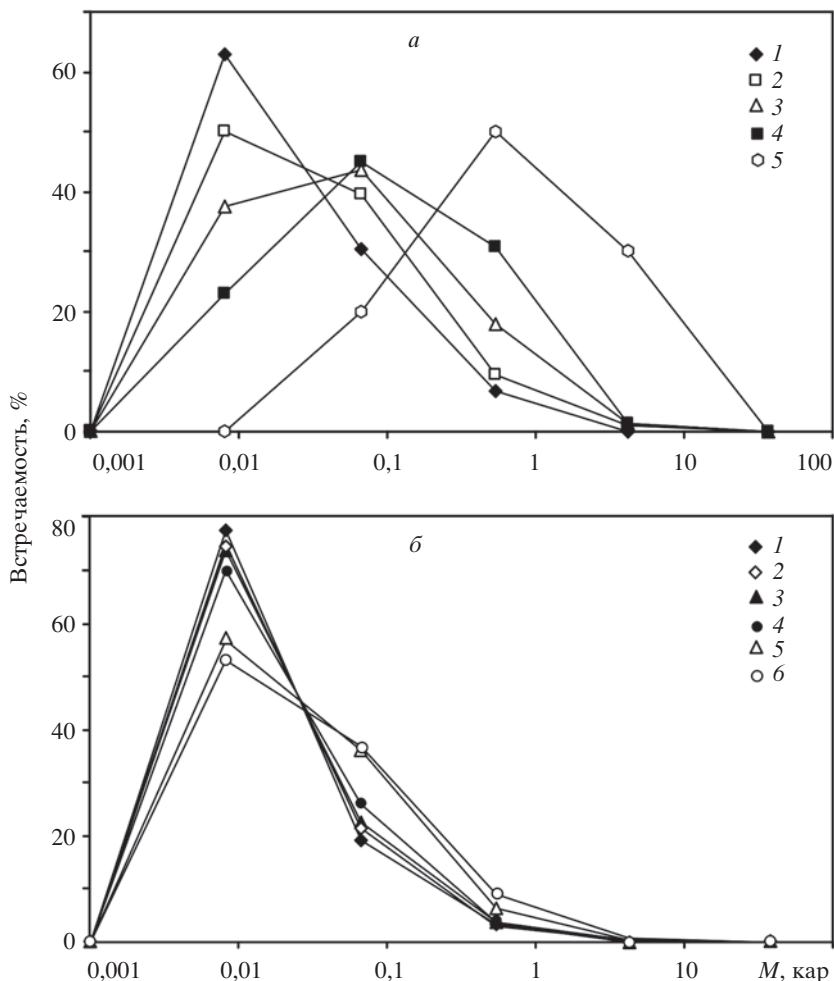


Рис. 1.3. Гранулометрический состав алмазов:

a – якутские алмазы из различных типов месторождений: 1 – бедная трубка, PZ, 2 – богатая трубка, PZ, 3 – континентальные россыпи ближнего сноса, MZ, 4 – континентальные россыпи среднего сноса, PZ, 5 – прибрежно-морские россыпи среднего сноса, MZ (Аргунов, 2001); *б* – алмазы кимберлитовых трубок Архангельской области: 1 – им. Ломоносова, 2 – им. Карпинского-2, 3 – Пионерская, 4 – Архангельская, 5 – им. Карпинского-1, 6 – Поморская (Атлас..., 2002)

соответствуют массам монокристаллов алмазов в каратах 0,008, 0,066, 0,53, 4,2. Наивысшая сохранность алмазов наблюдается в трубках, где средний размер как для бедных, так и для богатых трубок, без учета самых мелких алмазов, приходится на диапазон $(-1...+0,5)$. Для континентальных россыпей средний размер алмаза смещается на диапазон $(-2...+1)$, прибрежно-морских – на $(-4...+2)$. В пределах этих достаточно широких разрядов средняя масса кристалла алмаза тоже сильно варьируется. Например, в классе крупности $(-2...+1)$ богатая трубка Якутии демонстрирует среднюю массу алмаза – 8,6, а бедная – 3,8 мг (Аргунов, 2001). При этом россыпные алма-

зы Урала в том же классе крупности ($-2...+1$) в среднем имеют массу 10 мг. Аналогичные данные по трубочным архангельским алмазам приведены в работе «Атлас типоморфных свойств алмазов Восточно-Европейской платформы (месторождение им. М.В. Ломоносова)» (2002) (рис. 1.3, б) и других работах (Захарченко, 1994; Махин, 1991; Махин и др., 1992). Естественно, масса кристалла зависит от габитуса и облика. Кристаллы, извлеченные из трубок, имеют часто октаэдрический габитус, а из россыпей, особенно дальнего сноса, – в основном додекаэдрический. Последний тип алмаза обладает в среднем большей массой в одном классе крупности с кристаллами октаэдрического габитуса.

В рамках модели логнормального распределения алмазов по размерам нами проанализированы опубликованные данные по различным кимберлитовым трубкам Архангельской области и Якутии. Математические ожидания (МО) и среднеквадратичные отклонения (СКО) соответствуют уравнениям, аппроксимирующим эмпирические данные (табл. 1.2, 1.3). В табл. 1.2 приведены данные выборки по алмазам общей добычи, а в табл. 1.3 представлены данные по алмазам только из материнской породы ксенолитов.

В целом распределение (см. табл. 1.2, 1.3) сходно, но можно заметить, что алмазы, добываемые из зимнебережных месторождений, в среднем крупнее алмазов Якутии. Это можно объяснить тем же эффектом «укрупнения» среднего алмаза, извлекаемого в ходе измельчения кимберлита на обогащательной фабрике, что является аналогом природного формирования россыпи. Вероятно, истинное распределение алмазов по размерам сходно приведенному в табл. 1.3.

Согласно опубликованным данным (Аргунов, 2005), в трубке Мир в классе крупности ($-3,3...+1,6$) октаэдров встречается 85,3%, в классе ($-0,5...+0,2$) – 52,8%, а кристаллов неправильной формы – 26,6%. Повышенное содержание обломков и осколков алмазов в мелких фракциях больше связано с дроблением алмазов в процессе добычи и переработки руды, чем с естественным разрушением кристаллов при выносе их на поверхность. В глубинных ксенолитах мантийных пород из трубок Мир, Удачная и Сытыканская найдены алмазы разного морфологического типа (Аргунов, 2005). В ультраосновных ксенолитах алмазы представлены плоскогранными октаэдрами, а в магнезиально-железистых эклогитах обнаружены кристаллы алмаза всех основных типов: кубы, октаэдры, переходные формы от октаэдра к ромбододекаэдру, ламинарные ромбододекаэдры. При этом в ксенолитах кимберлитов алмазы уральского типа и карбонадо не встречены. В дистеновых эклогитах находят чаще кристаллы кубического габитуса. В одном ксенолите гранат-клинопироксенового парагенезиса из трубки Мир были найдены 96 алмазов преимущественно октаэдрического габитуса массой от 0,3 до 100 мг (размером от 0,6 до 3 мм по ребру). Из них полногранных октаэдров – 46,8, осколков – 47,0, сростков – 3,2 и агрегатов – 1,0%. Отмечено, что в мелких классах крупности (менее 0,5 мм) морфологический спектр алмазов отличается от такового для более крупных классов.

Кимберлитовые трубки краевых частей Сибирской платформы практически не содержат алмазов (Аргунов, 2001). Исключение составляют не-

Таблица 1.2

Распределение алмазов по классам крупности (%) в зимнебережных трубках (по данным «Атласа..., 2002) и параметры аппроксимирующих распределений

Трубка	Кол-во кристаллов	Гранулометрический класс					МО	СКО
		(-16...+8)	(-8...+4)	(-4...+2)	(-2...+1)	(-1...+0,5)	мм	
им. Ломоносова	36 874	<0,1	0,1	3,3	19,2	77,4	1,03	0,27
Поморская	18 548	<0,1	0,7	9,1	37,0	53,2	2,80	1,67
Пионерская	8592	<0,1	<0,1	3,8	22,5	73,7	2,33	1,94
им. Карпинского-1	135 668	<0,1	0,5	6,3	36,3	56,9	2,74	1,64
им. Карпинского-2	50 332	<0,1	0,3	3,1	21,6	75,0	2,48	1,55
Архангельская	3702	<0,1	0,4	3,7	25,9	70,0	2,75	1,81

Таблица 1.3

Распределение алмазов по классу крупности (%) в алмазоносных эклогитах трубок Якутии (по данным К.П. Аргунова (2005)) и их рассчитанные параметры

Трубка	Кол-во кристаллов	Гранулометрический класс				МО	СКО
		(-8...+4)	(-4...+2)	(-2...+1)	(-1...+0,5)	мм	
Мир	2096	1,5	17,5	55,0	26,0	1,77	0,79
Удачная	4000	1,5	11,0	39,5	47,9	1,32	0,53
Сытыканская	1560	0,0	2,8	22,6	74,6	1,03	0,27

сколько трубок Куонамского поля (например трубка Двойная) с низким содержанием алмазов, среди которых преобладают ромбододекаэдры (80%) – округлые с занозисто-сноповидной, блоковой, каплевидной скульптурой с тонкой шагренью и полосами деформации и мелкие, чаще октаэдрические, алмазы (-1...+0,5 мм).

Выше нами были показаны расчеты удельной поверхностной энергии трех граней алмаза: октаэдра, ромбододекаэдра и куба, составляющие соответственно 5,33, 6,53 и 9,23 Дж/м². Добываемые из кимберлитовых трубок октаэдрические кристаллы алмаза с длиной ребра 1 мм и массой 0,01 карат (близкое к среднему значению по алмазоносным эклогитам) будут обладать энергией поверхности $1,8 \cdot 10^{-5}$ Дж, что в пересчете на объем кристалла составит $3,9 \cdot 10^{-2}$ Дж/см³, – это более чем на порядок превышает поверхностную энергию породообразующих минералов в расчете на объем зерна в высокобарных условиях.

С учетом выдвинутой гипотезы можно утверждать, что флуктуации свободной энергии (энергии Гиббса – изобарно-изотермического потенциала) в расчете на единицу объема в равновесной алмазосодержащей системе, нижних частях литосферы, области зарождения очага кимберлитового вулканизма (температура 1300–1400 °С, давление 3,5–10 ГПа) составляют повсеместно 10^{-3} Дж/см³ ($3 \cdot 10^{-3}$ Дж/моль) и редко превышают 10^{-2} Дж/см³ ($3 \cdot 10^{-2}$ Дж/моль). В таких условиях зерна породообразующих минералов – гранатов и оливина – не должны сохранять кристаллографическую гран-

ную форму и должны максимально округляться. Полимнеральная порода приобретает структуру мыльной пены. Но кристаллы алмаза должны в большинстве своем оставаться плоскогранными. Оценка флуктуаций энергии в системе, выполненная нами через поверхностную энергию зерен минералов, позволяет вычислить среднее значение отрицательной флуктуации энтропии в системе: $\Delta S = -\Delta G/T = -2 \cdot 10^{-6}$ Дж/(моль·К) (энергия Гиббса $3 \cdot 10^{-3}$ Дж/моль, температура 1400K).

Воспользуемся данными о распределении давления и температуры по глубине, полученными из различных моделей в основном гравитационной дифференциации Земли (см., например: Stachel et al., 2005). Существование оливина ограничено глубиной 410 км, где он трансформируется в «бета-шпинель» вадслеит (Пушаровский, 1980), а гранаты, в частности мейджорит с кремнием, находящимся в шестерной координации, устойчивы до глубины 700 км. Включения ферропериклаза в некоторых алмазах Гвинеи, существующего при давлении выше 24 ГПа и температуре более 1800 °С (Stachel et al., 2005), свидетельствуют о том, что алмазы могут образовываться и в нижней мантии.

Воспользуемся классической теорией флуктуаций Д.У. Гиббса (Пригожин, Кондепуди, 2002) и применим формулу Эйнштейна для вероятности флуктуаций термодинамических величин в выделенной открытой термодинамической системе:

$$P(\Delta S) = Z \exp(\Delta S/k),$$

где Z – нормировочный коэффициент.

Флуктуация энтропии системы при флуктуации температуры в некоторой части системы составит отрицательную величину:

$$\Delta_i S = -\frac{C_V (\delta T)^2}{2T^2},$$

где C_V – теплоемкость выделенной системы при постоянном объеме. В этих условиях нормировочный коэффициент

$$Z = 1 / \int_0^\infty \exp\left(-\frac{C_V (\delta T)^2}{2kT^2}\right) d(\delta T) = \sqrt{\frac{C_V}{2\pi kT^2}}.$$

Средний квадрат флуктуации температуры в системе рассчитывается по формуле для средневзвешенных значений:

$$\overline{(\delta T)^2} = \int_{-\infty}^{\infty} (\delta T)^2 P(\delta T) d(\delta T) = \frac{kT^2}{C_V}.$$

Таким образом, среднее значение модуля флуктуации температуры в некоторой части системы линейно зависит от абсолютной температуры системы. Средняя величина отрицательной флуктуации энтропии в квазиравновесных условиях не будет зависеть от температуры и составит в расчете на всю выделенную систему величину, равную постоянной Больцмана:

$\Delta S = -k/2$. Однако кроме флуктуации температуры в выделенной части системы могут происходить флуктуации объема и числа молей. Будучи независимой, каждая переменная привносит флуктуацию энтропии $-k/2$. Нам важна зависимость флуктуации свободной энергии от температуры. Для флуктуации энергии Гиббса системы получим выражение

$$\Delta G = -T\Delta S = 3kT/2,$$

которое линейно зависит от температуры. С учетом роста давления и температуры в недрах Земли можно сделать вывод, что флуктуации удельной свободной энергии, повсеместно превышающие 10^{-3} Дж/см³ (флуктуации молярной энтропии $0,5 \cdot 10^{-6}$ Дж/(моль·К)), растут пропорционально температуре и вблизи жидкого ядра (температура около 2500 °С, давление около 135 ГПа) увеличатся только на 80%, что составит $1,8 \cdot 10^{-3}$ Дж/см³. Поэтому зерно алмаза массой более 0,01 кар с поверхностной энергией в пересчете на объем кристалла около $4 \cdot 10^{-2}$ Дж/см³ будет сохранять плоскогранную форму во всем диапазоне условий роста в глубинах Земли от нижней мантии до низов литосферы, а отклонение от плоскогранности будет обусловлено только неравновесными процессами роста и растворения.

Квазиравновесные флуктуации могут играть еще одну, особую, роль в алмазообразующей равновесной системе. Если предположить, что в межзерновом пространстве находится большое количество равновесного углеродсодержащего флюида, то флуктуации энтропии могут приводить к спонтанному зарождению и последующему растворению мелких кристаллов алмазов. Локально высокое содержание углерода в веществе нижней литосферы может наблюдаться, по крайней мере, в зонах субдукции карбонатсодержащей плиты.

Сложно определить средний размер таких «виртуальных» кристаллов, имеющих, вероятнее всего, октаэдрический габитус, но с учетом полученной выше оценки среднего значения флуктуации энтропии размер алмазов должен быть ограничен сверху. За счет отрицательной флуктуации энтропии в первую очередь происходит перераспределение вещества в тесном пространстве в основном конденсированного мантийного вещества, на которое затрачивается большая часть свободной энергии, и только потом возникает зародыш алмазной фазы. Поэтому их размеры должны быть много меньше 0,1 мм. В частности, 100 мкм – это линейный размер октаэдрического алмаза, при образовании которого из условного газообразного углерода в состоянии насыщения энергия Гиббса составляет величину средней флуктуации свободной энергии ($3 \cdot 10^{-3}$ Дж/моль).

С началом кимберлитового процесса в результате быстрой закалки такие микроалмазы могут сохраниться и быть обнаруженными в первую очередь в ксенолитах глубинных пород. Алмазы самых мелких фракций (<0,5 мм) из кимберлитов уже привлекали внимание исследователей и описаны в некоторых публикациях (Варшавский, Буланова, 1974; Жихарева, 1979; Квасница и др., 1980; Зедгенизов и др., 2003; Зинчук, Коптиль, 2003). Однако микроалмазы «флуктуационного» генезиса должны обладать рядом особых свойств. К ним можно отнести однородный изотопный и примесный состав, одинаковый газовый состав включений, соответствующий моменту закал-

ки (началу кимберлитового процесса), простую анатомию и морфологию, не характерную для алмазов крупных фракций.

Однако, если учесть физико-химические процессы в ходе транспортировки глубинного вещества и посткимберлитовые процессы метаморфизма и метасоматоза, вероятность обнаружения таких алмазов в ксенолитах невелика. Таким образом, принимая во внимание термодинамическую теорию флуктуаций, некоторые микроалмазы в ксенолитах мантийных пород нельзя в полной мере считать парагенетичными глубинным минералам. Их следует рассматривать как особую группу алмазов, не связанную с алмазами более крупных размерных фракций.

1.5. МЕТОД ОПИСАНИЯ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ФОРМ АЛМАЗОВ И.И. ШАФРАНОВСКОГО и А.А. КУХАРЕНКО

Проблема описания и происхождения кривогранных кристаллов алмаза уральского (бразильского) типа широко известна в минералогии со времен М. Энгельгардта, Г. Розе, И. Паррота, Н.И. Кокшарова. Первое кристаллографически точное исследование формы округлых кристаллов алмазов уральского (бразильского) типа было сделано А.Е. Ферсманом с применением двукружного гониометра конструкции В. Гольдшмидта. В классической работе А.Е. Ферсмана и В. Гольдшмидта «Der Diamant» (1911 г.) подробно описан характерный треугольный рефлекс на стереографической проекции округлого алмаза, являющийся главным признаком ромбододекаэдронидной формы алмаза (Ферсман, 1955), впервые упомянутый Г. Розе и А. Задебеком в 1877 г. В основу теоретической модели формы округлого алмаза А.Е. Ферсманом положены классические кристаллографические представления о многогранниках. Последующие фундаментальные исследования И.И. Шафрановского (1948) и А.А. Кухаренко (1955) выполнены в духе той же идеи о плоскогранных многогранниках.

В работах И.И. Шафрановского (1940б, 1941, 1948, 1953) и А.А. Кухаренко (1945, 1946, 1954, 1955) неоднократно отмечено поразительное единообразие в геометрии криволинейных поверхностей на алмазах уральского (бразильского) типа. Проведены многочисленные замеры угловых параметров характерного треугольного рефлекса и выполнен поиск часто встречающихся участков поверхности округлых уральских алмазов, которые можно отождествить с теми или иными кристаллографическими гранями алмаза (Шафрановский, 1948; Кухаренко, 1955). Ими отмечено, что поверхность округлого алмаза содержит бесконечный набор плоских сеток, но, учитывая хорошо выраженную треугольную форму светового рефлекса, можно ограничиться угловыми координатами вершин треугольника ABC (рис. 1.4). Все

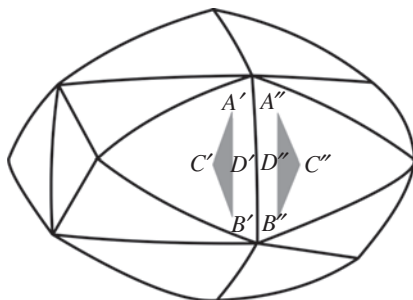


Рис. 1.4. Эскиз додекаэдроидной формы алмаза уральского типа с нанесенными на его грани треугольными рефлексами (Шафрановский, 1953)

теоретически бесконечное множество форм ограничено указанным треугольником. А.А. Кухаренко справедливо полагает, что точка D рефлекса также заслуживает быть отмеченной как некая особая предельная точка линии тетрагексаэдров светового рефлекса. Точка D , по И.И. Шафрановскому, должна лежать строго на линии тетрагексаэдров и поэтому не может быть рассчитана как середина стороны AB , как это часто делает А.А. Кухаренко (1955).

Можно легко вычислить параметры точки D по И.И. Шафрановскому, имея в распоряжении координаты вершин светового треугольника A и B и предполагая, во-первых, что точки A , B и D принадлежат одной зоне, а во-вторых, что точка D лежит на линии тетрагексаэдра. Пусть даны точки A ($h_1 k_1 l_1$) и B ($h_2 k_2 l_2$). Тогда индексы точки D (hkl) можно вычислить по формулам

$$h = 0, \quad k = k_1 \frac{h_2}{h_1} + k_2, \quad l = l_1 \frac{h_2}{h_1} + l_2. \quad (1.2)$$

Стоит заметить, что схема ориентировки световых треугольников на грани додекаэдроида алмаза, встречающаяся в работах И.И. Шафрановского и А.А. Кухаренко (см. рис. 1.4), носит весьма условный характер, поскольку точки A' и A'' рефлексов на кристаллографической проекции, фактически происходят от весьма близко расположенных участков соседних граней алмаза, разделенных гранным швом непосредственно у вершины, соединяющей шесть криволинейных граней (на выходе оси третьего порядка). Точки C' и C'' соответственно ведут происхождение от фрагментов криволинейных граней, расположенных непосредственно около двух вершин четвертого порядка, а точки D' и D'' находятся на гранном шве по разную сторону от него.

1.5.1. Исследования И.И. Шафрановского

В коллекции из 44 уральских кристаллов И.И. Шафрановский (1948) выделил 1 октаэдр, 7 переходных форм от октаэдра к додекаэдроиду «бразильского» типа и 36 округлых ромбододекаэдров «бразильского» типа. Им были измерены предельные угловые характеристики треугольных световых рефлексов от поверхностей кристаллов переходных форм и ромбододекаэдроида «бразильского» типа и сформулирован ряд важных выводов, которые для переходных форм сводятся к следующему.

1. Угловые размеры световых рефлексов как от разных кристаллов, так и от одного кристалла колеблются в значительных пределах.

2. Предел углового размера стороны AB светового рефлекса составляет $70^\circ 32'$, встречается на кристаллах с малым угловым расстоянием $C'C''$, на которых главный рефлекс имеет форму световых дуг. Встречаются кристаллы, у которых расстояние AB невелико и значительно уступает расстоянию $C'C''$.

3. Каких-либо закономерностей в соотношении размеров треугольников не наблюдается.

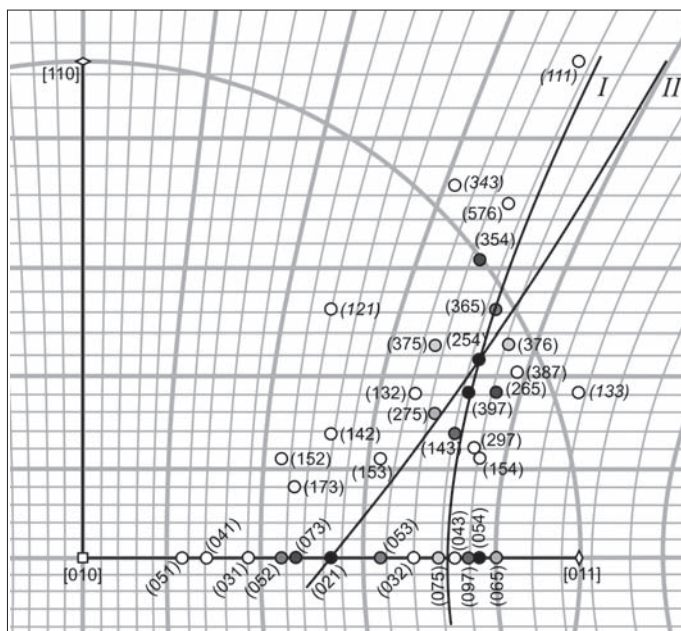


Рис. 1.5. Гномоническая проекция вершин светового треугольника ABC . Фоном служит экваториальная сетка Хилтона. Пояснения см. в тексте

4. Точкам A и B чаще всего отвечает символ $\{452\}$, точке C – $\{120\}$.

И.И. Шафрановский отмечает, что форма кристаллов «бразильского» типа «представляет собой комбинацию множества 48-гранников и пирамидальных кубов. Все эти формы в совокупности почти сливаются вместе, образуя на глаз кривогранную поверхность». Под 48-гранником понимается гексоктаэдр, а под пирамидальным кубом – тетрагексаэдр. Он справедливо замечает также, что «вершины *A* и *B* треугольников, а также их боковые части соответствуют гексоктаэдрам. Высота *CD* состоит из сигналов, отвечающих ряду пирамидальных кубов». Последнее утверждение естественно следует из точечной группы симметрии алмаза $m\bar{3}m$. Однако стоит заметить, что при понижении симметрии кристалла в результате внешнего воздействия поверхность алмаза будет описываться совсем другими простыми формами.

Если даже световой треугольник не является идеальным равнобедренным, точка D , лежащая на прямой, соединяющей точки C' и C'' , по И.И. Шафрановскому, отвечает тетрагексаэдру. А.А. Кухаренко, анализируя данные И.И. Шафрановского и основываясь на своем опыте, замечает, что точкам C , согласно измерениям И.И. Шафрановского, чаще соответствуют плоские сетки гексоктаэдра, чем тетрагексаэдра, точки D часто не соответствуют тетрагексаэдру.

На рис. 1.5 представлена гномоническая проекция рефлексов алмазов «бразильского» типа (первая четверть), построенная по данным И.И. Шафрановского (Кухаренко, 1955), на которой размещены точки *A*, *B*, *C* и *D* треугольного светового рефлекса как предельные плоские сетки алмаза, дающие световые рефлексы. Кристаллографическая установка алмаза

выполнена по четверной оси [010]. Плотность заливки пропорциональна частоте встречаемости данной формы. Множество точек A и B расположено на поле гексоктаэдра, и их кристаллографические индексы записаны по горизонтали. Точки C лежат на линии тетрагексаэдра, и их индексы ориентированы под углом 45° . Точки D также находятся на линии тетрагексаэдра, но их индексы указаны вертикально. Особо следует отметить плоские сетки тетрагонтриоктаэдра $\{121\}$, $\{343\}$, вероятно по ошибке внесенные в список множества точек AB , и тригонтриоктаэдра $\{133\}$, включенного в группу точек C . Эти плоские сетки, выделенные на рис. 1.5 курсивом, действительно часто присутствуют на поверхности алмаза, но они относятся не к обсуждаемому треугольному рефлексу алмазов уральского типа, а к поверхностям, связанным с микрорельефом регенерации (см. главу 2). Октаэдр $\{111\}$ помещен нами на проекцию и также выделен курсивом, поскольку часто упоминается в работах И.И. Шафрановского и А.А. Кухаренко при описании формы алмазов уральского типа и присутствует на них, по нашему мнению, благодаря в основном регенерационным процессам.

Здесь необходимо сделать небольшое отступление и обсудить преимущества используемой нами гномонической кристаллографической проекции. Гномоническая проекция кристалла трансформирует набор $\{\rho, \varphi\}$ его полярного комплекса в множество точек $\{x, y\}$ на плоскости.

Основные преимущества гномонической проекции:

1) удобный в работе параболический гониометр преобразует отраженные от кристалла рефлексы непосредственно в гномоническую проекцию его полярного комплекса;

2) грани одной кристаллографической зоны на проекции выстраиваются строго по прямой линии;

3) для расчета индексов Миллера для плоских сеток и Вейсса для векторов можно использовать правило равных отрезков; например, грани одной зоны (010), (041), (021), (011), располагающиеся на прямой, последовательно отстоят друг от друга через одинаковые отрезки 12,5 мм в согласии с линейно увеличивающимся индексом l ; данное правило является следствием свойств тригонометрической функции тангенса, реализуемой в гномонической проекции и преобразующей угловые величины в линейные отрезки.

К недостаткам проекции относится ограниченность телесного угла рефлексов, которые можно отобразить на листе обычного формата. Для кристалла алмаза симметрии $m\bar{3}m$ это ограничение несущественно, поскольку в небольшой телесный угол $\pi/12$ попадут по одной грани все возможные для алмаза кристаллографические плоские простые формы. На рис. 1.5 телесный угол $\pi/12$ ограничен треугольником с вершинами в точках [010], [011] и (111). Эту область поверхности алмаза обычно называют независимой, или фундаментальной, она размножается операциями симметрии на весь кристалл.

И.И. Шафрановский вывел средние координаты вершин треугольного рефлекса, характерного для алмаза бразильского типа: A , B – $\{254\}$, C – $\{021\}$. Пользуясь формулами (1.2), полученными при наличии двух условий: точки A , B и D принадлежат одной зоне, а точка D лежит на линии тетрагексаэдра, получим сетку $\{054\}$, которая, согласно данным И.И. Шафранов-

ского, действительно встречается наиболее часто – на 11 из 44 кристаллов. Однако И.И. Шафрановский за среднее значение точки D принял плоскую сетку $\{097\}$, замеченную только на пяти кристаллах. Вероятно, данный вывод сделан под влиянием второго главного результата И.И. Шафрановского полученного при исследовании округлых алмазов. Им обнаружено, что контуры треугольного рефлекса алмаза бразильского типа совпадают с дугами, которые соответствуют поверхностям геометрически правильных конусов (круговых конусов вращения) (Шафрановский, 1948, 1953, 1996). На поверхностях додекаэдроида выделены 14 конусов двух типов, у конусов первого типа оси совпадают с четверными осями кристалла алмаза (шесть конусов), второго типа – с тройными осями (восемь конусов).

Заметим, что круговой конус – это поверхность, касательная к сфере по линии параллели. Следовательно, на гномонической проекции в стандартной установке дугообразный рефлекс от поверхности конуса первого типа, по И.И. Шафрановскому, следовал бы точно по любой из параллелей сетки Хилтона (рис. 1.6, *a*). Расчеты показывают, что, согласно утверждению И.И. Шафрановского, угол между образующей и осью кругового конуса первого типа (четверная ось) должен превышать $35^{\circ}16'$. Поэтому на гномонической проекции кристалла алмаза в стандартной установке рефлекс от поверхности конуса выглядел бы как линия с большей кривизной, чем кривизна параллели $35^{\circ}16'$, на которой располагаются рефлексы граней (111) и $(\bar{1}\bar{1}1)$ кристалла алмаза (см. рис. 1.5; рис. 1.6, *a*). Например, если линия конуса проходила бы через усредненные точки A и B (плоские сетки алмаза $\{254\}$), а ось конуса совпадала с осью четвертого порядка, то угол ее образующей составил бы $36^{\circ}20'$, и точка D , лежащая, по И.И. Шафрановскому, на линии конуса, имела бы индекс, близкий к плоской сетке $\{043\}$ (см. рис. 1.5). Такая точка отмечена на трех кристаллах из изученной им коллекции, однако для этих алмазов с точкой D , определенной как $\{043\}$, точки A и B имеют другие индексы, а не $\{254\}$.

Рефлекс от конуса второго типа также должен укладываться на параллель сетки Хилтона только в нестандартной установке кристалла алмаза по оси третьего порядка. Расчеты, выполненные нами согласно гипотезе И.И. Шафрановского, показывают, что угол образующей конуса второго типа относительно тройной оси должен составлять строго меньше $19^{\circ}28'$. Этот предельный угол рассчитывается при условии, что в поверхность конуса будет входить плоская сетка октаэдра $\{111\}$. Учитывая среднее значение точки C – $\{210\}$, лежащей на поверхности конуса, по И.И. Шафрановскому, угол его образующей относительно тройной оси должен составлять $14^{\circ}58'$. Линия поверхности конуса на гномонической проекции в стандартной кристаллографической установке кристалла алмаза описывается особыми уравнениями гномонической проекции (см. формулы (2.2)) с постоянными $\alpha = 35^{\circ}16'$, $\rho = 14^{\circ}58'$ и переменной φ . Угол между плоскостями граней куба и октаэдра алмаза составляет $35^{\circ}16'$. Настраиваемая координатная сетка для гномонической проекции (рис. 1.6, *b*), построенная по формулам (2.2) с постоянной $\alpha = 35^{\circ}16'$ и названная нами «алмазной», позволяет производить сходные с осуществляемыми по сетке Хилтона операциями, но она демонстрирует непосредственно конусы

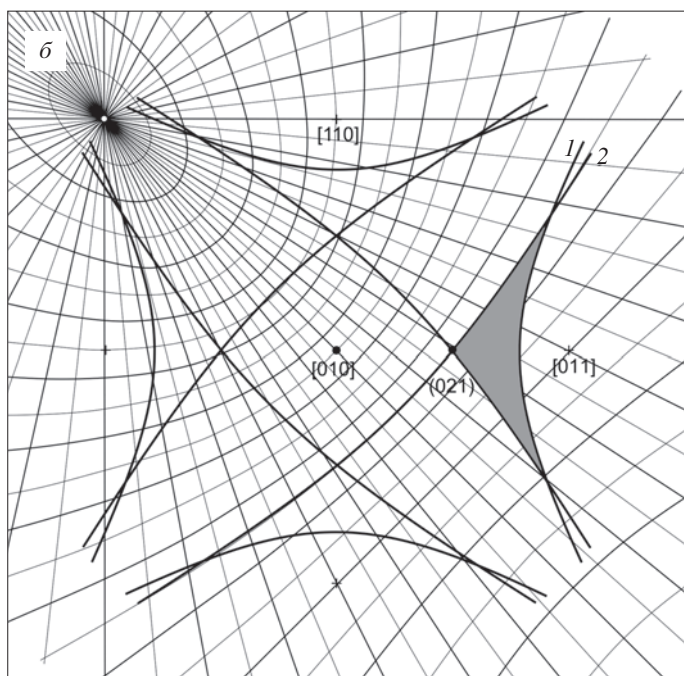
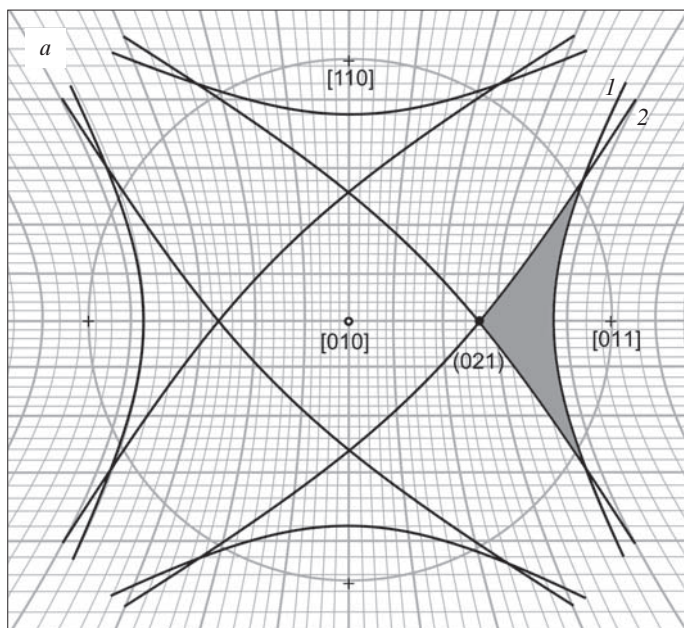


Рис. 1.6. Гномоническая проекция конусов И.И. Шафрановского на кристалле алмаза. Фоном служат сетка Хилтона (а) и «алмазная» гномоническая градусная сетка (б); 1 и 2 – конусы И.И. Шафрановского

второго типа по И.И. Шафрановскому. В данном случае широтный угол отсчитывается от экватора в направлении оси третьего порядка в отличие от сетки Хилтона, для которой широта определяется в направлении четверной оси, например [001] (см. рис. 1.6, а).

Интересно отметить, что в стандартной кристаллографической установке дуга конуса второго типа, проходящая через рефлекс от плоской сетки (210) на гномонической проекции, проходит точно через {254} – среднюю точку *A* и *B* треугольного рефлекса алмаза (см. рис. 1.5). Таким образом, противолежащие стороны соседних треугольных рефлексов эллипсоида (см. рис. 1.6) действительно можно приближенно аппроксимировать такой дугой. Этот результат тем более поразителен, что кристаллофизическая причина обнаруженного И.И. Шафрановским явления, по нашему мнению, не допускает сохранения в течение достаточно долгого времени конических поверхностей на кристалле (см. главу 3).

Следует обратить внимание на то, что одна линия конуса, проходящая по сторонам двух соседних треугольных рефлексов на стереографической проекции, испытывает разрыв на $36^{\circ}52'$ и не соответствует единой гладкой поверхности на кристалле-додекаэдроме. Поэтому, переходя от кристаллографической проекции к реальному кристаллу, можно убедиться, что на кристалле алмаза каждый из восьми конусов второго типа должен выражаться не одним, а шестью параллельно ориентированными конусами, располагающимися симметрично вокруг тройной оси на расстоянии $\frac{d}{2}\sin 18^{\circ}26'$,

где *d* – диаметр кристалла, и описывающими по одному фрагменту узкой криволинейной поверхности вдоль криволинейных ребер на кристалле. Точно так же каждый из шести конусов первого типа на кристалле алмаза должен представлять собой не один, а четыре параллельно ориентированных конуса, каждый из которых представляет по одной узкой полосе поверхности на кристалле вблизи гранного шва.

Таким образом, можно выделить несколько причин, позволяющих отказаться от конусов И.И. Шафрановского как особого представления формы алмаза уральского типа.

1. Как было показано, конусом первого типа невозможно строго ограничить треугольный рефлекс с теми средними значениями точек, на которые, согласно статистическим оценкам, указывает И.И. Шафрановский. При такой аппроксимации сторона основания равнобедренного треугольника должна быть неестественно изогнута и не похожа на отрезок прямой, который наблюдается в гномонической проекции на практике и соответствует статистическим данным, полученным самим И.И. Шафрановским.

2. В действительности, согласно гипотезе И.И. Шафрановского, приреберные участки криволинейной поверхности изометричного додекаэдра алмаза уральского типа должны описываться не 14, а 72 физическими различными конусами.

3. Основная криволинейная поверхность алмаза, за исключением приреберных областей, остается математически не определенной и не связанной с конусами точно так же, как конусы первого и второго типа оказываются никак не связанными друг с другом.

4. Данный подход не применим для поверхностей других типов, наблюдаемых на кристаллах алмаза. В частности, наблюдаемые на алмазе рефлексы тетрагон- и тригон-триоктаэдров, а также рефлексы травления не вписываются в данную схему.

1.5.2. Исследования А.А. Кухаренко

А.А. Кухаренко в монографии «Алмазы Урала» (1955) приводит описание семи плоскогранных кристаллов уральских алмазов и устанавливает на них 57 простых форм (плоских сеток). Им отмечены плоские сетки, лежащие в области гексоктаэдра, на линиях тетрагексаэдра, тригонтриоктаэдра и тетрагонтриоктаэдра (рис. 1.7). Поскольку рефлексы от плоскогранных кристаллов не укладываются в схему обсуждаемого треугольника ABC алмаза уральского (бразильского) типа, то А.А. Кухаренко ограничивается простым перечислением отражающих плоских сеток.

Для плоскогранных кристаллов он отмечает большую значимость зоны $\langle 110 \rangle$, называя ее главной структурной зоной алмаза. К этой зоне относятся все найденные простые формы тригонтриоктаэдра и тетрагонтриоктаэдра, а также октаэдр, ромбододекаэдр и куб (гексаэдр). Необходимо заметить, что существуют другие столь же важные для алмаза структурные зоны, например зона $\langle 100 \rangle$, включающая формы тетрагексаэдра, ромбододекаэдра, куба и др. ($\langle 11\bar{2} \rangle$, $\langle 12\bar{3} \rangle$, $\langle 23\bar{5} \rangle$, $\langle 13\bar{4} \rangle$). Согласно данным, приведенным А.А. Кухаренко в своей работе, и нашим наблюдениям, все перечисленные структурные зоны проявляются на алмазе. Если ряд плоских сеток структурной зоны $\langle 110 \rangle$ встречается чаще на формах регенерации после небольшой (начальной) стадии растворения октаэдра, то сетки других

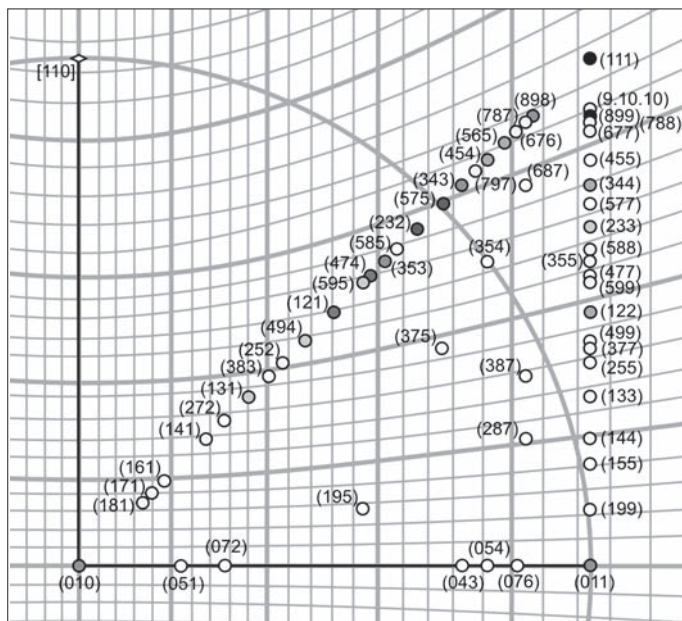


Рис. 1.7. Кристаллографическая проекция простых форм, установленных А.А. Кухаренко на плоскогранных кристаллах алмаза.

Цветовая насыщенность фигуративной точки пропорциональна частоте встречаемости

перечисленных и неупомянутых структурных зон представлены на хорошо развитой поверхности кристаллов-додекаэдров уральского типа как фрагменты естественной формы растворения. Грани зоны $\langle 110 \rangle$ чаще декорируют поверхность кристалла алмаза, претерпевшего неоднократную смену роста и растворения, они обладают наибольшей относительной площадью, и рефлекс от них наиболее яркие. По описанию кристаллов все исследованные А.А. Кухаренко плоскогранные алмазы имеют подобный сложный генезис, и по этой причине, конечно, есть основание говорить об исключительной роли данной структурной зоны. Вместе с тем А.А. Кухаренко приводит данные о встречаемости плоских сеток и замечает, что они имеют тяготение к октаэдру $\{111\}$ и делятся на группы. Он указывает, что одни (большинство) мало отличаются по углу от грани октаэдра, другие отклоняются от положения октаэдра на большие углы и группируются вблизи $\{121\}$, $\{133\}$, $\{122\}$ (Кухаренко, 1955). С этим можно согласиться, если учесть только угловые характеристики граней. Однако мы можем убедиться в том, что на гномонической кристаллографической проекции, где отмечается не сам угол, а его тангенс, все отмеченные формы структурной зоны $\langle 110 \rangle$ достаточно равномерно, с близкими частотами встречаемости, покрывают линии тетрагон- и тригонтриоктаэдра, не приближаясь непосредственно к главным сеткам куба $\{100\}$, октаэдра $\{111\}$ и ромбододекаэдра $\{110\}$ (см. рис. 1.7). Такое поведение больше напоминает распад несингулярной цилиндрической поверхности зоны $\langle 110 \rangle$ на эшелон граней с малыми индексами Миллера при переходе от растворения к росту или равновесию. Наличие такой цилиндрической поверхности, обусловленной начальным этапом растворения октаэдра алмаза, подтверждается нашими наблюдениями (см. главу 3).

Кривогранные кристаллы А.А. Кухаренко разделяет на два основных типа, отличающихся характером выпуклости граней, – октаэдроид и додекаэдроид. Если искривление округлой поверхности в точке выхода двойной оси больше проявляется в направлении оси третьего порядка, такой кристалл, по предложению А.А. Кухаренко, следует относить к октаэдроиду, если в направлении оси четвертого порядка – к додекаэдроиду. Этот простой критерий на практике тем не менее сложно применить, поскольку кривизну поверхности трудно оценить количественно.

Стоит заметить, что кривизна поверхности в точке определяется в геометрии как величина, обратная радиусу кривизны линии, образованной нормальным сечением поверхности плоскостью. От ориентации секущей плоскости зависят направление линии и соответственно кривизна. Замеры радиусов кривизны производятся непосредственно на самой поверхности (кристалла), но этого нельзя сделать по кристаллографическим проекциям. В каждой точке сложной поверхности можно выделить множество значений радиусов кривизны, но обычно используют два значения по двум взаимно ортогональным сечениям поверхности. Если анализировать обсуждаемый треугольный рефлекс на кристаллографической проекции от элементарной поверхности додекаэдроид кристалла алмаза уральского (бразильского) типа, то по отношению длин отрезков AB и CD (или углов между точками) можно весьма приближенно судить об отношениях средних величин

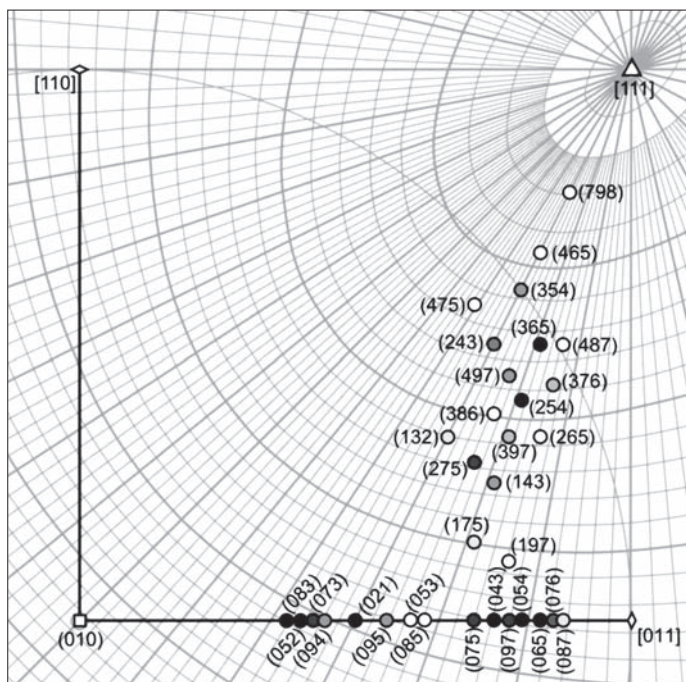


Рис. 1.8. Распределение форм, отвечающих точкам A , B (горизонтально ориентированная подпись), C (подпись по углом 45°) и D (вертикальная подпись) треугольного рефлекса округлого алмаза по данным А.А. Кухаренко (1955). Фон – «алмазная» гномоническая координатная сетка

кривизны поверхности в направлении тройной оси (линия AB) и четверной оси (CD). Неточность оценки связана в первую очередь с неизвестной (произвольной) протяженностью реальной грани, отображаемой в рефлексе, в указанных направлениях.

Анализируя морфологию семи отобранных округлых кристаллов, А.А. Кухаренко выделяет 18 плоских сеток, ограничивающих треугольный рефлекс, – точки A , B , 11 сеток, соответствующих точке C , и 7 – соответствующих точке D (рис. 1.8). Из всех выделенных А.А. Кухаренко точек C на рис. 1.8 нами нанесены только те сетки, которые соответствуют тетрагексаэдрам, а три сетки гексоктаэдра $\{164\}$, $\{175\}$, $\{194\}$ не показаны.

Возвращаясь к перечислению структурных зон, имеющих, по мнению А.А. Кухаренко, большое значение для формы алмаза, на рис. 1.8 на фоне «алмазной» координатной гномонической сетки видно, что положения указанных точек A и C или A и D подчиняются некоторым закономерностям.

Во-первых, плоские сетки принадлежат нескольким зонам, среди которых выделяются $[11\bar{2}]$, $[12\bar{3}]$, $[23\bar{5}]$ и $[13\bar{4}]$. И, учитывая непрерывность рефлекса в пределах треугольника от точки A до C , от A до D и от C до D , можно говорить о реальном существовании таких структурных зон, имеющих определенное значение в морфологии алмаза.

Во-вторых, кроме них можно построить и множество других зон, плоские сетки которых будут локализоваться в обсуждаемом треугольнике (рис. 1.9). Приведенные выше в качестве примера четыре структурные зоны выделяются только потому, что имеют наименьшие индексы Вейсса и обладают наибольшей протяженностью линии в пределах треугольного рефлекса.

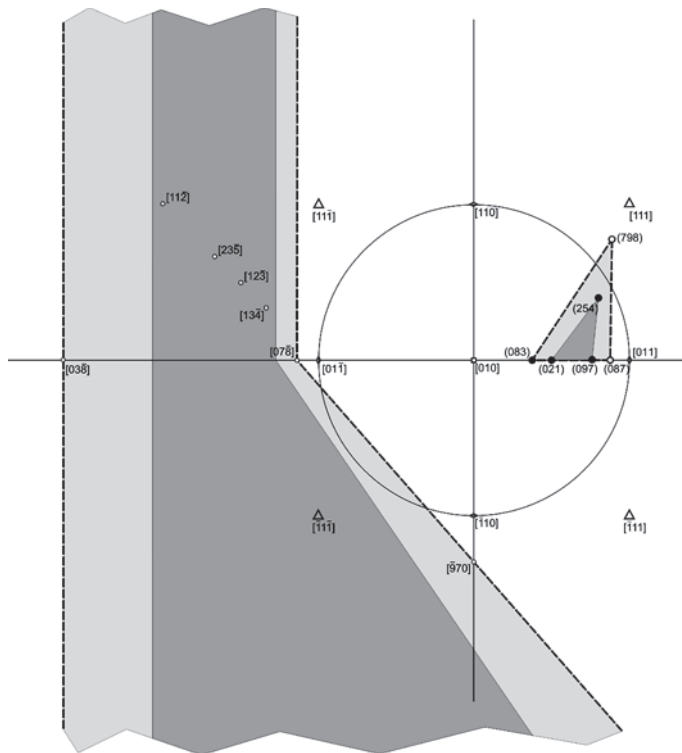


Рис. 1.9. Поле структурных зон, соответствующих поверхности рефлекса ACD округлого алмаза. Темный цвет соответствует додекаэдру, светлый – октаэдру

Таким образом, очевидно, что для округлой поверхности додекаэдроида можно выделить целое поле структурных зон, ограниченное поверхностью, приведенной в левой части рис. 1.9, в которой можно найти серию зон с малыми индексами Вейсса.

Обобщая данные И.И. Шафрановского и собственные результаты, А.А. Кухаренко построил идеализированную модель округлого кристалла алмаза додекаэдрического габитуса с точками треугольного рефлекса: $A, B - \{254\}$, $C - \{021\}$, $D - \{097\}$. Двугранный угол при гранном шве в центральной части, в области точек D составляет $14^\circ 15'$, а у вершин $A - 12^\circ 06'$. А.А. Кухаренко отмечает, что именно такие кристаллы составляют большую часть (более 83%) уральских алмазов. По предложению А.А. Кухаренко, их следует называть алмазами уральского типа, для них угловые размеры $AB \leq CC$.

Округлые кристаллы октаэдрического облика А.А. Кухаренко описывает с помощью следующих точек треугольного рефлекса: $A, B - \{798\}$, $C - \{083\}$, $D - \{087\}$ (см. рис. 1.8, 1.9). Угол при гранном шве в окрестности точки D составляет $7^\circ 38'$, у вершин $A - 5^\circ 50'$, угловые размеры рефлекса $AB < CC$. Таким образом, выпуклость криволинейной поверхности октаэдроида значительно превосходит кривизну элементарной грани алмаза уральского типа.

1.5.3. Поправки Ю.Л. Орлова

Ю.Л. Орлов (1963, 1973) со ссылкой на И.И. Шафрановского выделяет три типа округлых алмазов, справедливо замечая, что ошибки измерения углов в $2-3^\circ$ являются обычными для округлых кристаллов. К додекаэдроиду он относит такие алмазы, которые демонстрируют следующие характеристики световых треугольников: $\angle AB = 36^\circ$, $\angle DC = 13^\circ$, $\angle D'D'' = 14^\circ$, $\angle C'C'' = 40^\circ$. Указанным углам соответствуют вершины треугольника с координатами $A, B - \{397\}$, $C - \{021\}$, $D - \{097\}$. Октаэдроиду свойственны следующие характеристики: $\angle AB = 63^\circ$, $\angle DC = 20^\circ$, $\angle D'D'' = 6^\circ$, $\angle C'C'' = 48^\circ$, позиции вершин треугольника: $A, B - \{6.10.9\}$, $C - \{052\}$, $D - \{0.10.9\}$. Кубоидами (гексаэдроидными) Ю.Л. Орлов предложил считать такие алмазы, для которых $\angle AB = 25^\circ$, $\angle C'C'' = 61^\circ$. Кроме перечисленных предельных типов кристаллов, конечно, встречаются кристаллы и переходных форм.

Таким образом, по результатам исследований предшественников округлые кристаллы демонстрируют широкую вариацию форм, совершенно не характерную для ограниченного числа полиэдров в классической кристаллографии. Однако сделанные ими попытки классифицировать округлые алмазы по предельным угловым характеристикам поверхностей можно признать не особо успешными, поскольку даже в отношении пограничных значений параметров не имеется единого мнения. Дополнительные сложности связаны с большим разнообразием микрорельефа поверхности, что сильно затрудняет определение типа кристалла.

В минералогии алмаза сложились традиции описания округлой формы кристалла алмаза, основанные на его визуально-морфологическом анализе. Печально признавать, что после И.И. Шафрановского, А.А. Кухаренко и Ю.Л. Орлова главным методом в описании формы кристаллов и создании классификации стал «физиографический» (визуально-морфологический). Точные гониометрические измерения в последнее время не выполняются. В последние десятилетия гониометрия как метод исследования округлых алмазов уступила свои позиции бурно развивающимся современным методам спектроскопии и рентгеновской дифракции. Главным и единственным предметом исследования стало вещество алмаза, но не его поверхность. Однако ни у кого не вызывает сомнений, что история кристалла алмаза, по крайней мере последних этапов его развития, во взаимодействии с химически и физически активной средой записана в его морфологии, поэтому инструментальное изучение поверхности кристалла остается актуальной задачей минералогии и кристаллографии.

Поверхность реального кристалла всегда сложна: она образована ямками, бороздами и бугорками разных видов и разного масштаба, фрагментами гладких и шероховатых выпуклых поверхностей. Тем не менее полярный комплекс нормалей к естественным поверхностям кристалла, отображенный с помощью любой кристаллографической проекции, может выглядеть очень просто. Именно полярный комплекс кристалла позволяет наиболее точно охарактеризовать кристаллографическую сущность формы кристалла, отражающей взаимодействие кристалла со средой. Поэтому в основу наших кристалломорфологических исследований положен анализ полярного комплекса кристалла в макроскопическом масштабе. Тонкие анатомические различия поверхностей, размеры кристалла и его облик, безусловно, имеют также важное значение, но их роль второстепенна, и они только дополняют данные о полярном комплексе кристалла. Об этом же говорит А.Е. Ферсман (1955): *«Подчеркнем еще раз, что картина световых рефлексов для целого кристалла является обобщенной картиной, складывающейся из отдельных рефлексов, получаемых от различных участков кристаллической поверхности. Местами такие рефлексы налагаются друг на друга. Подобные перекрытия могли бы запутать картину, если бы природе кристалла (чудесным образом) не было присуще особое свойство, обуславливающее объединение всех рефлексов в одну органически связанную общую картину, характерную для кристаллов данного рода. Таким образом, рефлексy не только не мешают друг другу, а дополняют и обобщают картину».*

Разделим морфологические характеристики кристалла на *физиографические*, основанные на визуально-морфологическом анализе поверхностей, и *полярные*, базирующиеся на инструментальном (гониометрическом) изучении комплекса нормалей к поверхности кристалла в системе координат, связанной со структурой кристалла. Эти два типа характеристик практически независимые: по комплексу одних признаков нельзя достоверно установить другие. С точки зрения кристаллографии, важнейшее значение имеют полярные морфологические характеристики кристалла. По ним можно осуществить кристаллографически обоснованную классификацию всех форм кристаллов, выделить степень и последовательность воздействия различных факторов на форму кристалла.

2.1. МЕТОД ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ ГОНИОМЕТРИИ

2.1.1. Параболический гониометр

Зеркало параболического гониометра преобразует световые рефлексy от поверхности кристалла в гномоническую проекцию его полярного комплекса. Докажем это.

Возьмем плоскость β и точку F , находящуюся на расстоянии $AF = R$ от нее (рис. 2.1). Геометрическое место точек, равноудаленных от данной точки F и плоскости β , будет поверхностью параболоида γ . Пусть луч света направляется по оси параболоида AF и падает на грань кристалла, расположенную в фокусе F параболоида. Отраженный от грани кристалла луч под углом α падает на поверхность параболоида в точку C , затем, вторично отражаясь от зеркала, идет параллельно оси AF и падает в точку D на экран δ . Точка B – проекция точек C и D на плоскость β . Построим отрезок BF . Треугольник BCF по определению параболоида будет равнобедренным, угол CBF равен углу CFB . Накрест лежащие углы CBF и AFB равны, поэтому BF будет биссектрисой угла α и одновременно нормалью к грани кристалла. По этой причине точка B будет являться гномонической проекцией грани кристалла на плоскости β . Радиус сферы такой гномонической проекции равен R – удвоенному фокусному расстоянию параболоида. Таким образом, при совмещении плоскостей β и δ точка D светового рефлекса совпадет с точкой B гномонической кристаллографической проекции грани кристалла. Доказательство завершено.

Исследования алмазов Бразилии, Якутии, Урала и Тимана были проведены нами на параболическом гониометре, сконструированном и созданном на основе теоретических разработок А.И. Глазова (1981), а также согласно его устным рекомендациям и советам. Изготовленное из латуни зеркало диаметром 150 мм имеет форму параболоида вращения с радиусом $R = 50$ мм (фокусное расстояние 25 мм). Зеркало позволяет охватывать телесный угол с разверткой нормалей до $56,3^\circ$ вокруг оси прибора. Кристалл закрепляется на острие специального юстируемого кристаллодержателя и размещается в фокусе параболоида (рис. 2.2). Экран или фотокассета размещается непосредственно на зеркале, а штوك кристаллодержателя с исследуемым кристаллом вводится в отверстие в экране. Световой луч лазера проходит в прибор через отверстие с тыльной стороны зеркала и направляется строго по оси симметрии гониометра. Механическая система юстировки кристалла, размещенного в фокусе параболоида, позволяет *in situ* вращать кристалл вокруг трех взаимно перпендикулярных осей и ориентировать его необходимым образом с точностью $\pm 1^\circ$, руководствуясь изображениями рефлексов на экране.

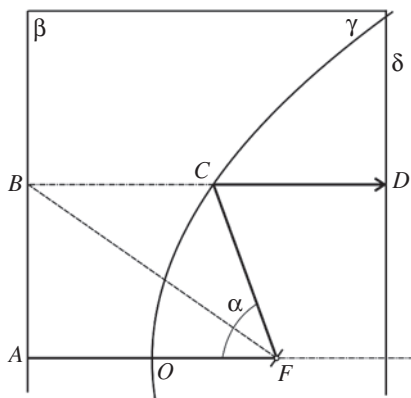


Рис. 2.1. Осевое сечение параболоида. Ход лучей

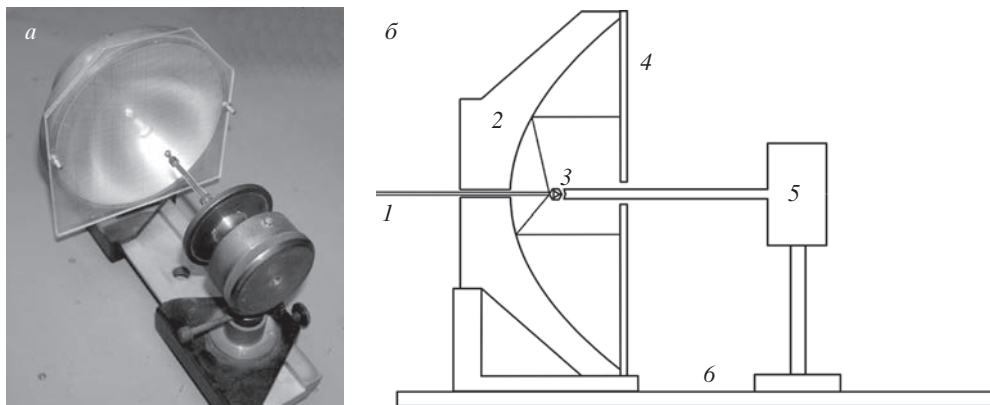


Рис. 2.2. Параболический гониометр:

a – внешний вид; *б* – принципиальная схема (*1* – входящий луч от источника света (не показан), *2* – параболоид, *3* – кристалл, *4* – экран, *5* – кристаллодержатель, *6* – оптическая скамья)

Стандартная кристаллографическая установка кубического кристалла алмаза предполагает ориентировать его одной из трех четверных осей по направлению светового луча – оси прибора. Юстировка кристалла производится довольно быстро и занимает обычно не более 1 мин. Точность измерения углов между рефlekсами в параболическом гониометре зависит от многих причин:

- 1) качества изготовления зеркального параболоида вращения;
- 2) точности настройки прибора – совпадения осей светового луча и зеркала;
- 3) положения кристалла относительно фокуса зеркала;
- 4) размеров кристалла;
- 5) метода измерения координат светового рефlekса.

Настройку прибора можно осуществить с помощью двух вспомогательных поворотных зеркал, установленных по Z-образной оптической схеме и позволяющих достаточно надежно совместить лазерный луч с осью прибора. После этого производится настройка кристаллодержателя на оптической скамье прибора, которая ориентируется параллельно оптической оси. Кристалл закрепляется на площадке кристаллодержателя с помощью инертной полимерной мастики. Точность позиционирования кристалла в фокусе прибора можно оценить, используя вместо кристалла небольшое тело с зеркальной цилиндрической поверхностью (обломок швейной иглы). Рефлекс от цилиндра, размещенного в фокусе зеркала, при любой его ориентации после отражения от параболической поверхности зеркала должен представлять собой на экране строгую прямую линию. Таким же способом можно не только найти фокальную точку, но и оценить качество изготовления самого зеркала. Размеры кристалла определяют положение отражающей поверхности в пространстве и величину отклонения от фокуса зеркала. При исследовании кристаллов размером до 2 мм отклонение рефlekса на экране от его истинного положения (систематическая погрешность в направлении от центра проекции) не превышает 0,5 мм, что гораздо меньше стандартного разрешения 1° любой из используемых нами градусных сеток.

2.1.2. Градусные сетки и измерения на гониометре

Измерение угловых координат светового рефлекса можно производить как непосредственно по формулам гномонической проекции:

$$X = R \operatorname{tg} \varphi, \quad Y = \sqrt{X^2 + R^2} \operatorname{tg} \rho, \quad (2.1)$$

например выполнив преобразование уравнений (2.1) относительно углов, так и пользуясь координатной сеткой Хилтона, весьма удобной на практике. Гномоническая сетка Хилтона относится к сеткам экваториального типа и представляет собой световые проекции меридианов и параллелей глобуса, горизонтально лежащего на плоскости, если источник света размещен в центре сферы. Линии сетки рассчитываются также по формулам (2.1), где R – радиус сферы. Широта определяется углом ρ , долгота – φ . Любой луч, начинающийся в центре сферы и пронизывающий ее поверхность в точке с координатами (ρ, φ) , пересекает плоскость гномонической проекции в точке с линейными координатами (X, Y) . Экватор проектируется в горизонтальную прямую линию, проходящую через центр сетки (рис. 2.3). Дуги всех больших кругов – экватор и меридианы – на гномонической проекции всегда представлены прямыми линиями.

На практике удобно использовать сетку Хилтона, начерченную на листе бумаги со стандартным радиусом $R = 5$ см (назовем его радиусом большого круга). А.И. Глазовым в работе «Методы морфометрии кристаллов»

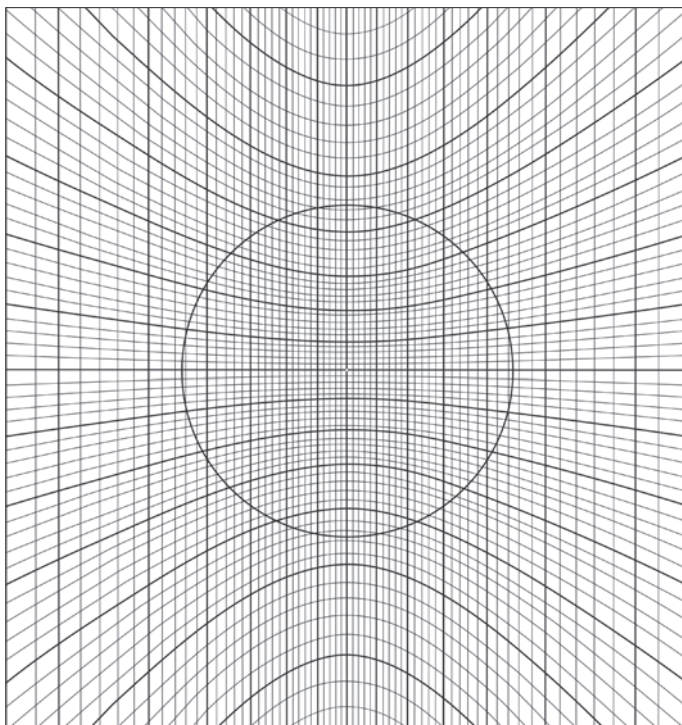


Рис. 2.3. Экваториальная сетка Хилтона

(1981) достаточно подробно изложены приемы работы с сеткой Хилтона. С учетом принятого стандартного радиуса сферы, равного 5 см, линейное расстояние между проекциями точек [010] и [011] на стандартной гномограмме алмаза (см. рис. 2.3) составляет также 5 см.

Сетка на рис. 2.3 имеет наиболее удобную в морфологических исследованиях цену деления 2° (точность измерения угла 1°). Пользуясь формулами (2.1), можно изготовить сетку с нужной ценой деления.

На рис. 2.4, а приведена градусная азимутальная сетка, аналогичная сетке Хилтона, образующаяся при повороте полярной оси сферы (рис. 2.4, б) в плоскости нулевого меридиана на произвольный широтный угол α относительно плоскости проекции (Ракин, 2011). Необходимость в такой сетке часто возникает при нестандартной ориентации кристалла в параболическом гониометре, а также при поиске двойников кристаллов или получении особых проекций криволинейных поверхностей, например, для построения дуги конуса второго типа по И.И. Шафрановскому (см. п. 1.5).

Расчет заданной координатной сетки в гномонической проекции с широтным углом α можно произвести по формулам, полученным при решении соответствующей стереографической задачи:

$$X = R \sin \varphi / (\cos \alpha \cos \varphi - \sin \alpha \operatorname{tg} \rho), \quad Y = (X / \sin \alpha - R) / \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.2)$$

где R – радиус сферы проекции, φ и ρ – сферические координаты луча, идущего из центра сферы на плоскость гномонической проекции (см. рис. 2.4, б).

Точность измерения углов рефлекса от плоской грани с помощью метода фотографической регистрации гномограмм составляет менее 1° , но если даже погрешность немного превысит 1° , то это не помешает практически определению индексов Миллера грани. При непосредственном измерении углов на специальном матовом экране с нанесенной на него сеткой Хилтона точность измерений незначительно ухудшается, не превышает $1,5^\circ$. По сравнению с двукружным гониометром, отличающимся высокой точностью измерения углов (в пределах угловой минуты), параболический гониометр обладает несопоставимо худшими характеристиками. Однако преимущества точной кристаллографической установки округлого кристалла, полноты наблюдаемых рефлексов и общей небольшой затраты времени измерений полностью компенсируют недостатки прибора, тем более что вариации положения рефлексов от округлой поверхности кристалла в характерных точках, связанные с систематическими ошибками настройки, обычно заметно превышают точность измерений на гониометре и, согласно наблюдениям А.А. Кухаренко (1955), составляют более $2-3^\circ$.

Таким образом, по нашим оценкам, инструментальная погрешность используемого нами прибора 1° , но ошибка измерений углов обычно равна $1,5^\circ$.

Известно, что построение гномонической проекции полярного комплекса округлого кристалла алмаза предполагает его точную кристаллографическую установку. Для этого необходимо установить кристалл в фокус зеркала и ориентировать одну из его четверных осей по оптической оси параболического гониометра. Если на кристалле нет плоских граней, то единственный способ установки связан с созданием максимально симметричной картины рефлексов на экране путем поворота кристалла вокруг двух осей,

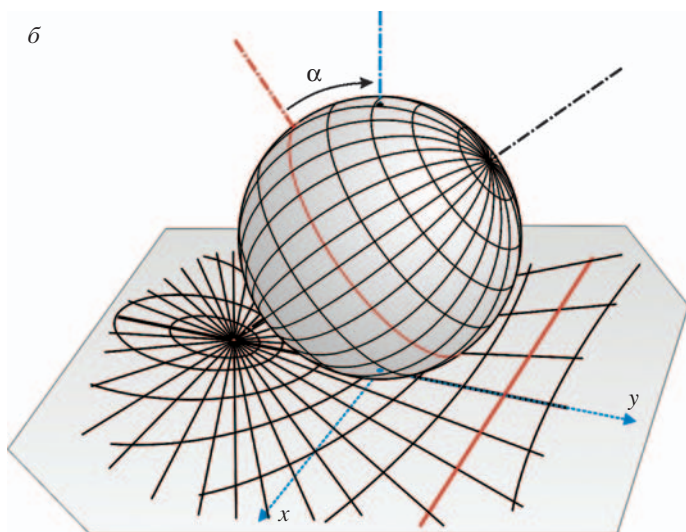
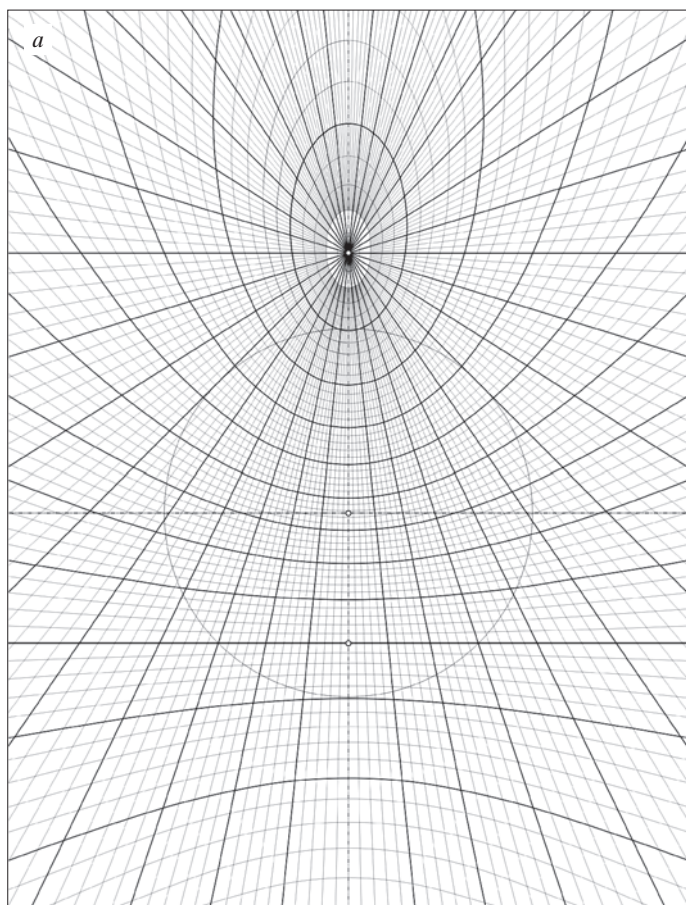


Рис. 2.4. «Алмазная» гномоническая градусная сетка (а), построенная путем поворота координатной сферы на угол $35^{\circ}16'$, соответствующий дополнительному углу между тройной и четверной осями симметрии алмаза (б)

не совпадающих с оптической осью прибора. Таким способом плоскости симметрии, если они присутствуют на кристалле, могут быть найдены достаточно просто, но для выведения кристаллической оси четвертого порядка параллельно оптической оси необходимо дополнительно иметь возможность вращать кристалл вокруг оси прибора. Неточность юстировки кристалла вносит некоторую погрешность в определение кристаллографических индексов характерных точек рефлекса, однако на измерения относительных углов между точками рефлексов она не влияет. Погрешность кристаллографической установки кристалла связана с рядом факторов:

- асимметрией облика кристалла (уплощенность, удлинённость);
- сложностью микрорельефа поверхности, дающей нечеткий размытый рефлекс;
- неполнотой элементарных поверхностей (отсутствием естественных криволинейных ребер на поверхности кристалла);
- естественной дисимметризацией формы кристалла, приводящей к исчезновению плоскостей и осей симметрии;
- отсутствием «естественной» поверхности кристалла и заменой ее поверхностями механического истирания.

При отсутствии видимой оси симметрии четвертого порядка и двух взаимно ортогональных плоскостей симметрии, параллельных оси, установка кристалла в гониометре становится достаточно длительной. Обычно, по крайней мере, в одном из шести направлений на кристалле алмаза или его обломке можно обнаружить признаки четверной оси симметрии структуры алмаза. Если не удастся сразу сделать это, то можно использовать следующие приемы.

1. Найти ось третьего порядка, располагающуюся под углом $54^{\circ}44'$ к искомой четверной оси симметрии алмаза. В этом случае может помочь «алмазная» гномоническая координатная сетка (см. рис. 2.4, а). Тройную ось симметрии следует установить по направлению оси координатной сетки ($\rho = 90^{\circ}$) и по нулевому меридиану направить одну из трех плоскостей симметрии рефлекса. Тогда в одном из двух случаев в полюсе гномонической проекции окажется ось четверного порядка. Установка будет правильной, если одну из осей симметрии второго порядка, совпадающей с направлением $\langle 110 \rangle$ кристалла алмаза, расположить на 60-м меридиане «алмазной» сетки.

2. Если на кристалле проявляется кристаллографически важная структурная зона $\langle 110 \rangle$ алмаза в виде череды точечных или пунктирных рефлексов, то, найдя две зоны, например $[110]$ и $[011]$, пересекающиеся по оси симметрии третьего порядка, их следует одновременно ориентировать по восточному и западному 60-м меридианам алмазной сетки. Таким образом, в полюсе гномонической проекции будет находиться искомая ось четвертого порядка. Если на кристалле проявляются другие структурные зоны, например взаимно ортогональные $[110]$ и $[\bar{1}10]$, пересекающиеся по четверной оси, то линии их пунктирных рефлексов надо ориентировать на экране гониометра строго параллельно и на равном удалении от оси симметрии прибора вдоль по 45-м меридианам сетки Хилтона. Так будет найдено точное положение оси четвертого порядка кристалла (в полюсе проекции).

Очевидно, что точность настройки кристалла в каждом конкретном случае зависит от разных причин, но при этом среднюю ошибку юстировки кристалла-додекаэдроиды в параболическом гониометре можно снизить до 1° , а погрешность измерения абсолютных угловых характеристик формы кристалла алмаза составит не более $2,5^\circ$.

Таким образом, параболический гониометр представляет собой физический прибор «интегрального» (суммирующего) типа в отличие от двукружного гониометра, который можно отнести к приборам «дифференциального» (локального) типа.

2.1.3. Принцип отбора кристаллов для гониометрии

Пригодность округлых кристаллов алмаза для гониометрических исследований (морфометрии) определяется только опытным путем при размещении кристалла в гониометре. Практически бесформенный обломок алмаза может демонстрировать комплекс рефлексов идеального октаэдра благодаря микроскопическим аксессуарам регенерации, присутствующим на его поверхности, или неровная криволинейная поверхность алмаза, покрытая царапинами и трещинами по плоскостям спайности явного механического происхождения, на экране гониометра представляет собой хороший, но слегка размытый треугольный рефлекс додекаэдроиды. И, напротив, практически совершенный кристалл-октаэдр, но с бороздами вдоль ребер может отражать на экране гониометра кроме собственно рефлексов октаэдра поля света, которые можно отнести только к формам предельного механического истирания. Таким образом, опыт показывает, что по внешнему виду кристалла в большинстве случаев нельзя предсказать характер рефлексов отражения от его поверхности на экране гониометра. Соответственно физиографическое описание формы кристалла, даже с использованием фотографий, полученных под электронным микроскопом, никогда не заменит инструментальную морфометрию, только дополнит ее.

2.1.4. Получение гномонической проекции рефлексов

Съемка гномограмм фотографическим методом является достаточно трудоемким по современным меркам процессом, включающим следующую последовательность действий:

- 1) первичную юстировку кристалла на свету;
- 2) обрезку и прокалывание центрального отверстия в фотоматериале (фотопленке или фотобумаге) в темноте;
- 3) помещение фоточувствительного материала в фотокассету;
- 4) прецизионное выведение кристалла из гониометра;
- 5) замену вспомогательного экрана фотокассеты;
- 6) введение кристалла в фокусную точку зеркала;
- 7) экспозицию фотоматериала;
- 8) выполнение обратных операций по п. 6 и 5;
- 9) химическую обработку фотоматериала.

Можно использовать специальные листовые пленки с фотоэмульсиями, сенсibilизированными к наиболее распространенному красному лазерному

свету, но дешевле применять фотобумагу, а в качестве источника света – ртутную лампу или современный твердотельный зеленый лазер.

Однако провести исследование большой партии кристаллов фотометодом технически не представляется возможным. Поэтому нами применяется экспрессный метод изготовления эскиза гномонической проекции рефлексов кристалла на бумаге. Такой метод используется в изобразительном искусстве при создании точной копии картины и изготовлении ее увеличенной или уменьшенной копии. Для этого на матовый экран гониометра наносится координатная сетка. Предпочтительна гномоническая сетка Хилтона или алмазная сетка, по которым можно измерять угловые характеристики отражающей поверхности. Для изготовления эскиза на планшете используется такая же координатная сетка, как и на экране гониометра, поверх нее закрепляется бумажная калька. На бумагу в целях точного позиционирования предварительно наносятся полюс проекции и положения вспомогательных точек (достаточно нанести одну характерную внеосевую точку). После настройки кристалла в гониометре и получения на экране картины световых рефлексов на бумажную кальку карандашом переносятся все особые точки, границы областей светового рефлекса, различимые глазом. Иногда важно указать, например густотой штриховки, распределение интенсивности света в протяженном рефлексе. Естественно, при создании эскиза гномограммы большое значение имеют практические навыки перенесения изображения. Однако точность передачи изображения обычно составляет не менее одного углового градуса. Установка кристалла на кристаллодержатель, его юстировка в гониометре и изготовление эскиза одной гномограммы занимают от 5 до 10 мин. В предельном случае для получения полной картины рефлексов от кристалла необходимо произвести съемку гномограмм во всех шести ориентациях кристалла по трем четверным осям. Таким образом, каждая из 24 элементарных гладких поверхностей правильного додекаэдроида алмаза будет запечатлена дважды на гномограмме, но в разных областях гномонической координатной сетки, и точность анализа поверхности кристалла улучшится.

При съемке плоскогранных кристаллов или кристаллов, обладающих значительными участками плоских граней октаэдра, на гномограмме часто появляются дополнительные рефлексы, обусловленные преломлением и внутренним отражением лучей света в кристалле алмаза (рис. 2.5). В случае правильной кристаллографической установки алмаза октаэдрического облика в гониометре преломленные и одно- и многократно отраженные лучи красного света лазера (632,8 нм) закономерным образом распределяются на экране гониометра. Вариации центральных расстояний до граней октаэдра приносят свои коррективы в месторасположение паразитных рефлексов. В частности, рефлексы простой формы {16.25.16} – это результат внутреннего отражения света от граней октаэдрического кристалла (см. рис. 2.5). Часть других паразитных рефлексов группируются вокруг точек {110} гномонической проекции. Некоторые точечные рефлексы разбросаны вокруг центральной оси четвертого порядка, но тяготеют к линиям тетрагонтриоктаэдра. Чаще всего паразитные рефлексы, обусловленные внутренним отражением света, легко выявляются по указанным признакам и не мешают расшифровке полярного комплекса кристалла.

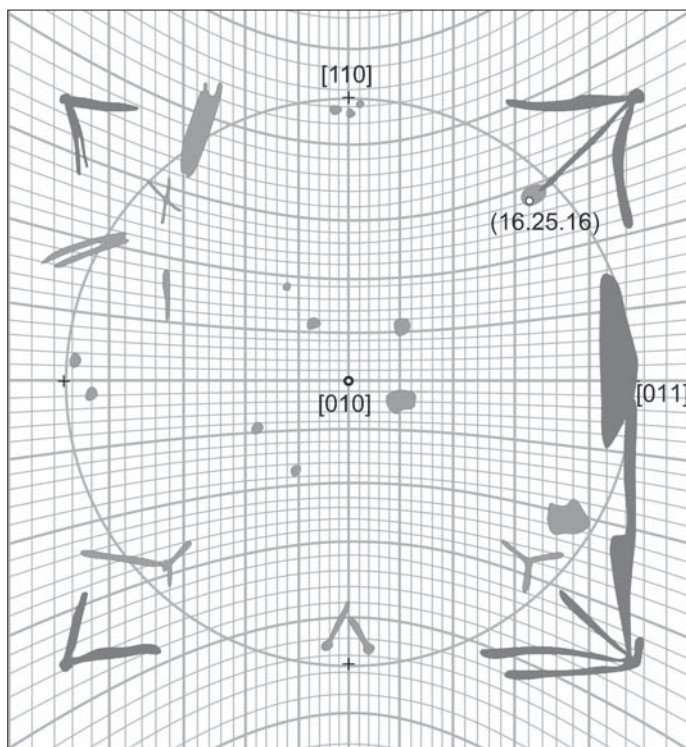


Рис. 2.5. Гномограмма правильного октаэдра № 322 из россыпи Новинка (Якутия) с небольшими признаками химического травления и механического истирания

2.2. ДВОЙНИКОВАНИЕ АЛМАЗА. ЛОНСДЕЙЛИТ

Иногда двойники алмаза (двойники по шпинелевому закону) добавляют группу особых, не характерных для первого субиндивида, рефлексов на экране параболического гониометра, но такие проекции нельзя считать комбинированными рефлексами.

2.2.1. Диагностика двойников алмаза

Шпинелевые двойники в алмазе диагностируются достаточно просто. Известно, что минимальный угол между четверной осью первого субиндивида и ближайшей к ней тройной осью второго, находящегося в двойниковом положении, равен $15^{\circ}48'$. Направление тройной оси второго субиндивида совпадает с полюсом для грани (151) первого кристалла. Установку двойникового сростка кристаллов в гониометре производят по четверной оси первого субиндивида. Путем поворота кристалла вокруг оптической оси прибора тройную ось второго субиндивида выносят в первую четверть гномонической проекции (рис. 2.6, б) так, чтобы ось третьего порядка второго кристалла располагалась строго на линии тетрагонтриоктаэдров, соединяющей точки [010] и [111] первого кристалла в полюс грани (151).

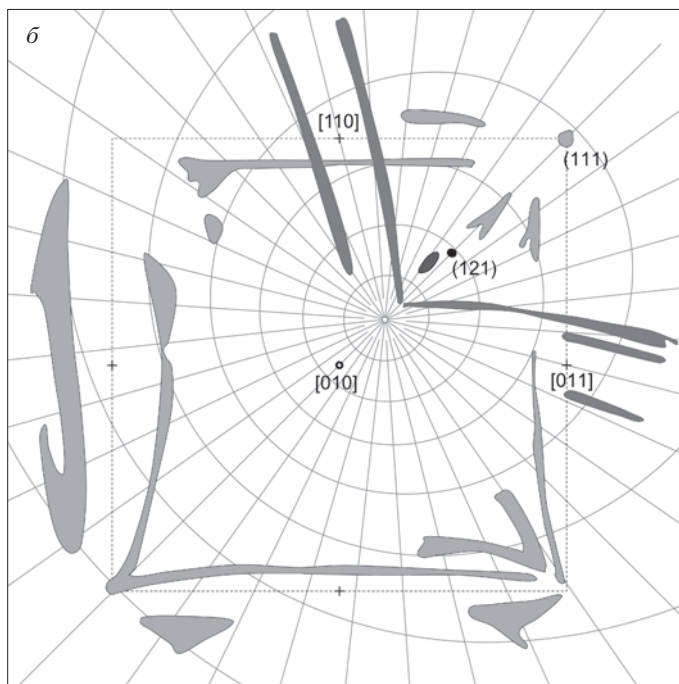
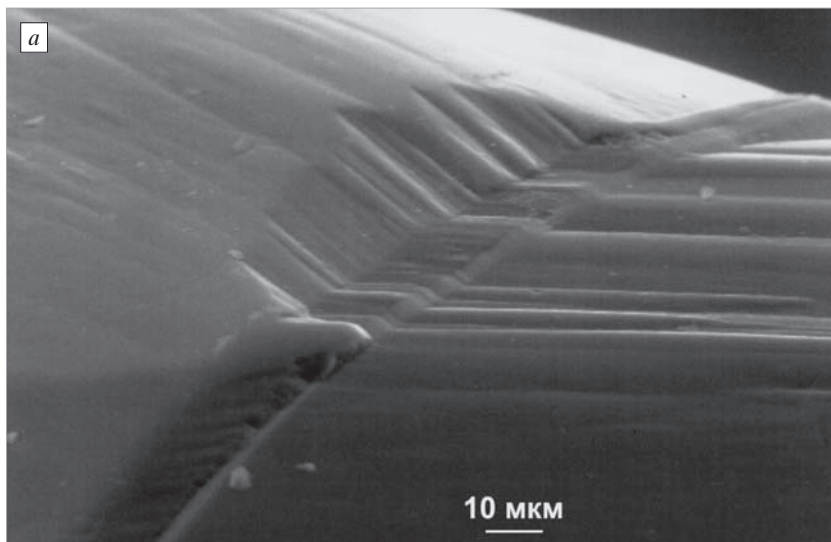


Рис. 2.6. Двойник кристалла алмаза MGD10/5 из бразильской коллекции алмазов бассейна р. Макаубас (штат Минас Жерайс, Бразилия):
 а – фото поверхности кристалла вблизи двойникового шва; б – эскиз гномограммы

Фоном для гномограммы (см. рис. 2.6, б) служит настраиваемая гномоническая сетка, рассчитанная по формулам (2.2), с широтным углом $\alpha = 74^\circ 12'$, которую можно назвать «шпинелевой» или «двойниковой» градусной сеткой. Цена делений изображенной на рис. 2.6, б сетки составляет 10° . Ось сетки совпадает с осью третьего порядка второго субиндивида (полнос грани (111)), находящегося в двойниковом положении по отношению к первому кристаллу. Полнос кристаллографической проекции, совпадающий с направлением [010] структуры первого субиндивида, расположен на нулевом меридиане градусной сетки и на широте $15^\circ 48'$. Рефлексы от поверхностей первого субиндивида отмечены более светлым оттенком.

В градусной сетке, построенной с углом наклона $74^\circ 12'$, проявляются многие особенности двойникового кубических кристаллов по шпинелевому закону. Так, если ось сетки располагать по линии, соединяющей точки [010] и (111) первого кристалла в правильной кристаллографической установке, то на 0, 120 и 240-м меридианах сетки будут находиться точки направлений [010], [011] и [110] структуры первого кристалла (отсчет углов ведется против часовой стрелки). Одновременно для второго кристалла эти меридианы совпадают с линиями тригонтриоктаэдров. В частности, три ближайшие точки структурной сетки ромбододекаэдра {110} второго кристалла алмаза лежат на этих меридианах на широте в $35^\circ 16'$, отсчитываемой от полюса. Две из них, связанные с меридианами 120 и 240° , совпадают с точками [011] и [110] первого кристалла (отмечены крестиками на гномонической проекции – рис. 2.6, а), а третья точка должна располагаться по другую сторону от полюса проекции на нулевом меридиане в третьей четверти. Местоположение ее легко находится по градусной сетке.

Рефлексы субиндивидов двойников (см. рис. 2.6, б) весьма сходны и указывают на поверхности, близкие к конусу (см. главу 4). Это поверхности травления. На обоих субиндивидах присутствуют ямки травления на выходах осей четвертого порядка, сложенные поверхностями, близкими к эллиптическому цилиндру. Общая картина рефлексов свидетельствует о механической обработке поверхности сростка (см. главу 5).

Сложный двойник алмаза (пятерник) обладает сходными рефлексами (рис. 2.7). При правильной кристаллографической установке одного из субиндивидов на гномонической проекции фиксируются три группы рефлексов, принадлежащих одному центральному (поля средней тональности) и двум соседним (темные и светлые рефлексы) субиндивидам (рис. 2.7, а). Ориентация кристаллов в гониометре по оси второго порядка выявляет пять субиндивидов, находящихся в двойниковом положении относительно друг друга (рис. 2.7, б). Известно, что в пятернике алмаза шпинелевый закон двойникового выполнения строго не для любых двух соседних субиндивидов. Отклонение от закона двойникового для одной из пяти пар соседних субиндивидов в пятернике должно составить $7^\circ 21'$. В приведенном на рис. 2.7, б пятернике такую пару надежно установить не удалось, поскольку ошибка в установке кристалла по двойной оси в гониометре оказалась более 3° . Для точной установки алмаза по оси второго порядка необходимо использовать особую вспомогательную настраиваемую сетку с широтным углом $35^\circ 16'$, которая рассчитывается по формулам (2.2).

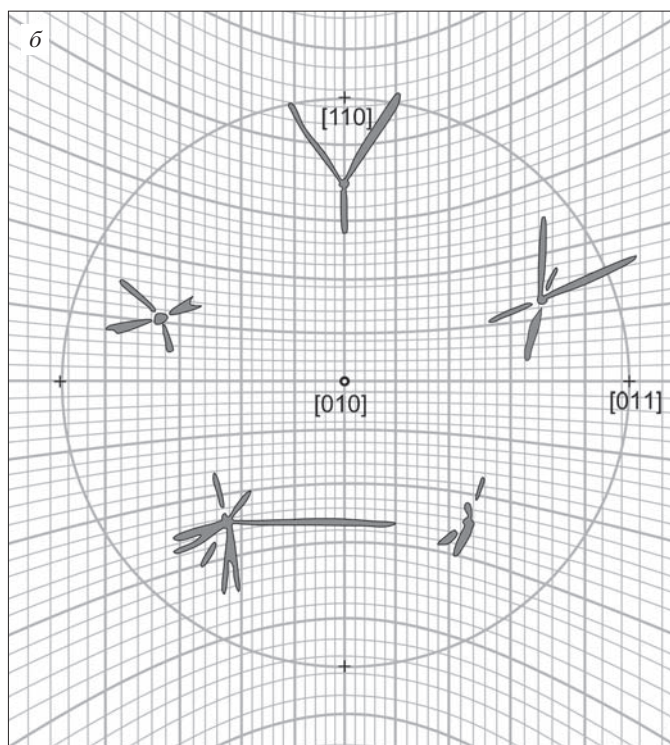
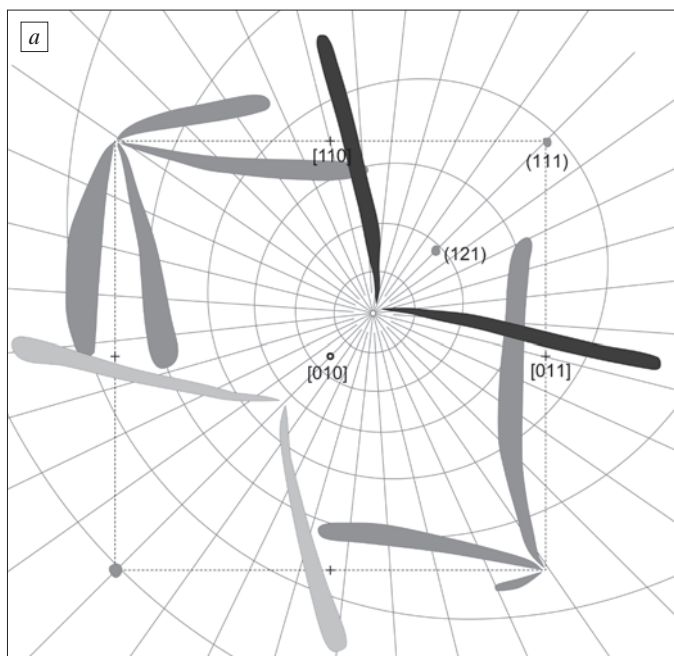


Рис. 2.7. Сложный двойник алмаза из якутской коллекции:

a – гномограмма рефлексов группы из трех соседних субиндивидов, правильная кристаллографическая установка выполнена для среднего кристалла; *b* – пятерник алмаза, ось второго порядка, по которой установлен сросток двойников, является единственной совпадающей осью симметрии для всех пяти субиндивидов

Вершины условного пятиугольника на гномонической проекции соответствуют граням октаэдра пяти субиндивидов. Лучи, идущие от вершин к центру пентагона, отражают главным образом цилиндрические поверхности отрицательного рельефа (ямки травления на гранях октаэдра). Рефлексы, представляющие отрезки сторон пятиугольника, и лучи, идущие в направлении от центра фигуры наружу, эквивалентны поверхностям цилиндра, образованным у вершин октаэдра (см. главу 3). Они редко встречаются на монокристалле, но на двойнике, как видно, возможны. Расщепленные рефлексы, идущие от точек октаэдра, соответствуют поверхностям травления и небольшого хаотического износа (см. главу 4).

2.2.2. Срастание алмаза с лонсдейлитом и другими политипами

Интересно отметить, что на округлых двойниковых сростках кристаллов алмаза как из бразильской, так и якутской коллекции часто обнаруживаются плоские участки тетрагонтриоктаэдра (121) (см. рис. 2.6, б; рис. 2.7, а), грани которого являются S-гранями кубического алмаза согласно теории Хартмана–Пердока (см. табл. 1.1) (Ракин, 2012а). Поперечный размер фрагмента грани составляет не менее 10 мкм. У двух субиндивидов, sdвойникованных по шпинелевому закону в ориентации, показанной на рис. 2.6, б, рис. 2.7, а, две плоские сетки – (121) и центрально симметричная ей ($\bar{1}2\bar{1}$) – совпадают. Первая сетка проявляется на проекции рефлексов как плоская грань. Эта грань ориентирована перпендикулярно плоскости двойникования субиндивидов и находится где-то на двойниковом шве (рис. 2.6, а). Важно отметить также, что нормали к грани (111) двойника и грани (151) первого субиндивида также совпадают.

Наличие дополнительной, помимо октаэдра, плоской грани (121) на округлых кристаллах, очевидно, связано с их двойникованием и, возможно, особыми условиями растворения алмаза вблизи двойникового шва. Определенную роль при этом могут играть и пластические деформации алмаза, наблюдаемые на фото поверхности (см. рис. 2.6, а).

Двойниковый шов можно считать фрагментом структуры гексагонального лонсдейлита, когерентно сросшегося плоской сеткой (0001) с гранью (111) алмаза. Мотив структуры лонсдейлита возникает на плоскости {111} структуры алмаза при его двойниковании по шпинелевому закону, при котором одна из четырех осей третьего порядка первого субиндивида и одна из тройных осей двойника совпадают. Но при этом решетка двойника оказывается повернутой на 60° . Таким образом, двойниковый шов, совмещающий структуры двух субиндивидов алмаза, представляет собой слой лонсдейлита, ориентированный перпендикулярно оси *c* и толщиной, по крайней мере равной половине элементарной ячейки лонсдейлита. Поэтому двойниковый шов можно уверенно называть природной наноструктурой лонсдейлита.

Согласно закону двойникования, одна из плоских сеток {121} алмаза параллельна одной из граней гексагональной призмы $\{10\bar{1}0\}$ лонсдейлита. Грани призмы $\{10\bar{1}0\}$ лонсдейлита, согласно теории периодических цепей химических связей Хартмана–Пердока, можно отнести к F-граням, по-

сколькx они содержат одну цепь сильных связей, характерную для алмаза и имеющую зигзагообразный вид, которая одновременно принадлежит плоскости (001) лонсдейлита, а также две винтообразные цепи с такими же угловыми характеристиками, как у зигзагообразной цепи, направленные под углами 60° к плоскости (001) лонсдейлита. Все три цепи сильных связей лежат в плоскостях {100} и делают эту простую форму лонсдейлита габитусной. Если бы лонсдейлит встречался в природе в форме самостоятельного монокристалла, F-границ призмь {10 $\bar{1}$ 0} имели бы все шансы определять его равновесную форму совместно с F-границами пинакоида {0001}, замыкающими полиэдр и содержащими три алмазные зигзагообразные цепи сильных связей.

Минерал лонсдейлит (гексагональный алмаз) зарегистрирован комиссией по новым минералам Международной минералогической ассоциации в 1967 г. Название было дано Клиффордом Фронделом в честь британской женщины-кристаллографа Кэтлин Лонсдейл с намерением подчеркнуть редкость лонсдейлита среди алмазов. Лонсдейлит, как и алмаз, состоит из атомов углерода с sp^3 -типом гибридизации валентных орбиталей, но кристаллическая решетка имеет структуру вюрцита. Точечная группа лонсдейлита – $6/mmm$, пространственная группа – $P6_3/mmc$. Параметры решетки: $a = 0,252$, $c = 0,417$ нм. Показатель преломления (в среднем около 2,4) и расчетная плотность ($3,51$ г/см ^{3}) сходны с аналогичными показателями алмаза. Лонсдейлит, как одноосный кристалл, должен обладать естественным двупреломлением в отличие от аномального двупреломления, встречающегося иногда у кубического алмаза, но данные по двупреломлению лонсдейлита в литературе нами не найдены.

В науке активно обсуждается проблема аллотропии углерода, с которой тесно связаны понятия полиморфизма и политипии (Хайманн, Евсюков, 2003). Согласно представлениям специалистов в области химии, определяющим признаком для классификации аллотропных разновидностей углерода является тип гибридизации валентных орбиталей атомов углерода. Поэтому полиморфные алмаз и лонсдейлит, хотя и различаются структурами, но относятся к одной аллотропной группе алмаза (sp^3 -тип электронной конфигурации углерода) (Там же).

Минералогические же критерии определения минерала кроме постоянства химического состава (с точностью до изоморфизма) и определенной кристаллической структуры включают также условие существования в природе и до недавнего времени условие наблюдения минерала в природном образце в виде различного глазом отдельного зерна. Последние признаки указывают на термодинамическую стабильность или достаточную метастабильность кристаллической структуры данного соединения. Лонсдейлит формально отвечает трем перечисленным минералогическим критериям. Он обладает тем же простым составом, что и кубический алмаз, особой гексагональной решеткой и может быть обнаружен в природе, но только не в виде отдельного зерна. Тем не менее наличие характерных «лонсдейлитовых» отражений (пики (100), (002), (101)) в картине рентгеновской дифракции позволяет уверенно диагностировать лонсдейлит в природных образцах. Лонсдейлит относят к минералам, но при этом на равновесной

диаграмме фаз углерода (Bundy et al., 1996) он не имеет своего поля. В литературе не был ни разу отмечен факт находки лонсдейлита в отрыве от кубического алмаза, что вызывает сомнения относительно лонсдейлита как самостоятельного минерального вида.

Таким образом, возникает вполне закономерный вопрос, почему атомы углерода, находящиеся в состоянии sp^3 -гибридизации валентных орбиталей, почти всегда организованы в кубическую структуру и очень редко в гексагональную и при этом гексагональный мотив решетки всегда срастается с кубическим.

Ответ на этот вопрос можно найти в области изомерии алканов. Экспериментально измеренный энергетический барьер вращения С–С-связи этана составляет 12,1 кДж/моль (Илиел и др., 2007). Он определяет разность энергий состояния двух изомеров в так называемых заслоненной и заторможенной конформациях. Увеличивая число окружающих атомов углерода вокруг анализируемой связи С–С, можно убедиться, что энергетический барьер для пропана составляет уже 14,2, бутана – 15,1, а 2,3-диметилбутана – 18 кДж/моль (Там же). Разность в энергиях конформационных состояний приведенных алканов обусловлена эффектом кулоновского отталкивания атомов водорода или его заместителей – метиловых групп. Эффект отталкивания ограничивается ближайшими комплексами. Таким образом, можно прийти к заключению, что разность энергий в заслоненной конфигурации окружающих ковалентных связей вокруг выделенной С–С-связи, отражающей структурный мотив лонсдейлита (Л), и заторможенной конфигурации (А), характерной для любых углеродных связей в кубическом алмазе, приближается к 20 кДж/моль в расчете на выделенные связи, если не учитывать изменение длины химических связей и уменьшение эффективного кулоновского отталкивания за счет перераспределения электронной плотности по соседним связям.

Необходимо учесть, что в структуре лонсдейлита только одна связь из четырех обладает свойством заслоненной конфигурации, а остальные находятся в заторможенной ориентации. Таким образом, согласно изомерии алканов, химический потенциал углерода в структуре лонсдейлита оказывается большим, чем в алмазе, примерно на 5 кДж/моль, что доказывает энергетическую невыгодность структуры лонсдейлита по сравнению со структурой кубического алмаза. Квантовомеханический расчет, выполненный разными исследователями методом (линеаризованных) присоединенных плоских волн полного потенциала (FLAPW) в рамках теории функционала плотности, показывает, что энергия решетки лонсдейлита при нормальных условиях превышает энергию решетки алмаза не более чем на $3,1 \pm 0,9$ кДж/моль (Wu, 2007). Эта величина представляет собой разность химических потенциалов углерода в решетке лонсдейлита и кубического алмаза. Для сравнения: энергия решетки алмаза превышает энергию решетки графита при нормальных условиях на меньшую величину – 1,9 кДж/моль.

Таким образом, различие в энергиях решеток лонсдейлита и алмаза составляет 0,95 кДж/см³. В высокобарических условиях, с учетом одинакового электронного состояния углерода в алмазе и лонсдейлите, разность энергий изменится незначительно. По этой причине появления поля лонсдейли-

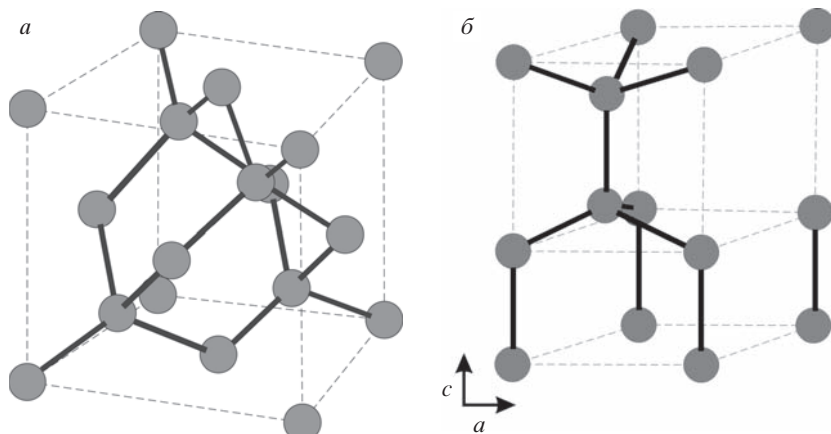


Рис. 2.8. Элементарные ячейки алмаза (а) и лонсдейлита (2Н) (б)

та на равновесной диаграмме фаз углерода (Bundy et al., 1996) ожидать не приходится. Лонсдейлит в области равновесного существования кубического алмаза при высоких P – T -параметрах, согласно термодинамическим представлениям, имеет локальный минимум энергии решетки и соответственно метастабильную структуру, а кубический алмаз имеет абсолютный минимум энергии решетки и равновесную структуру.

Симметричные расчеты кристаллографической структуры алмаза в рамках пространственной группы $Fd\bar{3}m$ при параметре решетки $a = 0,35598$ нм показывают, что все длины химических связей атома углерода в алмазе одинаковы и составляют 0,15414 нм, а углы между любыми двумя ковалентными связями равны и составляют $109,47^\circ$ (рис. 2.8, а). Благодаря ориентации ближайших ковалентных связей в лонсдейлите их длины и углы между ними неодинаковы. Расчеты, выполненные нами для лонсдейлита, при заданных параметрах решетки: $a = 0,252$ нм, $c = 0,417$ нм, и пространственной группе $P6_3/mmc$ показывают, что три из четырех связей, ориентированных субпараллельно плоскости (0001), имеют длину 0,15455 нм, а одна связь, направленная вдоль оси [0001], на 1,2% длиннее – 0,15638 нм. При этом углы между тремя короткими ковалентными связями, субпараллельными плоскости пинакоида, составляют $109,71^\circ$, а углы между одной длинной связью и тремя короткими – $109,23^\circ$ (рис. 2.8, б). Интересно, что, искусственно уменьшая параметр c решетки до значения 0,4115 нм, можно добиться равенства как длины связей, так и углов между ними в структуре лонсдейлита. Однако нарушение тетраэдрической симметрии электронных орбиталей углерода принципиально устранить невозможно. Поэтому небольшие отклонения в длинах связей и углах между ними в лонсдейлите неизбежно присутствуют и свидетельствуют, во-первых, о нарушении тетраэдрической симметрии sp^3 -гибридизации валентных орбиталей углерода в структуре лонсдейлита и соответственно ее большей внутренней энергии по сравнению со структурой алмаза, во-вторых, об отсутствии строгого когерентного согласия при эпитаксиальном срастании структур алмаза и лонсдейлита,

что неизбежно приводит к возникновению напряжений при росте лонсдейлита на алмазе.

Следует отметить, что в литературе кроме собственно лонсдейлита (2Н) выделены также политипы гексагональной (4Н, 8Н, 12Н, 16Н, 20Н) и ромбоэдрической (15R, 21R) структур (Wu, 2007; Куракевич, 2009) и другие, сочетающие в разных комбинациях мотивы лонсдейлитовой (Л) заслоненной и алмазной (А) незаслоненной изомерии связей (рис. 2.9). Различное сочетание двух основных мотивов Л и А по выделенной оси определяет все многообразие политипов аллотропа sp^3 -углерода. Начиная с простейших политипов можно выделить:

- кубический алмаз, состоящий из периодического чередования группы из трех слоев алмазного мотива ААА;

- гексагональный лонсдейлит (2Н) из чередования пары слоев лонсдейлитового мотива – ЛЛ;

- гексагональный политип 4Н, характеризующийся чередованием группы ЛАЛА (см. рис. 2.9, а);

- гексагональный политип 6Н – ЛААЛАА (см. рис. 2.9, б).

Во всех иных политипах возможны два и более варианта различных сочетаний основных мотивов на каждый политип. Например, единичный слой гексагонального политипа 8Н может быть сконструирован группой ЛААЛААЛЛ или ЛАЛЛЛАЛЛ (рис. 2.9, в, г). Для всех кристаллических разновидностей политипов sp^3 -углерода с дальним порядком упаковки возможны только три варианта симметрии трехмерной решетки – кубическая (одна), гексагональная (множество) и ромбоэдрическая (множество) и множество аперiodичных по одному направлению структур. Незакономерное чередование мотивов приводит к потере периодичности по направлению нарастающего вещества. Внутренняя энергия решетки будет тем больше, чем чаще встречается в чередовании слоев лонсдейлитовый мотив изомерии связей. Собственно лонсдейлит (2Н-политип) является крайним членом ряда гексагональных политипов и отличается наибольшей энергией решетки (3,1 кДж/моль) относительно алмазной. Например, энергия решетки политипа 6Н, синтезированного из газовой фазы искусственно (Pierson, 1993) и содержащего два мотива А на один мотив Л, превышает энергию кубического алмаза всего на 0,67 кДж/моль (Wu, 2007).

Известно, что высокопараметрические условия минералообразования в нижней части литосферы характеризуются стремлением вещества к увеличению симметрии кристаллической структуры. Большое давление, достаточное количество свободной энергии, связанное с высокой температурой системы, и, как следствие, большие флуктуации свободной энергии способствуют переходу не только минералов, но и атомов в электронное состояние с большей симметрией и, как правило, более высокоэнергетическое. Известно явление «перовскитизации» минералов (Пушаровский, 1980). Около 2/3 всех минералов верхней мантии обладают перовскитоподобной структурой. Даже моноклинные и триклинные полевые шпаты при высоких давлениях трансформируются в более симметричную структуру, например, тетрагонального голландита (Там же). Большие значения термодинамических переменных, высокие скорости всевозможных химических реакций, быстрота достижения локаль-

ного термодинамического равновесия приводят к предельно симметричному состоянию среды, описываемому группой П. Кюри – $^{\circ} / m$. В этих условиях вероятность образования высокосимметричной структуры кубического алмаза гораздо выше, чем структуры лонсдейлита, даже если в термодинамической системе химический потенциал углерода в среде превышает таковой в обеих структурах (как алмаза, так и лонсдейлита).

Учитывая повышенное значение химического потенциала углерода в структуре лонсдейлита, можно прийти к заключению, что энергия критического зародыша лонсдейлита при гомогенном зародышеобразовании должна быть выше энергии такого же по массе зародыша алмаза, и поэтому зародышеобразование новой фазы с sp^3 -типом углерода происходит чаще по линии алмаза, но не лонсдейлита.

Тем не менее лонсдейлит может образоваться при соблюдении ряда условий:

1) наличие дисимметризирующего среду кристаллизации фактора необходимой интенсивности до появления выделенной оси согласно принципу П. Кюри (1966);

2) наличие движущей силы кристаллизации лонсдейлита – условий для фазового перехода углерода из среды кристаллизации (твердая фаза, расплав, флюид или газовая фаза) в структуру лонсдейлита;

3) существование свободной поверхности алмаза – фрагмента грани октаэдра $\{111\}$ – для инициации гетерогенного механизма зародышеобразования лонсдейлита как менее энергетически затратного по сравнению с гомогенным механизмом.

Рассчитаем величину осевого давления, которое нужно приложить к алмазу, чтобы создать энергию деформации решетки $0,95 \text{ кДж/см}^3$ и получить таким образом необходимое приращение химического потенциала углерода в структуре алмаза до уровня химпотенциала углерода в лонсдейлите. Ось приложения силы должна совпадать с поворотной осью L_3 структуры алмаза, чтобы на поверхности грани октаэдра создать условия для эпитаксиального зародышеобразования лонсдейлитовой фазы, ориентированной также осью L_6 по выделенному направлению. Именно сжатие алмаза по оси L_3 обеспечивает деформацию углов между ковалентными связями в его структуре, приближая их к углам связей в базальной плоскости (0001) лонсдейлита. Необходимое избыточное осевое давление оценим по формуле

$$P = \sqrt{2wE}, \quad (2.3)$$

полученной согласно теории упругости твердого тела:

$$w = \frac{E}{2} \left(\frac{\Delta l}{l} \right)^2, \quad P = E \frac{\Delta l}{l},$$

где $w = 0,95 \text{ кДж/см}^3 = 0,95 \text{ ГПа}$ – удельная энергия деформации решетки, $E = 787 \text{ ГПа}$ – модуль Юнга алмаза по направлению оси L_3 (Современная кристаллография, 1981), $\Delta l/l$ – относительное сжатие решетки. По формуле (2.3) получим внешнее осевое давление, которое надо приложить к кристаллу, – $38,6 \text{ ГПа}$.

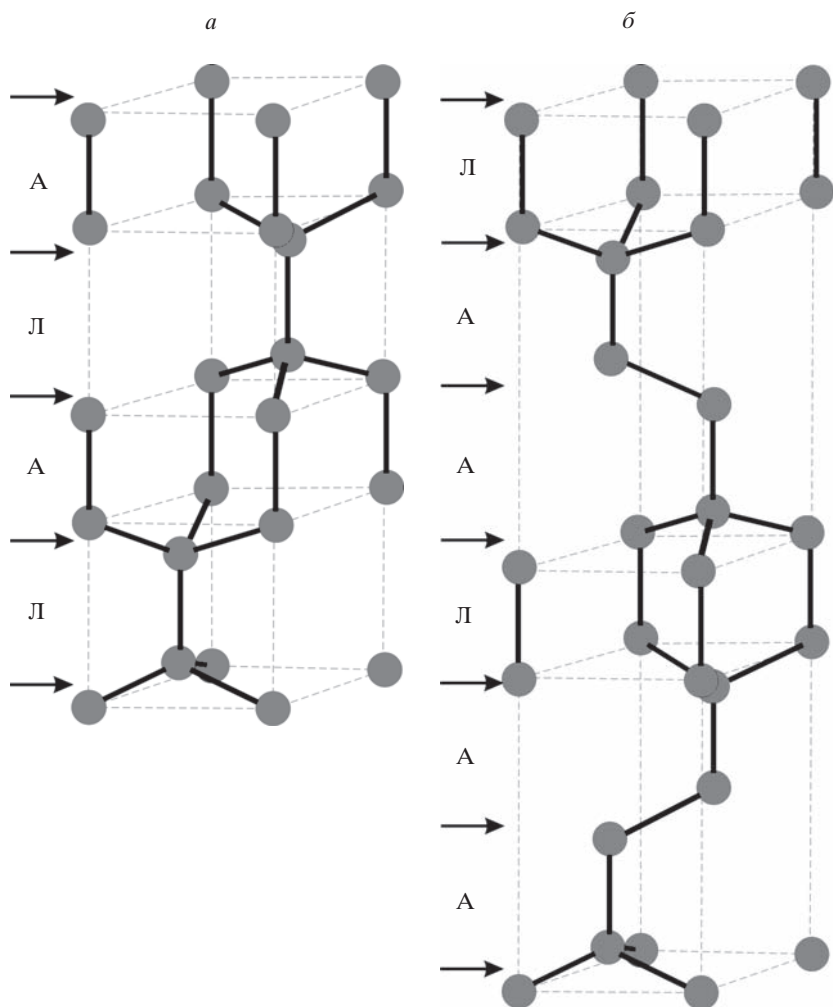
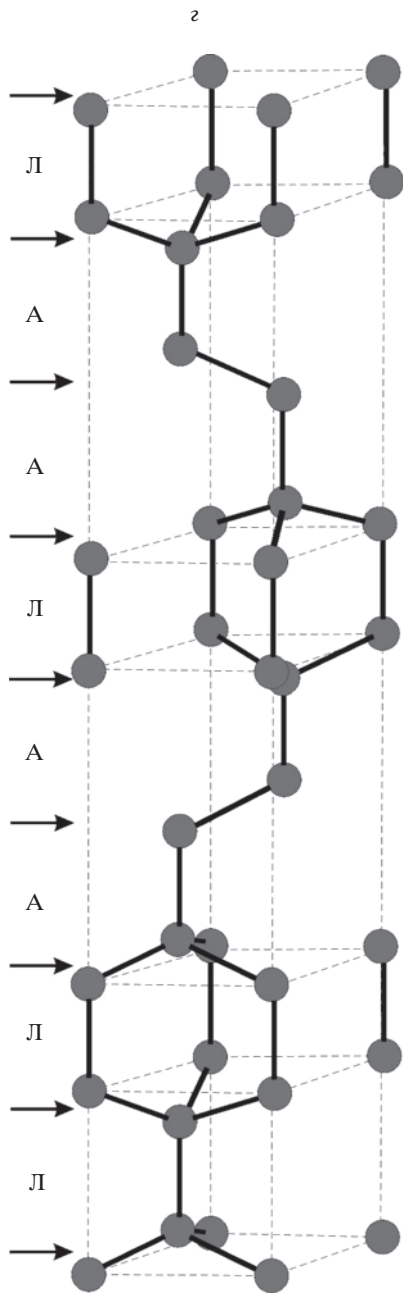
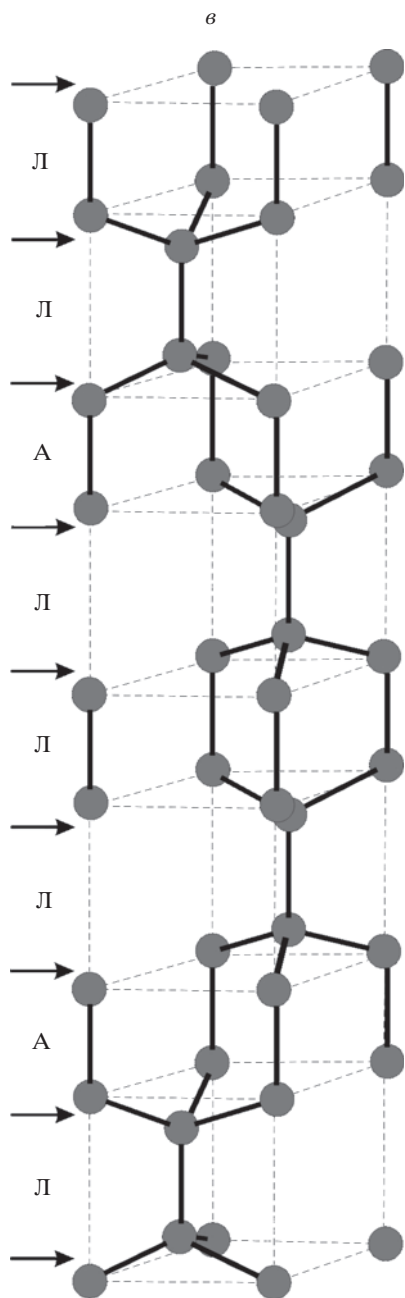


Рис. 2.9. Политипы гексагональной структуры sp^3 -углерода:
a – 4Н; *b* – 6Н; *в* и *г* – 8Н



Согласно теории упругости кристаллов Я.И. Френкеля, критическое скалывающее напряжение в кристалле составляет примерно $1/(2\pi)$ от модуля сдвига в данном направлении, а по более точной оценке для гранецентрированной решетки – $1/30$ модуля сдвига (Инденбом, Орлов, 1962). Поэтому относительные деформации решетки идеального алмаза не должны превышать 2%. Расчеты показывают, что критическая плотность энергии деформаций для начала пластических течений в алмазе составляет около 20 ГПа, что в 20 раз превышает энергию деформации решетки, необходимую для начала образования лонсдейлитовой фазы на поверхности грани октаэдра (0,95 ГПа). Поэтому при достижении условий двойникования алмаз остается целым и не будет разрушаться. Естественно, образование лонсдейлита будет тем более вероятно, чем меньше температура системы. Важно, что деформация решетки алмаза происходит таким образом, что углы между связями в плоскости (111) увеличиваются, приближаясь к значениям углов в структуре лонсдейлита.

Дальнейшее тангенциальное разрастание двумерного элементарного слоя лонсдейлита по плоскости (111) деформированной решетки алмаза (рост гексагональной призмы лонсдейлита – $\{10\bar{1}0\}$) возможно уже при меньших затратах механической энергии, поскольку структура решетки алмаза на месте соединения структур становится напряженной ввиду упомянутой выше нестрогой когерентности угловых характеристик ковалентных связей. Рост же новой структуры в направлении нормали к эпитаксиальной поверхности будет происходить до той поры, пока не будет устранен фактор анизотропии (согласно принципу П. Кюри). И новый слой будет тем толще, чем дольше сохраняются условия анизотропии.

Заметим, что в идеальном случае принцип симметрии П. Кюри дает преимущество именно лонсдейлитовой структуре (2Н), а не какому-либо иному политу, несмотря на то что энергия его решетки всегда будет ниже энергии решетки лонсдейлита 2Н.

При снятии напряжения в нормальном направлении снова возобновляется рост алмазной структуры как энергетически более выгодной и соответствующей симметрии окружающей среды. В зависимости от числа элементарных слоев лонсдейлитовой решетки или решетки полита при дальнейшем росте развивается субиндивид алмаза либо в двойниковом, либо в параллельном положении. При этом лонсдейлитовый слой, образовавшийся по описанному выше механизму, рассекает кристалл параллельно сетке (111) алмаза и выходит по периметру на боковую поверхность в виде собственного фрагмента поверхности. Естественно ожидать, что фрагмент особой кристаллической структуры на открытой поверхности должен проявлять себя как минерал соответствующей сингонии, чаще всего гексагональной (ромбоэдрические политу пока не были отмечены в природных алмазах).

Вернемся к гониометрии. Рефлекс плоской сетки (121) в установке кубического алмаза, наблюдаемый на экране параболического гониометра, можно уверенно интерпретировать как рефлекс от одной из граней гексагональной призмы $\{10\bar{1}0\}$ лонсдейлита или другого гексагонального полита в неправильной кристаллографической установке. Важно учесть, что

грани призмы $\{10\bar{1}0\}$ лонсдейлита, согласно теории периодических цепей химических связей Хартмана–Пердока, можно отнести к F-границам. Вероятность образования плоского участка F-границы на формах растворения исключительно высока. Для других полиморфов данная плоская сетка будет являться только S-гранью, поскольку содержит только одну цепь связей и поэтому менее вероятна.

Таким образом, если на гномонической проекции рефлексов форм растворения и истирания алмаза возникает плоская грань, относимая к гексагональной призме, то наиболее вероятно, что это 2H-полиморф гексагонального алмаза или собственно лонсдейлит. По этим причинам лонсдейлит или другой гексагональный полиморф решетки sp^3 -углерода, сформировавшийся в ходе роста алмаза в существенно анизотропных условиях (и в процессе двойникования), можно считать полисинтетическим двойником алмаза или дефектом структуры кубического алмаза. Хотя свободная поверхность лонсдейлита на кристаллах алмаза в силу симметрии структуры проявляет себя особым образом в процессах растворения, механического истирания и травления, тем не менее в полной мере считать лонсдейлит самостоятельным минеральным видом, по-видимому, нельзя.

2.3. ФОРМЫ РОСТА ИСКУССТВЕННЫХ АЛМАЗОВ

Согласно широко опубликованным (см., например: Элуэлл, 1986), в том числе в Интернете, сведениям, первой добившейся успеха в синтезе алмазов была шведская компания «ASEA» (1953 г.). Однако компания «Дженерал Электрик» в 1955 г. первой представила общественности и запатентовала свою технологию синтеза алмазов, базировавшуюся на использовании нового, сконструированного Т. Холлом одним годом ранее аппарата конструкции «белт» (доработанная конструкция более раннего – «халфбелта»). Ответственные детали устройства для достижения сверхвысоких давлений и температур были изготовлены из сверхпрочного карбида вольфрама. Состав шихты включал 5 частей графита, 1 часть железа, 1/3 части марганца и 1/3 части пентаоксида ванадия. Температура в начале опыта поднималась до 1700 °С, давление – до 9,5 ГПа. Время нагрева составляло 2 мин, затем производилось охлаждение до 1500 °С в течение 8 мин. На первом этапе опыта создавался расплав металла с необходимым количеством растворенного углерода в нем, а на втором этапе в расплаве возникало пересыщение, вызывающее спонтанное зародышеобразование кристаллов алмазной фазы и их рост. Сейчас в качестве растворителя чаще используется смесь никеля и железа, что позволяет снизить температуру синтеза до 1400 °С и давление до 5 ГПа. Данная высокопараметрическая технология синтеза алмаза в научной и технической литературе получила название НРНТ (High-Pressure High-Temperature).

В Институте физики высоких давлений АН СССР первый синтез алмазов был произведен в 1961 г. под руководством Л.Ф. Верещагина. Использовалась камера типа «чечевица». Процесс происходил при температуре 1800–2500 °С и давлении 5–10 ГПа. В качестве катализатора-растворителя за многие годы экспериментальных исследований в СССР использовались

различные металлы – хром, никель, железо, марганец, платина, кобальт и др. Опытным путем установлено, что за 3 мин можно вырастить монокристаллы алмаза массой до 10 мг, а за 30 мин – до 70 мг. Подбор растворителя осуществлялся на основе ряда принципов. Наиболее перспективным растворителем можно считать такой, в котором кривая растворимости углерода имеет линейный положительный наклон в рабочем диапазоне температур и давлений, поверхностная энергия границы раздела алмаз–расплав невелика (хорошая смачиваемость алмаза расплавом металла), коэффициент активности углерода близок к единице (идеальный раствор углерода в расплаве). Важной для синтеза алмаза характеристикой металла является его неспособность к образованию устойчивых карбидов в рабочих P – T -условиях.

Известно, что для выращивания крупных кристаллов алмаза до нескольких карат ювелирного качества различными производителями широко используется метод температурного градиента. Для реализации этого метода в Институте сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля Национальной академии наук Украины используется расплав железо–никель–кобальт, обладающий необходимыми свойствами и известный благодаря открытой печати. Экспериментально установлено, что для получения качественного монокристалла алмаза надо постепенно понижать скорость роста. Для кристалла размером до 1 мм в поперечнике допустима скорость 0,2 мм/ч, а для кристалла размером 5 мм скорость роста должна быть уменьшена уже до 0,04 мм/ч. Этим способом японским физикам удалось поддерживать температуру 1450 °С и давление 6 ГПа в течение 200 ч и получить кристалл ювелирного качества массой 3,5 кар, а специалистам компании «De Beers» – вырастить рекордный технический алмаз невысокого качества массой 34,8 кар за 600 ч.

Напомним, что при искусственном синтезе методом HPHT в камерах сверхвысоких давлений и температур форма кристаллов алмаза представляет собой комбинацию нескольких простых форм: октаэдра {111}, куба {100}, ромбододекаэдра {110}, редко тетрагонтриоктаэдра {311}, а в аппаратах выращивания алмаза из газовой фазы по CVD-технологии (Chemical Vapour Deposition) – комбинацию октаэдра {111} и куба {100} (Sunagawa, 1984; Properties..., 2001).

Для уточнения морфологии искусственных алмазов нами был исследован алмазный порошок марки AC32 630/500 (ГОСТ 9206–80), представленный монокристаллами и сростками (до 15% от общего числа зерен) алмазов желтоватого оттенка поперечным размером от 630 до 500 мкм, полученных в камерах сверхвысоких давлений и температур (Ракин, Пискунова, 2012). Согласно ГОСТу, коэффициент формы исследованных алмазов – отношение длины к ширине световой проекции зерна – не превышает 1,2, среднестатистическая прочность зерен на разрушение не менее 71,2 Н. Из большой группы кристаллов, насчитывающей несколько тысяч зерен, для детального изучения отобраны 65 прозрачных алмазов и сростков, состоящих из двух-трех кристаллов и обладающих хорошей огранкой. Выбор стандартного алмазного порошка марки AC32 630/500 обусловлен рядом соображений:

– во-первых, кристаллы алмаза защищены стандартом качества в отношении их физических и механических свойств;

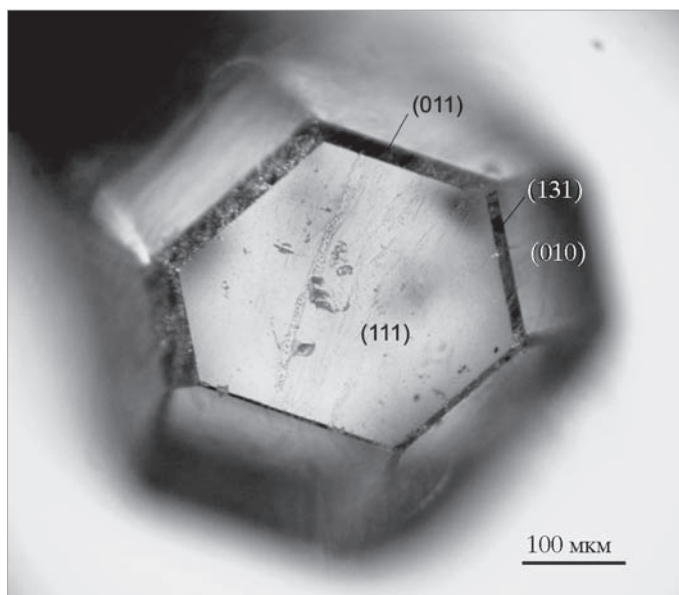


Рис. 2.10. Огранка синтетического алмаза

– во-вторых, они обладают наилучшими характеристиками по соотношению цена–качество, что свидетельствует о наиболее дешевой и одновременно наиболее эффективной методике получения качественного кристаллического алмазного материала;

– в-третьих, алмазный порошок фракции 630/500 доступен для приобретения и пригоден для исследования различными методами, включая гониометрию.

Среди исследованной группы, насчитывающей 65 кристаллов, 9 зерен (14%) оказались двойниками, в том числе один сложный двойник с двумя разными плоскостями двойникования и три полисинтетических двойника. На кристаллах представлены (в порядке убывания площади поверхности) следующие простые формы: октаэдр $\{111\}$, куб $\{100\}$, ромбододекаэдр $\{110\}$, тетрагонтриоктаэдры $\{311\}$, $\{433\}$, тригонтриоктаэдр $\{221\}$ (рис. 2.10, 2.11). Простые формы были определены с помощью параболического гониометра.

Не все указанные грани присутствуют на кристалле алмаза в течение его роста. Но грани октаэдра и куба отмечаются повсеместно. Учитывая форму крупных металлических включений, встречающихся хаотично, но в основном в пирамидах роста грани куба (рис. 2.12) и ромбододекаэдра (рис. 2.13), можно сделать вывод о том, что преимущественный рост алмаза происходит по дислокационному механизму. Дислокации развиваются главным образом по граням октаэдра. Грань куба при этом оказывается заторможенной в росте, возможно, по причине активного образования мостикововых связей $\text{Me}-\text{C}$ и адсорбции димеров $\text{C}-\text{C}$ (van Enckevort, 2001). Она растет за счет макроступеней, формирующихся на ребрах, смежных с гранями октаэдра. Заращение грани куба со стороны ребер подтверждается формой часто наблюдаемых плоских квадратных по форме включений расплава, рав-

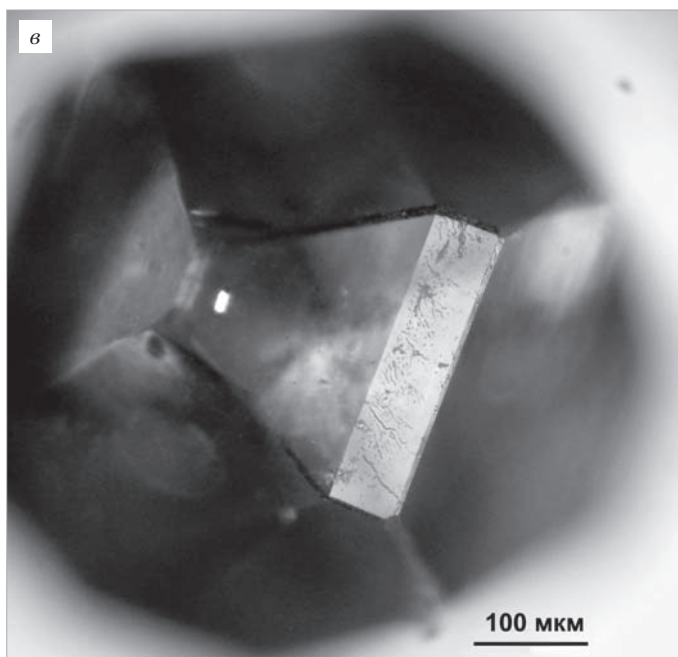
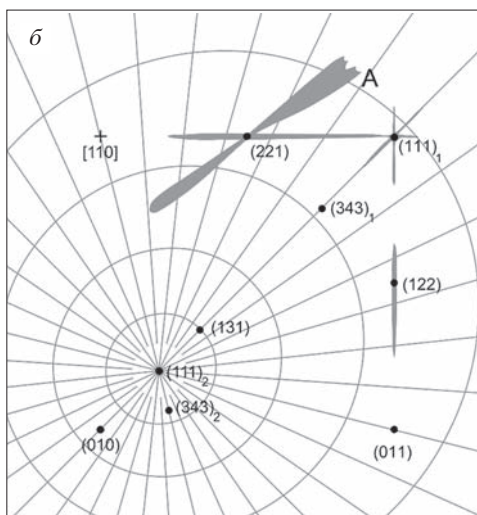
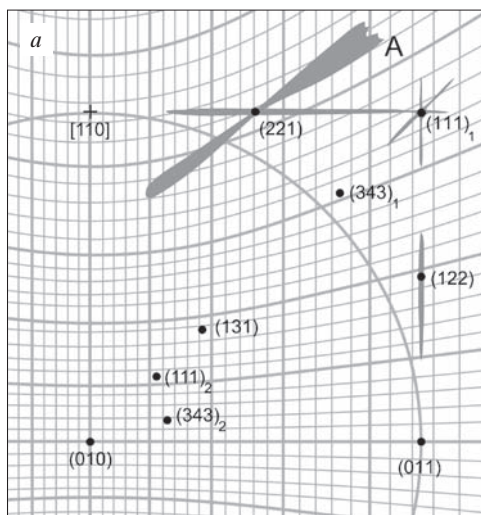


Рис. 2.11. Обобщенная кристаллографическая проекция на фоне двух сеток (*а, б*) формы синтетических алмазов, отражающая все основные рефлексы от синтетических кристаллов алмаза, изученных нами, и двойник алмаза комбинированной формы (*в*).

Пояснения см. в тексте

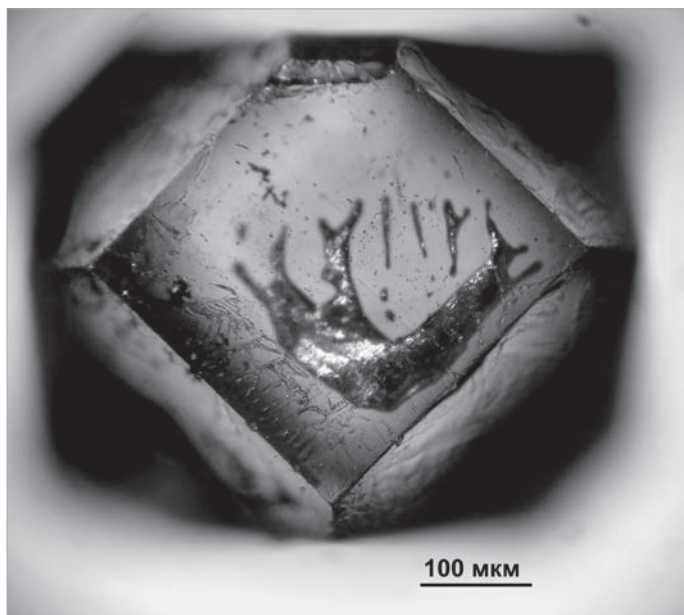


Рис. 2.12. Включение расплава металла на грани куба алмаза

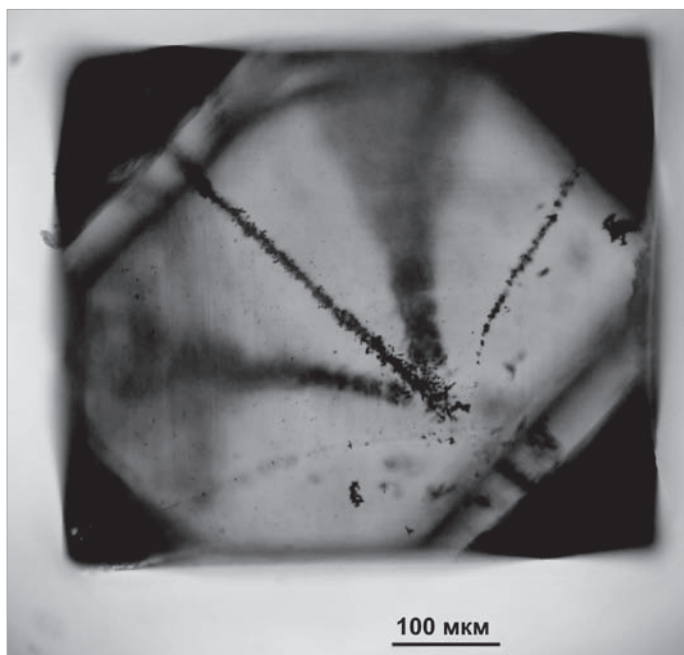


Рис. 2.13. Цепочки включений расплава в пирамидах роста грани ромбододекаэдра $\{110\}$

номерно отступающих от ребер с гранью октаэдра (см. рис. 2.12). Грань ромбододекаэдра захватывает расплавные включения гораздо активнее, чем грань куба (см. рис. 2.13). Около 30% кристаллов содержат характерные цепочки мелких включений металлического расплава в виде плоских лент, распространяющихся из области зародыша кристалла к поверхности и трассирующих пирамиды роста грани ромбододекаэдра (см. рис. 2.13).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в форме роста, по крайней мере, 1/3 кристаллов алмаза присутствуют три плоскогранные простые формы: октаэдр, куб и ромбододекаэдр. При этом большинство кристаллов (около 2/3) не имеют таких цепочек включений, что указывает на отсутствие ромбододекаэдра в форме роста таких алмазов начиная с самых ранних этапов развития кристалла.

По форме цепочек включений в алмазах можно проследить эволюцию комбинированной формы кристаллов в ходе роста (см. рис. 2.13). Ранее нами была использована треугольная диаграмма для описания эволюции формы кристаллов алюмокалиевых квасцов, относящихся к той же точечной группе симметрии $m\bar{3}m$, что и алмаз (Rakin, 1995; Ракин, 2003). Введен нормированный фактор формы кристалла, который является численным показателем изометричности формы:

$$Sf = \frac{(4\pi)^{1/2}}{(4\pi/3)^{1/3}} \frac{V^{1/3}}{S^{1/2}}. \quad (2.4)$$

При приближении формы кристалла к шару фактор формы стремится к единице и, наоборот, максимально удлиненные или уплощенные формы кристалла описываются стремящимся к нулю фактором формы. На треугольной диаграмме максимально изометричный (шаровидный) кристалл ($Sf = 0,9783$), ограненный тремя типами поверхностей – октаэдром, кубом и ромбододекаэдром, располагается вблизи центра, но ближе к вершине $\{011\}$ (рис. 2.14, *a*). Суммарные площади граней перечисленных форм составляют соответственно 27, 28 и 45%.

Согласно равновесной термодинамической теории зародышеобразования, энергия кристаллического зародыша состоит из суммы положительной «энергии поверхности» (энергии нескомпенсированных химических связей на поверхности кристалла) в окружении данной среды кристаллизации и отрицательной «энергии объема» (энергии установившихся связей между атомами внутри кристалла). «Энергия поверхности» зародыша превышает «энергию объема» по абсолютной величине, и критический зародыш кристалла обладает максимальной суммарной положительной энергией. Если флуктуации свободной энергии в системе достигают этого значения и превышают его, то в такой системе начинает развиваться зародышеобразование. Проблема формы критического зародыша при гомогенном зародышеобразовании в рамках термодинамической теории в литературе, как правило, не обсуждается. Известно только, что в случае гипотетического шарообразного критического зародыша его общая энергия составляет 1/3 поверхностной энергии.

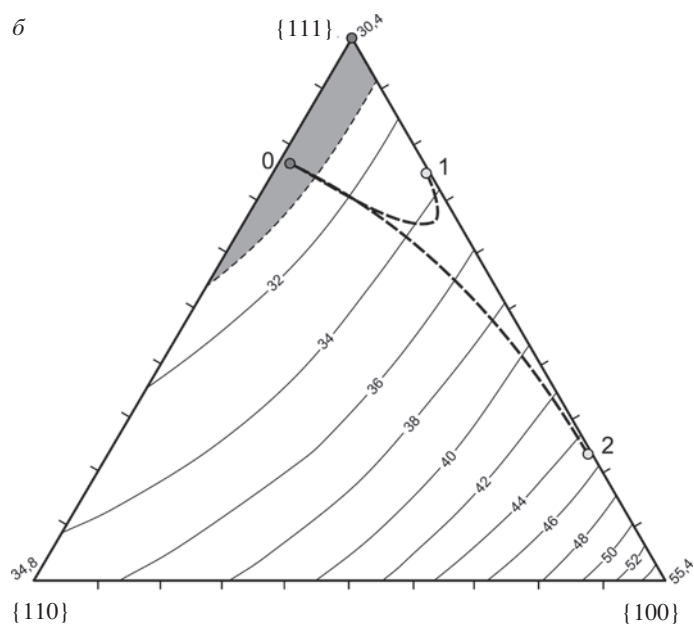
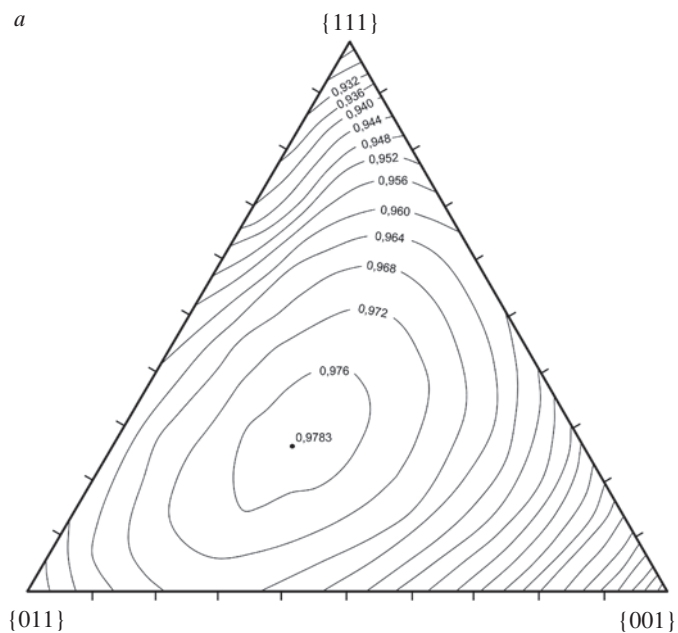


Рис. 2.14. Диаграмма тройной комбинированной формы алмаза: *a* – распределение фактора формы; *б* – распределение энергии поверхности кристалла комбинированной формы объемом 1 мм³ (мкДж). Пунктирные линии соответствуют двум основным трендам в эволюции тройной комбинированной формы для изученной выборки алмазов (0 – начальное состояние, 1 и 2 – конечные)

Рассмотрим три простые формы алмаза – октаэдр, ромбододекаэдр и куб. При равном объеме таких тел (возьмем, например, 1 мм³) поверхностные энергии, рассчитанные через энергию С–С-связи, в структуре алмаза составят соответственно 30,4, 34,8 и 55,4 мкДж. С помощью фактора формы (Sf) легко рассчитать поверхностную энергию кристаллов алмаза (ΔG_{Π}), обладающих всеми возможными сочетаниями перечисленных простых форм при фиксированном объеме кристалла:

$$\Delta G_{\Pi} = \sum \sigma_i \Pi_i, \quad \sum \Pi_i = \Pi_{\text{шар}} / Sf^2, \quad (2.5)$$

где Π_i – площадь граней i -й простой формы. Результаты расчетов для кристаллов объема в 1 мм³ отражены на треугольной диаграмме (рис. 2.14, б). Темным цветом показана область комбинированных форм, поверхностная энергия которых всего на 2% отличается от минимальной энергии поверхности октаэдрического кристалла – 30,4 мкДж. Повторим, что принятые в расчет удельные энергии поверхностей алмаза базировались на предположении о существовании некомпенсированных связей углерода на поверхности алмаза, что эквивалентно предположению о нахождении кристалла алмаза в вакууме. Однако на кристалле, находящемся в окружении вещества, служащего растворителем-катализатором, должны формироваться компенсаторные химические связи С–Ме, понижающие поверхностную энергию кристалла. Тем не менее энергия, затраченная на образование критического зародыша необходимого объема, будет минимальной для кристалла алмаза октаэдрического габитуса, что обеспечивает ему наивысшие шансы для дальнейшего роста. Рассчитывая общую энергию кристаллического зародыша, составляющую около 1/3 от энергии поверхности, приведенные выше 2% отклонения превращаются в 5–6%.

Статистические наблюдения показывают, что грани ромбододекаэдра алмаза, растущего из металлического расплава, обладают особым свойством: однажды образовавшись, они в ходе эволюции формы уже не исчезают и не выклиниваются в ребро. Такие кристаллы составляют 30% от общего числа. Возможно, эта черта связана с особым составом среды кристаллизации, в которой на гранях ромбододекаэдра активно формируются связи С–Ме, характерные для карбидов металлов и тормозящие послойный рост алмаза. На наш взгляд, более вероятно, что рост грани ромбододекаэдра в основном происходит за счет немногочисленных димеров С–С, встраивающихся в структуру алмаза параллельно единственной периодической цепи сильных связей, находящейся в плоскости (110), ориентированной по направлению $[\bar{1}10]$. Об особом механизме роста грани ромбододекаэдра свидетельствуют множественные включения металлической фазы в пирамиде роста этой грани. Согласно наблюдениям, цепочки включений не прерываются и транслируются из центра (зародыша) до конечной поверхности (см. рис. 2.13). Эволюция формы кристаллов, зародышами которых, вероятно, были алмазы с двойной комбинированной формой октаэдр-ромбододекаэдр или тройной октаэдр-ромбододекаэдр-куб, происходит обычно по направлениям, указанным условно пунктирными кривыми на диаграмме рис. 2.14, б. Выделяются два основных тренда: октаэдрический (1) и кубический (2), возможно связанные с текущими условиями синтеза. Для обеих

ветвей прослеживается одна главная тенденция – уменьшение относительных площадей граней ромбододекаэдра до минимального значения, но не до нуля. В качестве исходной точки эволюции форм (0) на диаграмме взята произвольная тройная комбинированная форма алмаза из выделенной области с минимальной поверхностной энергией.

Однако в исследованной совокупности кристаллов большинство представляет второй анатомический тип искусственного алмаза – кубооктаэдр (около 70%). В анатомии кристаллов не отмечены признаки присутствия пирамиды роста ромбододекаэдра, что позволяет сделать вывод об октаэдрической форме исходного критического зародыша. Грани куба появляются на таких кристаллах уже в ходе роста и обусловлены, скорее всего, накоплением примеси, ингибирующей движение ступеней по грани октаэдра. Конечная форма демонстрирует различные соотношения между площадями граней куба и октаэдра и позволяет также выделить два типа – октаэдрический и кубический – по преобладанию площадей граней. Грани ромбододекаэдра в анатомии данной категории алмазов не выявлены, кроме заключительной стадии эволюции, связанной с эффектами выключения.

Экспериментально наблюдаемая эмпирическая вероятность обнаружения кристаллов первого анатомического типа – кристаллов тройного комбинированного габитуса – позволяет утверждать, что форма зародыша алмаза попадает в определенную область на тройной диаграмме с минимально возможной поверхностной энергией кристалла алмаза, которую мы условно ограничили линией 2% (см. рис. 2.14, б). В зависимости от технологических особенностей выхода на режим выращивания алмазов эта область может иметь иные размеры. Однако она всегда должна включать точку октаэдра.

Ограниченность созданной нами выборки искусственных технических алмазов не позволяет делать обширные выводы относительно общей эволюции формы НРНТ-алмазов. Возможно, соотношение двух анатомических типов алмазов в пропорции 3:7 в изученной выборке обусловлено произвольным смешением кристаллов разных генераций (опытов), различающихся не только технологическими особенностями синтеза, но и вариациями состава сред кристаллизации. Тем не менее, по нашему мнению, разделение алмазов на два анатомических типа вполне допустимо. Учитывая, что вся закрашенная область на рис. 2.14, б, кроме единственной точки октаэдра, отражает форму зародыша первого анатомического типа кристалла алмаза (тройная комбинированная форма), а второй анатомический тип – кубооктаэдрический – развивается из точки (111) на диаграмме, кристаллы алмаза почти с равной вероятностью распределятся между двумя типами. Это наблюдение позволяет прийти к предположению, что реальная удельная поверхностная энергия всех обсуждаемых граней в расплаве металла меньше расчетной почти на порядок за счет образования связей С–Ме. Связи с атомами металлов одновременно повышают энергию активации роста грани, статистически уменьшая разницу в скоростях роста всех граней, чем обеспечивают существование комбинированной формы роста алмаза.

Большинство изученных синтетических кристаллов (более 50%) демонстрируют на поверхности граней фигуры, связанные с «эффектом выклю-

чения» (рис. 2.15). Известно, что при выходе из режима выращивания на поверхности грани алмаза отпечатываются скелетные кристаллы металлов (аустенита, перлита и других металлов и сплавов), расплавы которых служат растворителями и катализаторами в ходе роста алмаза (van Enckevort, 2001). При этом рост металлических кристаллов приводит к повышению концентрации растворенного углерода в остаточном расплаве. Равновесный коэффициент распределения углерода в железе (отношение равновесных концентраций углерода в металле и расплаве), при нормальном давлении, как известно, меньше единицы – при 1250 °С он составляет 0,47 (см., например: Диаграммы состояния..., 1986). Можно допустить, что и при высоком давлении коэффициент распределения углерода не превышает единицы, поэтому фигуры, связанные с «эффектом выключения», можно интерпретировать только как формы роста (см. рис. 2.15), что вполне естественно, учитывая хорошую сохранность других плоских и гладких участков граней октаэдра, куба и особенно ромбододекаэдра, присутствующих одновременно на многих кристаллах. Излишки растворенного углерода в расплаве приводят к ускорению роста алмазной фазы в местах сосредоточения остатков расплава с формированием макроступеней на гранях октаэдра и куба. Одновременно часть поверхности алмаза имеет сильно неравновесную криволинейную форму, образованную, вероятно, в ходе уменьшения площади расплава при движении границы смачивания, создавая на экране гониометра как лучистые рефлекссы, ориентированные перпендикулярно направлению удлинения скелетных кристаллов металла, так и лучи, распространяющиеся от рефлекса {111} по линиям тетрагонтриоктаэдра и тригонтриоктаэдра, обычно встречающиеся и на природных алмазах (см. рис. 2.11). В этот момент в форме роста начинают появляться грани дополнительных простых форм: тетрагонтриоктаэдров {311}, {433} и тригонтриоктаэдра {221}, относящиеся также к S-граням по теории Хартмана–Пердока. Форма {311} возникает на ребрах между гранями куба и октаэдра, {433} – чаще как макрогрань на sdвойникованных кристаллах, а на макроступенях, развивающихся по октаэдру, образуется форма {221}. Кроме того, на кристаллах второго анатомического типа на стадии выключения появляется грань ромбододекаэдра {110}.

Важно отметить, что формы {311} и {433} возникают на завершающей стадии кристаллизации алмаза, даже когда явных следов «эффекта выключения» в виде шероховатой поверхности не наблюдается. Но форма тригонтриоктаэдра {221} присутствует только на неровной поверхности алмаза при контактном росте алмаза с кристаллами металлов. Алмаз обрастает со всех сторон скелетными кристаллами металлов, и их ориентация, естественно, не связана со структурой алмаза. Отпечаток от них непрерывно транслируется с одной грани алмаза через ребро на другую грань (см. рис. 2.15). Часто на грани алмаза можно встретить индукционный шов от встречи двух эшелонов параллельно ориентированных скелетных кристаллов металла, распространяющихся в скрещивающихся направлениях (см. рис. 2.15, б). Штриховка грани алмаза, связанная с формой и ориентацией дендритов металлов, имеющих поперечное сечение меньше 20 мкм и ориентированных случайно относительно структуры алмаза, вызывает появле-

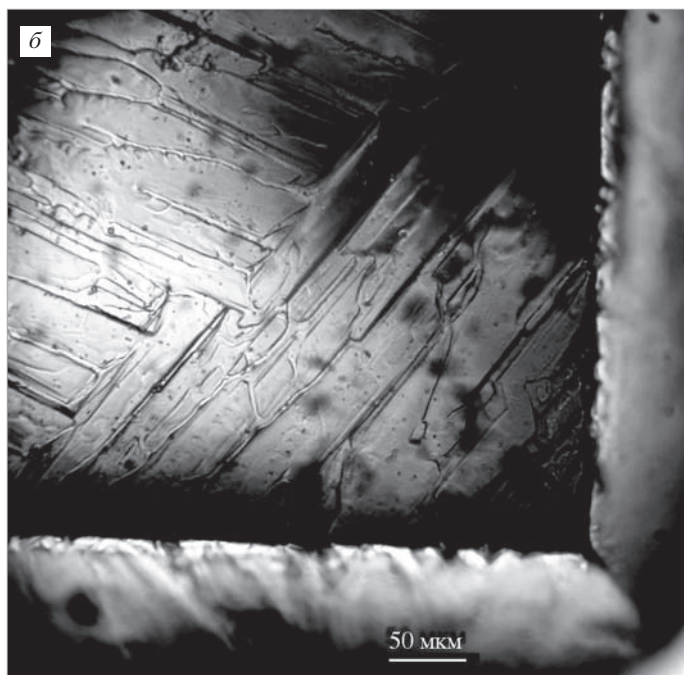
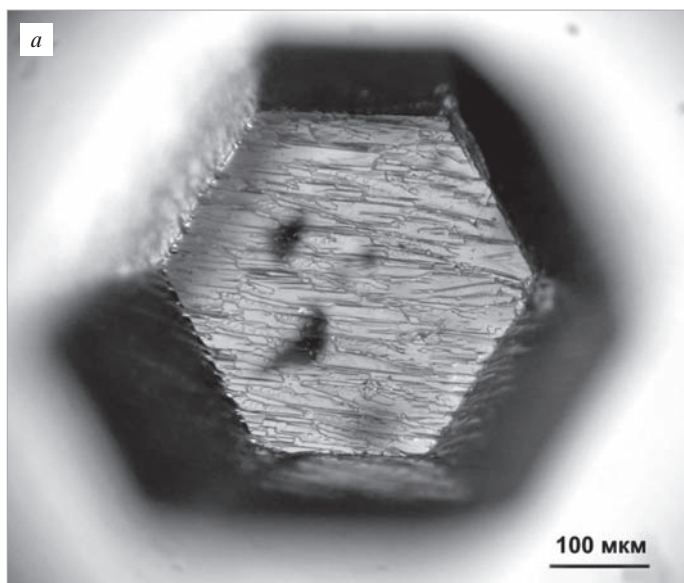


Рис. 2.15. «Эффект выключения». Отпечатки дендритов металла на кристалле алмаза:
a – грань октаэдра; *б* – грань куба

ние ортогональной интерференционной структуры А на экране параболического гониометра (см. рис. 2.11). При этом грань (221) отчетливо регистрируется как ясно различимый яркий точечный рефлекс протяженностью менее углового градуса, следовательно, ширина грани в самом узком месте должна быть не менее 30 мкм согласно обоснованным выше интерференционным ограничениям.

Грани тетрагонтриоктаэдра {433} шириной также не менее 30 мкм были встречены нами только на двойниках алмазов. Причем на обоих субиндивидах в двойниковом сростке они обнаруживаются одновременно и легко диагностируются по двугранному углу 8° между рефлексами (111) и (343). По всей видимости, это простое совпадение и грани {433} не связаны собственно с двойникованием. На рис. 2.11, а показаны две грани тетрагонтриоктаэдра {433}, принадлежащие двум субиндивидам, находящимся в двойниковом положении (номера субиндивидов отмечены нижними индексами). Напомним, что ориентации октаэдра (111) двойника и грани (151) первого субиндивида совпадают. Но поскольку грань (111) – основная форма роста (F-грань), а (151) является К-гранью и никогда не была замечена на алмазах, то рефлекс в положении (151) на экране гониометра можно интерпретировать только как рефлекс от грани (111) двойника.

Зададимся важным и принципиальным вопросом: рост кристаллов алмаза на стадии выключения происходит в области стабильности структуры алмаза или графита? Если установка для высокопараметрического синтеза алмазов допускает сохранение высокого давления при плавном понижении температуры, то стабильность структуры алмаза обеспечена и после кристаллизации металлической фазы. Однако, если давление падает быстрее, чем понижается температура, а точнее, много быстрее чем 3 МПа/°С, что следует из наклона линии равновесия алмаз–графит (Bundy et al., 1996), то вполне вероятно, что заключительная стадия кристаллизации алмаза при росте дендритов металлов протекает уже в области стабильности графита. Сверхвысокие пересыщения углерода, достигаемые при дендритной кристаллизации металла-растворителя, допускают рост метастабильной алмазной фазы и одновременный более интенсивный рост графита. Причем кристаллизация графита аналогично может происходить одновременно с ростом алмаза в области стабильности структуры алмаза. Можно допустить, что появление новых, нехарактерных для основного режима роста форм тетрагонтриоктаэдров {311}, {433} и тригонтриоктаэдра {221} в габитусе алмаза можно считать признаком синтеза алмаза в указанных условиях метастабильности структуры. Однако эта гипотеза требует экспериментальной проверки.

Известно, что сверхвысокие пересыщения, реализуемые локально на поверхности алмаза, используются в технологии CVD-синтеза, а условия кристаллизации далеки от поля стабильности структуры алмаза (Pierson, 1993; Properties..., 2001). Известно также, что при CVD-синтезе на алмазе не встречаются описанные выше новые формы тетрагонтриоктаэдров {311}, {433} и тригонтриоктаэдра {221}. Возможно, что их отсутствие связано с малым давлением и газовой средой кристаллизации при CVD-синтезе в отличие от конденсированной фазы в случае HPHT-синтеза.

Если кристаллизация алмаза на стадии выключения происходит в метастабильных условиях, формирование S-граней указывает на достижение стационарных условий роста, что является важным моментом для понимания кинетики роста алмаза при высоких параметрах. При этом К-границы, не содержащие цепей сильных связей, во внешней ростовой огранке искусственных кристаллов алмаза не обнаружены. Применимость теории Хартмана и Пердока косвенно указывает на факт достижения локальных «квазиравновесных» условий на основном этапе выращивания алмаза. На этапе выключения стационарный режим оказался сходен с «квазиравновесными» условиями. Криволинейные поверхности, обнаруженные на алмазах, обусловлены эффектом стягивания капли пересыщенного углеродом расплава и не могут рассматриваться как К-границы в рамках теории периодических цепей сильных связей.

Исследование микро- и наноразмерных ямок травления на гранях куба искусственных кристаллов методом АСМ показало, что крупные, более 4 мкм в диаметре, ямки, демонстрирующие террасы на склонах, обусловлены окислительным травлением по линейным дислокациям (Ракин, Пискунова, 2012). Ямки меньших размеров огранены плоскими сетками октаэдра и коррелируют с приповерхностными включениями металла в структуре алмаза. Их «равновесная» форма указывает на достижение минимума поверхностной энергии при окислительном удалении напряженного дефектного участка структуры. В рамках этой гипотезы наноразмерные ямки (30–70 нм) иллюстрируют незавершенный процесс удаления включения из структуры алмаза.

Таким образом, рост искусственных алмазов при высоких P – T -условиях достигает стационарной стадии как на этапе основного роста, так и на этапе выключения. Присутствие только кристаллографически значимых граней в морфологии искусственных алмазов указывает на режим роста, лимитированный кинетикой поверхностных процессов.

3.1. ТЕНЗОР УСТОЙЧИВОСТИ ХИМИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛА

3.1.1. Модель диффузионного растворения

Существование криволинейных поверхностей на кристаллах в ходе неравновесного процесса растворения в диффузионно-лимитированном режиме можно теоретически обосновать, если ввести особую динамическую кристаллофизическую характеристику кристалла – тензор устойчивости химических связей между атомами (молекулами, комплексами – строительными единицами) на поверхности кристалла. Рассмотрим модель диффузионного растворения.

Будем считать, что в кристаллорастворяющей среде нет конвективных течений и все процессы массопереноса происходят за счет диффузии. Введем тензор устойчивости согласно следующему определению. Плотность потока вещества, растворяющегося с кристалла $\mathbf{J}$ (индуцированный вектор), можно связать с плотностью диффузионного потока вещества в среде $\mathbf{J}_D$ (заданный вектор):

$$\mathbf{J} = \mathbf{T}\mathbf{J}_D, \quad (3.1)$$

где $\mathbf{T}$ – тензор устойчивости, выражающий связь между векторами. Вектор потока диффузии определяется градиентом концентрации в среде по закону Фика, а вектор потока растворения направим по нормали к поверхности кристалла (условие нормального растворения) (Ракин, 2010, 2011). Компоненты векторов и тензора связаны уравнением $J_i = \sum_j T_{ij} J_{Dj}$.

Часто принимают как очевидное, что в диффузионных условиях роста или растворения кристалла градиент концентрации в среде в непосредственной близости к поверхности всегда направлен по нормали к ней. Однако это заблуждение и градиент концентрации у поверхности кристалла может обладать значительной тангенциальной компонентой, что подтверждается многочисленными интерферометрическими наблюдениями концентрационного поля вокруг растущего или растворяющегося кристалла (Современная кристаллография, 1980; Ракин, 1990).

Обоснуем введение тензора устойчивости.

Растворение кристалла непосредственно связано с переносом вещества в кристаллорастворяющей среде. Движущей силой диффузионного переноса вещества – плотности потока диффузии (вектор) – в сплошной среде яв-

ляется градиент его концентрации (вектор) согласно уравнению Фика:

$$\mathbf{J}_D = -D \nabla c, \quad (3.2)$$

где D – коэффициент диффузии вещества (скалярная величина), ∇ – оператор Гамильтона (вектор). Растворение кристалла определяется разностью химических потенциалов основного компонента (растворяющегося вещества) в кристалле и среде (растворе), прилегающей к поверхности кристалла, $-\Delta\mu$, которую обычно называют движущей силой растворения. Ее можно выразить через логарифм разности активностей основного компонента в среде кристаллизации:

$$\Delta\mu = RT \ln(a_0 - a_c),$$

где a_0 – активность компонента в насыщенном, равновесном к кристаллу среде, a_c – активность компонента в растворяющей среде непосредственно у поверхности кристалла. Связь между концентрацией c и активностью a осуществляется через коэффициент активности: $a = \gamma c$.

При малых отклонениях от термодинамического равновесия можно считать, что вектор плотности потока растворенного с кристалла вещества линейно зависит от разности активностей и направлен по нормали к поверхности кристалла:

$$\mathbf{J} = b(a_0 - a_c)\mathbf{n},$$

где b – кинетический коэффициент растворения, $\mathbf{n}$ – единичный вектор нормали к поверхности.

Необходимым условием – макроскопической причиной растворения кристалла – можно считать диффузионный перенос вещества от кристалла в глубь среды, обеспечивающий уменьшение активности (концентрации) основного компонента в среде у поверхности кристалла, что вызывает поток растворенного вещества $\mathbf{J}$. Поэтому функциональную зависимость между двумя векторами $\mathbf{J}$ и $\mathbf{J}_D$ можно феноменологически выразить в форме векторного уравнения (3.1).

Одновременно с ним на поверхности кристалла должно выполняться скалярное уравнение баланса вещества:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J}_D = P, \quad (3.3)$$

где $\nabla \cdot \mathbf{J}_D$ – дивергенция плотности потока диффузии. В правой части выражения (3.3) записано производство вещества, которое представляет собой скалярный инвариант тензора производной векторного поля плотности потока растворения $\mathbf{J}$ по направлению нормали к поверхности кристалла

$$P = \nabla_n \cdot \mathbf{J}.$$

Вектор плотности потока нормального растворения, рассчитываемый на единицу площади поверхности кристалла, определим через линейную скорость растворения по направлению нормали к поверхности кристалла выражением

$$\mathbf{J} = \frac{dm}{dSdt} \mathbf{n} = -\rho \mathbf{v},$$

где dm – масса растворенного вещества с площади поверхности dS кристалла за время dt , ρ – плотность кристалла, $\mathbf{v}$ – нормальная скорость растворения кристалла. Вектор нормали к поверхности определяется направляющими косинусами:

$$\mathbf{n} = \cos\alpha_1 \mathbf{i} + \cos\alpha_2 \mathbf{j} + \cos\alpha_3 \mathbf{k},$$

где $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ – орты осей системы координат.

Производство вещества определяет его количество, оказавшееся в растворе за единицу времени, которое при растворении изотропного тела можно представить в следующем виде:

$$P = dm/dSdrdt.$$

Однако растворение кристалла (как и его рост) благодаря наличию кристаллической структуры является анизотропным процессом. Анизотропия растворения кристалла, реализованная в форме скалярного производства вещества (размерность – $[M] \cdot [L]^{-3} \cdot [t]^{-1}$), может быть выражена различными способами с помощью компонентов тензора производной вектора $\mathbf{J}$ по вектору $d\mathbf{r}$:

$$\frac{d\mathbf{J}}{d\mathbf{r}} = \left\{ \frac{dJ_i}{dx_k} \right\}. \quad (3.4)$$

Например, самым простым из инвариантов тензора (3.4), не зависящим от системы координат, будет сумма его диагональных элементов, имеющих смысл дивергенции вектора потока растворения:

$$P = \sum_k \frac{\partial J_k}{\partial x_k} = \nabla \cdot \mathbf{J}. \quad (3.5)$$

Учитывая, что инвариантов тензора (3.4) бесконечное множество, можно допустить разные виды представления производства вещества в уравнении (3.3). Однако для нормального растворения, как мы определили, важно направление нормали к поверхности. В этом случае производная вектора $\mathbf{J}$ по выделенному вектору $\mathbf{n}$ будет вектором:

$$\frac{\partial \mathbf{J}}{\partial \mathbf{n}} = (\mathbf{n} \cdot \nabla) \mathbf{J} = \left(\sum_l \cos\alpha_l \frac{\partial J_l}{\partial x_l} \right) \mathbf{i} + \left(\sum_l \cos\alpha_l \frac{\partial J_2}{\partial x_l} \right) \mathbf{j} + \left(\sum_l \cos\alpha_l \frac{\partial J_3}{\partial x_l} \right) \mathbf{k}. \quad (3.6)$$

Для того чтобы получить скалярное выражение производства вещества, надо взять проекцию вектора (2.6) на выделенное направление $\mathbf{n}$:

$$P = \mathbf{n} \cdot \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial \mathbf{n}} = \sum_{i,j} \cos\alpha_i \cos\alpha_j \frac{\partial J_i}{\partial x_j}. \quad (3.7)$$

С учетом важности направления производство вещества в правой части формулы (3.3), скорее, следует записывать в форме (3.7), а не (3.5) или ином виде.

Вдали от кристалла в растворяющей среде выполняются уравнение диффузии Фика (3.2) и уравнение баланса вещества с равной нулю правой частью:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{J}_D = 0, \quad (3.8)$$

которые при удалении от единичного кристалла описывают формирование центрально-симметричного диффузионного поля.

Система четырех дифференциальных уравнений в неподвижной системе координат, записанных для поверхности кристалла ((3.1), (3.3)) и среды ((3.2), (3.8)), определяет процесс растворения в системе кристалл–среда в диффузионных условиях. Однако в них неявно скрыта классическая задача Стефана о фазовом переходе на движущейся границе (уравнения (3.1) и (3.3) выполняются на перемещающейся поверхности кристалла). Поэтому для решения такой модели необходимо дополнить приведенную систему уравнений условиями, в которых должна быть введена в явном виде линейная скорость перемещения границы фаз. Например, одномерная задача диффузии вещества в системе координат, связанной с границей фаз, движущейся со скоростью V по направлению x , может быть записана в виде

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D\Delta c + V\frac{\partial c}{\partial x}, \quad (3.9)$$

где Δ – оператор Лапласа. Когда скорость движения границы фаз мала, то можно не учитывать движение границы фаз. Но эту особенность модели следует специально оговаривать.

Если в кристаллорастворяющей среде нет конвективных течений, суммарный поток вещества, «стекающего» с кристалла, больше диффузионного потока в среде, идущего от поверхности кристалла, на величину скорости прироста количества растворенного вещества в среде. Градиент концентрации вещества в среде обеспечивает непрерывный диффузионный поток и в конечном счете сохранение движущей силы процесса растворения (разность химических потенциалов) на поверхности кристалла. Уже на небольшом удалении от растворяющегося монокристалла вокруг него формируется нестационарное, центральное, сферически симметричное поле диффузии, в котором вектор плотности потока $\mathbf{J}_D$ направлен по радиусу от центра кристалла, а его модуль в первом приближении обратно пропорционален квадрату радиуса.

В итоге в механизме растворения главным можно считать диффузионный перенос вещества от кристалла в глубь среды, все потоки вещества сбалансированы и нет необходимости выделять специально кинетический или диффузионный режимы растворения.

Приведенная модель называется диффузионной только потому, что диффузия определяет непрерывность растворения. При этом кинетика то-

же играет важную роль, поскольку градиент концентрации в пограничном слое у поверхности кристалла напрямую зависит от скорости топохимической реакции и кинетического коэффициента растворения. В целом потоки вещества в системе сбалансированы.

3.1.2. Свойства тензора устойчивости

Тензор T второго ранга назван нами тензором устойчивости химических связей атомов на поверхности кристалла, хотя по физическому смыслу, заложенному в исходном выражении (3.1), он определяет, скорее, свойство «податливости» структуры кристалла активному воздействию растворяющей среды. Однако при смене знака векторов и, следовательно, переходе от растворения к росту кристалла тензор будет определять истинное свойство «устойчивости» структуры кристалла. В компонентах тензора фиксируется не только различие в энергетических характеристиках химических связей между атомами, находящимися внутри кристалла и на его поверхности, но и в ориентации этой поверхности относительно структуры кристалла. Тензор представляет собой особую кристаллофизическую характеристику, реализующуюся только на поверхности кристалла и в неравновесных условиях. Для алмаза, обладающего высокой симметрией структуры, кристаллофизический тензор второго ранга T_{ij} должен быть симметричным и полярным с шестью независимыми компонентами (Современная кристаллография, 1981). Но не все шесть компонентов тензора будут фактически независимы. Для тензора второго ранга можно построить его характеристическую поверхность, являющуюся поверхностью второго порядка:

$$\sum_{i,j} T_{ij} x_i x_j = 1. \quad (3.10)$$

Среди всех возможных поверхностей второго порядка в декартовом трехмерном пространстве выражением (3.10) можно описать пять типов поверхностей: эллипсоид, однополосный гиперболоид, эллиптический и гиперболический цилиндры, а также пару параллельных плоскостей. В общем случае, если компоненты тензора выражаются мнимыми числами, то к перечисленным типам поверхностей добавляются двухполосный гиперболоид и три типа поверхностей, которые нельзя представить геометрически – мнимый эллипсоид, мнимый эллиптический цилиндр и пара мнимых параллельных плоскостей.

С учетом того, что по определению вектор плотности потока растворения $\mathbf{J}$ всегда направлен по нормали к поверхности, форма кристалла должна совпадать с характеристической поверхностью тензора устойчивости (3.10).

В ходе растворения изменяются условия процесса, соответственно меняются форма кристалла и компоненты тензора. В итоге кристалл приобретает некоторую предельную форму. Поэтому компоненты тензора также должны достигать предельных значений, общих для всей поверхности кристалла.

При безроторном поле диффузии, выбрав подходящую систему координат, уравнение (3.10) можно представить в наиболее простом виде:

$$T_1x_1^2 + T_2x_2^2 = T_3x_3^2 = 1. \quad (3.11)$$

Такая система координат называется главной системой координат тензора, и в ней тензор устойчивости алмаза представляется диагональной матрицей:

$$T_{ij} = \begin{vmatrix} T_1 & 0 & 0 \\ 0 & T_2 & 0 \\ 0 & 0 & T_3 \end{vmatrix}, \quad (3.12)$$

где диагональные компоненты T_i могут принимать разные значения, включая ноль. Главная система координат тензора устойчивости в общем случае не совпадает с кристаллографической системой координат и может быть ориентирована по-разному в зависимости от условий процесса. В случае центрального и безроторного поля развитого процесса диффузии компоненты тензора (3.12) могут принимать только положительные значения и ноль. В этом случае уравнение (3.11) описывает выпуклые поверхности (кривизна в любом направлении отрицательная). Если в системе только начинается формироваться диффузионный перенос, то для начальных стадий процесса некоторые компоненты тензора могут временно принимать отрицательные значения и поверхность (3.11) в этих направлениях будет иметь положительную кривизну (вогнутость).

Развитый процесс радиального центрально-симметричного массопереноса в среде и связанное с ним растворение приводят к тому, что открытая поверхность кристалла будет обладать отрицательной кривизной, и только в ямах, бороздах и на сложном блочном рельефе кристалла возможно существование фрагментов вогнутых участков поверхности.

3.2. ПОВЕРХНОСТИ РАСТВОРЕНИЯ НА КРИСТАЛЛЕ АЛМАЗА

Рассмотрим последовательно все виды поверхностей второго порядка, обнаруженные нами на кристалле алмаза. Важным свойством поверхностей второго порядка, отличающим их от поверхностей более высокого порядка, является достаточно равномерная или монотонно изменяющаяся от одного края к другому освещенность рефлекса на экране параболического гониометра. Заметим также, что форма рефлекса на гномонической проекции определяется не только уравнением, но и симметрией кристалла. Одна элементарная криволинейная поверхность, находящаяся в фундаментальной области, размножается операциями симметрии структуры алмаза на несколько симметричных граней, замыкающих криволинейный полиэдр алмаза. Линии пересечений элементарных криволинейных поверхностей являются ребрами полиэдра.

3.2.1. Параллельные плоскости

Тензор в главной системе координат описывается только одним положительным ненулевым компонентом:

$$T_{ij} = \begin{vmatrix} T_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}. \quad (3.13)$$

Характеристической поверхностью данного тензора в главных осях будет система двух параллельных плоскостей $T_1 x^2 = 1$, отстоящих от начала координат на расстояние $A_1 = 1/\sqrt{T_1}$. Для алмаза такими поверхностями могут быть, например, наиболее распространенные грани октаэдра $\{111\}$ (О). Параметр A_1 выражает так называемое центральное расстояние до граней простой формы.

Тензором устойчивости вида (3.13) можно описать растворение или рост кристалла в поле одномерной диффузии, возникающем вблизи бесконечной плоскости кристалла при отклонении от равновесия. Если в некоторой системе координат бесконечная растворяющаяся поверхность будет представлять собой плоскость $x = A_1$, то распределение концентрации в окружающей кристалл среде с началом растворения можно выразить как одномерную функцию $C(x)$. Систему уравнений (3.1)–(3.3), (3.8) можно преобразовать в одномерную задачу. Напомним, что уравнения (3.1) и (3.3) выполняются на движущейся границе фаз.

Даже в трехмерном случае тензор (3.13) может существовать, например, при очень малой скорости растворения, что и происходит с гранями октаэдра кристалла алмаза.

Перейдя к кристаллографической системе координат, для граней октаэдра $\{111\}$ получим тензор устойчивости (3.13) также в симметричной форме:

$$T_{ij} = \begin{vmatrix} T_1/3 & -T_1/3 & -T_1/3 \\ -T_1/3 & T_1/3 & T_1/3 \\ -T_1/3 & T_1/3 & T_1/3 \end{vmatrix}, \quad (3.14)$$

в которой независимым остается один компонент. Матрица перехода определяется поворотом главной системы координат вокруг оси $[01\bar{1}]$ на угол $54^\circ 44'$. Для получения всех восьми граней октаэдра из одной пары плоскостей с индексами Миллера (111) и $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ необходимо воздействовать на них операциями симметрии структуры алмаза $m\bar{3}m$ (достаточно действия четырехных осей симметрии алмаза).

Растворение алмаза в природных условиях начинается с формы октаэдра, и его плоские грани долго сохраняются в габитусе растворяющегося кристалла. Грань октаэдра, по всей видимости, не растворяется по нормали-

ному механизму, а растворение начинается с ребер и через ямки травления обратнопараллельной ориентации, расположенные по ослабленным дислокациями областям грани октаэдра. Если даже растворение грани октаэдра происходит медленно, послойно через тангенциальное движение элементарных ступеней, макроскопически такой процесс можно представить как нормальное растворение. Способность грани октаэдра длительно сохраняться в ходе растворения позволяет включить ее в число форм растворения алмаза как составную часть комбинированной формы растворения. Здесь важно отметить, что компонент T_1 тензора не выражает непосредственно скорость растворения кристалла. С ней связан поток вещества J , «стекающий» с кристалла. Однако, чем больше компоненты тензора, тем большие значения будет принимать вектор потока вещества при одном и том же поле диффузии.

Формально любую плоскую грань кристалла алмаза, имеющего центр инверсии (грань куба, ромбододекаэдра, тригонтриоктаэдра и др.), можно описать поверхностью второго порядка (3.10) и соответственно приписать ей некий тензор устойчивости. Однако физический смысл такого тензора в неравновесных условиях необходимо определить. Если при растворении тензор T имеет смысл податливости структуры растворяющему воздействию среды, то при росте отражает некоторое свойство «сродства» к среде кристаллизации.

Меняя направления потоков вещества на противоположные, получим описание нормального роста кристалла в неравновесных условиях. Ненулевые компоненты тензора устойчивости при этом сохраняют свои знаки, и тип поверхности кристалла принципиально не меняется. Получим тензор устойчивости (3.13), описывающий рост кристалла плоскими гранями. Такая модель роста может иметь право на существование, если учесть, что встраивание частиц в структуру кристалла, согласно общепринятым в теориях роста кристаллов представлениям, происходит не сразу, а через промежуточные процессы адсорбции и двумерной диффузии частицы по поверхности кристалла, которые не учитываются в рамках нашей феноменологической модели. Усложнение модели возможно, но не имеет смысла, поскольку элементарный механизм роста кристалла не будет иметь решающего значения. В частности, наиболее распространенный в природе дислокационный механизм роста с промежуточными процессами адсорбции и хаотической поверхностной миграцией частиц феноменологически не будет отличаться от механизма прямого встраивания при нормальном росте. Подчеркнем, что тензор устойчивости нами введен как макроскопический феномен, отражающий взаимодействие кристалла и среды, и, таким образом, он может быть применен также и для роста кристалла плоскими гранями. Более того, возможен предельный переход от плоских граней растущего кристалла через плоскогранную равновесную форму к начальной плоскогранной форме растворения. Только при термодинамическом равновесии смысл тензора устойчивости не может быть определен уравнением (3.1), поскольку в нем оба потока равны нулю. Но уже при бесконечно малом отклонении от равновесия в области пересыщения или недосыщения уравнение (3.1) вступает в силу.

Любая плоскогранная форма роста будет определяться своим тензором устойчивости (3.13) с единственным ненулевым компонентом в главной системе координат, и при переходе к кристаллографической системе координат тензор будет иметь свой особенный вид.

В частности, в кристаллографической системе координат грани куба (гексаэдра) являются характеристической поверхностью тензора вида (3.13), а ромбододекаэдра – характеристической поверхностью тензора

$$T_{ij} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5T_1 & 0,5T_1 \\ 0 & 0,5T_1 & 0,5T_1 \end{vmatrix}, \quad (3.15)$$

Ненулевой компонент T_1 для всех перечисленных простых форм октаэдра, куба и ромбододекаэдра имеет разные значения и косвенно влияет на соответствующие скорости роста.

При росте кристалла по дислокационному механизму на его гранях часто формируются вицинальные дислокационные пирамиды, образованные плоскими субгранями, наклоненными к рациональной кристаллографической грани под углом обычно менее 1° . Образование хорошо ограненной вицинальной пирамиды на растущей грани связывают с большим значением коэффициента поверхностной диффузии строительных единиц (Современная кристаллография, 1980). Вицинальную грань можно описать тензором, имеющим в главной системе координат общий вид (3.13), но при переходе в кристаллографическую систему координат тензор изменится.

Пусть на грани октаэдра кристалла алмаза при росте должна формироваться трехгранная дислокационная вицинальная пирамида и ее ориентация такова, что вицинальные грани принадлежат простой форме тригонтриоктаэдра $\{hhl\}_{h>1}$, например $\{40.40.39\}$. В таком случае параметрами, определяющими рост кристалла алмаза октаэдрического облика посредством указанной пирамиды, станет ненулевой компонент T_1 тензора устойчивости вида (3.13) и угол поворота $\alpha = 55^\circ 25'$ главной системы координат тензора, на доли градуса превышающий угол $54^\circ 44'$ и зависящий от степени неравновесности системы кристалл–среда. Искомый тензор в кристаллографической системе координат приобретает следующие компоненты:

$$T_{ij} = \begin{vmatrix} T_1' \cos^2 \alpha & -T_1' \sin \alpha \cos \alpha / \sqrt{2} & -T_1' \sin \alpha \cos \alpha / \sqrt{2} \\ -T_1' \sin \alpha \cos \alpha / \sqrt{2} & T_1' \sin^2 \alpha / 2 & T_1' \sin^2 \alpha / 2 \\ -T_1' \sin \alpha \cos \alpha / \sqrt{2} & T_1' \sin^2 \alpha / 2 & T_1' \sin^2 \alpha / 2 \end{vmatrix}, \quad (3.16)$$

близкие к компонентам тензора (3.14). При этом компоненты T_1' тензора для вицинальной субграни (3.16) и самой октаэдрической грани T_1 (3.14) не обязательно должны быть равны. Скорость роста кристалла будет во многом определяться углом наклона вицинальной грани относительно базовой октаэдрической грани $\Delta\alpha = 41'$. На кубических кристаллах алюмокалиевых

квасцов, имеющих ту же точечную группу симметрии структуры $m\bar{3}m$, что и алмаз, ранее нами было показано, что квадратичная зависимость скорости роста от пересыщения обеспечивается только изменением угла наклона субграни $\Delta\alpha$ относительно базовой кристаллографической поверхности (111) в достаточно широком интервале пересыщений (Ракин, 2003). При этом скорость тангенциального распространения элементарной ступени на грани октаэдра остается практически постоянной. Возможно, аналогичная закономерность соблюдается и на гранях алмаза при высокопараметрических условиях, поэтому скорость роста будет определяться только параметром $\Delta\alpha$.

Операции симметрии алмаза $m\bar{3}m$ размножают пару вицинальных граней, являющихся характеристической поверхностью тензора (3.16), на 24 субграни восьми вицинальных пирамид, расположенных на всех октаэдрических гранях. На грани куба в процессе дислокационного роста алмаза также возможно образование четырехгранных вицинальных пирамид, грани которых кристаллографически соответствуют тетрагонтриоктаэдру $\{hhl\}_{h<1}$ и должны описываться также тензором вида (3.16), только с очень малым значением угла α .

Таким образом, число параметров, описывающих ростовой вицинальный рельеф граней растущего кристалла, возрастает до двух – T_1 и угол α .

3.2.2. Эллиптический цилиндр

В главной системе координат присутствуют только два ненулевых компонента тензора:

$$T_{ij} = \begin{vmatrix} T_1 & 0 & 0 \\ 0 & T_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}, \quad (3.17)$$

где примем, что $T_2 > T_1$.

Характеристическая поверхность тензора (3.17) – эллиптический цилиндр – описывается уравнением

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} = 1,$$

где $A_i = 1/\sqrt{T_i}$ – полуоси эллиптического цилиндра. Эллиптический цилиндр является начальной формой растворения октаэдра.

Эллиптический цилиндр своим происхождением обязан полю двумерной диффузии. Если рассмотреть две полубесконечные грани кристалла, смыкающиеся на одном бесконечном ребре, то растворение кристалла начинается с ребра и распределение концентрации в среде можно описать функцией от двух пространственных переменных в системе координат, связанной с плоскостью, перпендикулярной ребру. Все основные уравнения модели растворения легко преобразуются в двумерную задачу.

Тензор устойчивости (3.17) для поверхности, формирующейся на ребре между гранями октаэдра в кристаллографической системе координат алмаза, описывается следующим образом:

$$T_{ij} = \begin{vmatrix} T_1/2 & 0 & T_1/2 \\ 0 & T_2 & 0 \\ T_1/2 & 0 & T_1/2 \end{vmatrix}. \quad (3.18)$$

Поворот главной системы координат в кристаллографическую систему координат происходит вокруг оси $[010]$ на угол 45° . Цилиндр присутствует в габитусе природного кристалла алмаза только в комбинации с гранями октаэдра.

Октаэдр с закругленными ребрами характеризует начальную стадию растворения алмаза и описывается двумя видами элементарных поверхностей, связанными с тензорами вида (3.14), (3.18) и размноженными операциями симметрии точечной группы кристалла алмаза: 8 плоских фрагментов граней октаэдра дополняются 12 узкими криволинейными поверхностями эллиптического цилиндра. В местах сопряжения смежных поверхностей октаэдра и цилиндра на природном алмазе, согласно гониометрическим измерениям, ребро не наблюдается. Поэтому здесь выполняется условие непрерывности касательной к поверхности. Из этого условия можно получить аналитическое уравнение, связывающее все ненулевые компоненты тензоров (3.14), (3.18) через дополнительный параметр, отражающий степень растворения ребер. Отсутствие ребра на стыке поверхностей приводит к тому, что скорость растворения при переходе от одного типа поверхности к другому меняется непрерывно, без скачка. Можно убедиться, что в начале растворения кристалла октаэдра между компонентами тензора (3.17) справедливо неравенство $T_2 \gg T_1$.

Однако расчет параметров эллиптического цилиндра только по гномонической проекции невозможен. Оценить отношение T_2/T_1 удастся по относительной ширине цилиндрической поверхности на реальном ребре октаэдра алмаза. Решение такой задачи планиметрии несложно, однако формулы достаточно громоздки и по этой причине здесь не приводятся. Заметим, что эллиптический цилиндр в теоретическом пределе превращается в круговой ($T_2 = T_1$), когда грани октаэдра на кристалле сжимаются в точку. Но такой предельный случай никогда не реализуется, поскольку цилиндр довольно быстро трансформируется в другую поверхность растворения.

Полный комплекс цилиндрических поверхностей на кристалле алмаза в результате действия операций симметрии насчитывает 12 протяженных фрагментов на месте ребер и 24 небольшие треугольные по облику криволинейные грани на вершинах октаэдра (рис. 3.1). Последние поверхности, согласно кристаллографической терминологии, образуют форму криволинейного тетрагонтриоктаэдра. Они чаще проявляются на стенках четырехгранных ямок травления или при растворении пирамид регенерации, локализованных у выхода четверной оси из кристалла. Криволинейный тетрагонтриоктаэдр растворения редко сохраняется на крис-

Рис. 3.1. Начало растворения кристалла алмаза.
Образование поверхностей цилиндра

таллах алмаза, поскольку формируется на наиболее выдающихся участках кристалла и поэтому максимально подвержен механическому износу.

3.2.3. Эллипсоид

Тензор, характеристическая поверхность которого описывается уравнением эллипсоида (3.11) или

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} + \frac{z^2}{A_3^2} = 1, \quad (3.19)$$

имеет три ненулевых компонента:

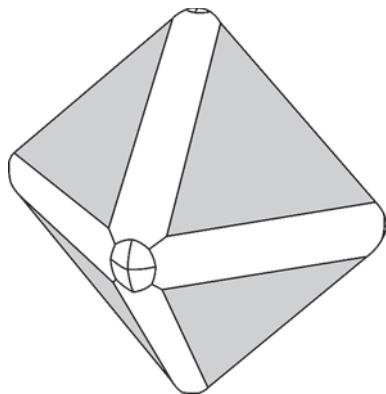
$$T_{ij} = \begin{vmatrix} T_1 & 0 & 0 \\ 0 & T_2 & 0 \\ 0 & 0 & T_3 \end{vmatrix}, \quad (3.20)$$

где $A_i = 1/\sqrt{T_i}$ – полуоси эллипсоида. Ориентируем оси главной системы координат таким образом, чтобы $T_1 > T_2 > T_3$.

Эллипсоид развивается на месте поверхности эллиптического цилиндра. Признаком начала формирования эллипсоида является формирование гранного шва – особого ребра на криволинейной поверхности, располагающегося перпендикулярно оси цилиндра в месте выхода оси симметрии второго порядка кристалла алмаза. В кристаллографической системе координат тензор (3.20) принимает следующий вид:

$$T_{ij} = \begin{vmatrix} T_1 \cos^2 \alpha' + T_3 \sin^2 \alpha' & 0 & (T_1 - T_3) \cos \alpha' \sin \alpha' \\ 0 & T_2 & 0 \\ (T_1 - T_3) \cos \alpha' \sin \alpha' & 0 & T_1 \sin^2 \alpha' + T_3 \cos^2 \alpha' \end{vmatrix}, \quad (3.21)$$

где $\alpha' = 45^\circ - \alpha$, α – половинный угол при гранном шве (именно им удобнее оперировать). Поворот главной системы координат в кристаллографическую осуществляется вокруг оси $[010]$ на угол α' . Хотя тензор (3.20) имеет три собственных ненулевых компонента, выражения для всех компонентов тензора в кристаллографической системе координат зависят также от переменного угла α' как дополнительной переменной или степени свободы.

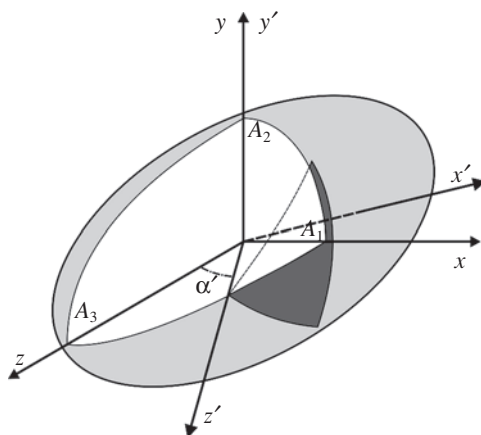


Можно предположить, что в начальной стадии формирования эллипсоида при существовании на кристалле больших относительных площадей граней октаэдра между компонентами тензора (3.20) выполняются неравенства $T_2 > T_1 \gg T_3$, угол поворота $\alpha' = 45^\circ$. При этом тензор (3.21) практически совпадает с тензором (3.18). Первое неравенство выполняется недолго, компонент T_2 быстро становится меньше, чем T_1 , и между поверхностями эллипсоида и октаэдра появляется ребро, на котором наблюдается скачок в скоростях растворения. Постепенно компонент T_3 тензора увеличивается, одновременно растет угол α при гранном шве, достигая 7° по наблюдениям природных кристаллов алмаза уральского типа (Шафрановский, 1948; Кухаренко, 1955). После исчезновения реликтовых граней октаэдра между компонентами развитого эллипсоида всегда справедливы строгие неравенства $T_1 > T_2 > T_3$ ($T_1/T_2 \approx 1,4$). Ранее мы предполагали, что компонент T_3 тензора и угол поворота α главной системы координат тензора относительно кристаллографической находятся в тесной взаимосвязи, но, согласно значениям коэффициента корреляции, между ними не оказалось зависимости. Наоборот, статистически была установлена связь между отношением компонентов тензора T_1/T_2 и углом α .

Независимыми параметрами эллипсоидной поверхности алмаза можно считать три компонента тензора (3.20) и угол поворота α . Один базовый эллипсоид размножается операциями симметрии алмаза на 12 эллипсоидов. Минимальный объем, вырезанный совокупностью этих поверхностей, определяет форму кристалла алмаза уральского типа – ромбододекаэдр с гранным швом, состоящий из 24 элементарных фрагментов эллипсоида, имеющих форму криволинейного треугольника, который покрывает площадь двух независимых областей. Напомним, что независимая (фундаментальная) область поверхности алмаза вырезается трехгранным телесным углом $\pi/12$ и описывается на гномонической проекции треугольником с вершинами в точках [010], [011] и (111). Но треугольник ABC отражает поверхность кристалла, отсекаемую телесным углом $\pi/6$, который вдвое больше независимой области. Независимая область поверхности алмаза составляет на кристаллографической проекции только половину треугольника ABC – треугольник ACD . Объединение соседних двух областей ACD и BCD , связанных плоскостью зеркальной симметрии, в один характерный треугольник ABC (см. рис. 1.4) в процитированных выше работах А.Е. Ферсмана, И.И. Шафрановского, А.А. Кухаренко, Ю.Л. Орлова и других исследователей произошло неслучайно. Поворот характеристической поверхности тензора устойчивости (3.20) при переходе в кристаллографическую систему координат в высокосимметричном поле диффузии осуществляется вокруг оси [010], поэтому один эллипсоид описывает не единичный участок фундаментальной поверхности, а сразу четыре – два соседних треугольника ACD и BCD и два других, расположенных центрально-симметрично по другую сторону кристалла. Таким образом, на кристалле алмаза присутствуют по два центрально-симметричных больших треугольных фрагмента ABC от каждого из 12 эллипсоидов, покрывающих в сумме все 48 элементарных областей кубического кристалла симметрии $m\bar{3}m$ (рис. 3.2, 3.3).

Рис. 3.2. Эллипсоид I типа в главной ($x y z$) и кристаллографической ($x' y' z'$) системах координат.

Темным цветом показан фрагмент поверхности эллипсоида, представленный на кристалле алмаза уральского типа



Важно отметить, что ребра додекаэдроида – стороны эллиптического треугольника, вырезанные операциями симметрии, – образованы центральными сечениями эллипсоида. При этом нормали к поверхности эллипсоида, построенные вдоль одной (боковой) стороны эллиптического треугольника, не лежат в одной плоскости, но на малой длине стороны очень близки к ней, поэтому треугольник ABC на гномонической проекции (рис. 3.4) кажется составленным из строгих отрезков прямых. Вместе с тем совокупность поверхностей, образованных нормальными вдоль границ, вырезаемых треугольных фрагментов эллипсоида для симметричных граней додекаэдроида, создают видимость круговой конической поверхности. Эффект связан с действием тех плоскостей симметрии структуры алмаза, в которых лежат одновременно все три типа осей симметрии. Именно по этой причине линия, соединяющая противоположные стороны соседних световых треугольников, лежит близко к дуге кругового конуса (конус II типа по И.И. Шафрановскому) (см. рис. 1.6, б).

В начале образования поверхности эллипсоида на кристалле алмаза могут сохраняться реликтовые грани октаэдра. Но в отличие от эллиптического цилиндра, тесно связанного с гранями октаэдра непрерывной поверхностью, грани эллипсоида сразу отделяются от граней октаэдра особыми

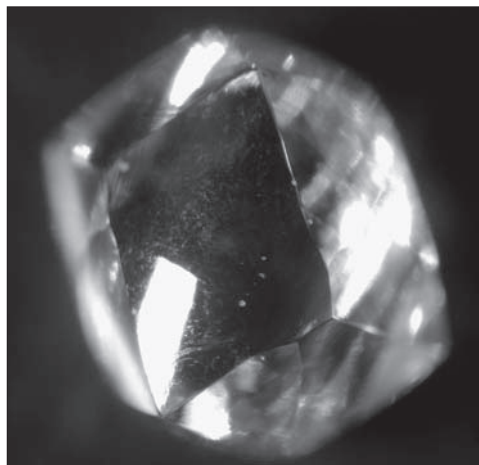
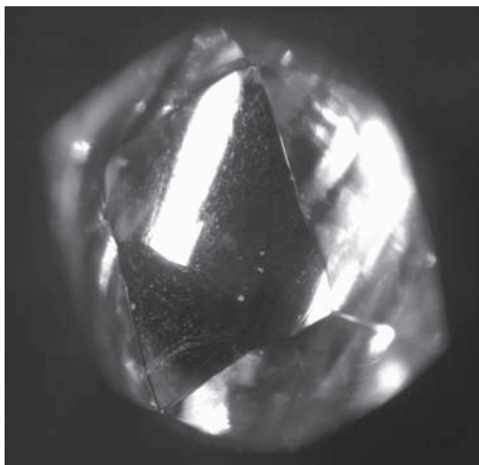


Рис. 3.3. Алмаз бразильского (уральского) типа Топ-02 в двух вариантах подсветки (бассейн р. Макаубас, штат Минас Жерайс, Бразилия)

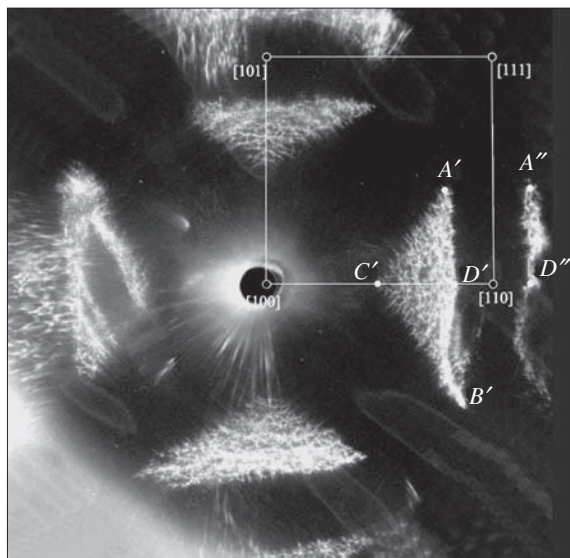


Рис. 3.4. Фотогномограмма додекаэдроид алмаза № 35 россыпи Ичет-ю (Средний Тиман). Квадратом выделена первая четверть гномо-нической проекции. Буквами обозначены характерные точки треугольного рефлекса

эллипсоида (рис. 3.5), но образованными другими участками поверхности. Эти грани, согласно кристаллографической терминологии, образуют гексоктаэдроид (48-гранник) (рис. 3.6). Криволинейные поверхности гексаэдроид, окаймляющие грань октаэдра, должны описываться эллипсоидом с пропорционально уменьшенными параметрами. Компоненты тензора (3.20), наоборот, должны быть пропорционально увеличены. Соответственно скорость растворения такой поверхности при прочих равных условиях окружающего поля диффузии в среднем должна быть выше. Однако, с учетом того, что грани гексоктаэдроид образованы фрагментами поверхности эллипсоида, расположенными близко ко второй оси A_2 (см. рис. 3.2), скорость растворения меньше, чем у главной грани додекаэдроид. Поскольку скорость растворения грани октаэдра весьма мала, если не равна нулю, по сравнению с гранью додекаэдроид (которая образована поверхностью эллипсоида у выхода наиболее короткой первой оси A_1), на стыке таких разных в кинетическом плане поверхностей весьма вероятно образование грани с промежуточным значением скорости растворения, какой и является грань гексоктаэдроид. Скорость ее растворения обусловлена продольным компонентом тензора в заданном направлении. Если грань додекаэдроид определяется скоростью растворения, приблизительно пропорциональной наибольшему



Рис. 3.5. Идеализированная комбинированная форма 80-гранника алмаза, включающая грани октаэдра, додекаэдроид и гексоктаэдроид. Одинаковым цветом показаны грани, образованные одним эллипсоидом

Рис. 3.6. Участок поверхности одного из уральских алмазов с гранями трех типов (одной грани октаэдра, шести граней додекаэдроид и одной гексоктаэдроид).

На грани октаэдра распределены многочисленные ямки травления обратнопараллельной ориентации



компоненту тензора T_1 , то скорость растворения граней гексоктаэдроид, окружающих октаэдрическую плоскую грань, пропорциональна выражению $T' = T'_1 e_1^2 + T'_2 e_2^2$, где T'_i – компоненты тензора, описывающего эллипсоидную поверхность гексоктаэдроид, e_1, e_2 – направляющие косинусы, определяющие вырезаемый фрагмент поверхности эллипсоида. Значения компонентов T'_i немного превышают (по нашим оценкам до 10%) соответствующие величины T_i . При этом направляющие косинусы таковы, что вклад второго компонента T'_2 вдвое превышает вклад первого T'_1 в продольный компонент T' . Учитывая отношение между компонентами $T_1/T_2 \approx 1,4$, приходим к выводу, что скорость растворения грани додекаэдроид будет заведомо выше скорости растворения граней гексоктаэдроид, несмотря на то что $T'_i > T_i$.

Таким образом, между додекаэдроидом и октаэдром, существенно различающимися скоростями растворения, на основании законов симметрии алмаза и свойств тензора устойчивости химических связей появляется дополнительная грань гексоктаэдроид, имеющая некоторую промежуточную скорость растворения. Соответственно при исчезновении с поверхности кристалла граней октаэдра грани гексоктаэдроид также выклиниваются.

Важно отметить, что переход поверхности цилиндра, для которого соблюдается условие $T_2 > T_1$, в поверхность эллипсоида с компонентами тензора $T_1 > T_2 > T_3$ представляет собой определенную качественную трансформацию поверхности, при которой не только с необходимостью образуется особое ребро, направленное по короткой диагонали ромба в додекаэдроиде алмаза и называемое гранным швом, но и должны формироваться ясно выраженные ребра на стыке с реликтовыми гранями октаэдра и исчезать мелкие цилиндрические грани тетрагонтриоктаэдра на четверных вершинах. Поэтому на месте криволинейных ребер, соединяющих октаэдр с поверхностью эллипсоида, могут образовываться грани гексоктаэдроид как участки поверхности того же эллипсоида, но с пропорционально уменьшенными длинами полуосей. На месте небольших граней тетрагонтриоктаэдра образуется ребро додекаэдроид, которое, как показывают статистические наблюдения, более устойчиво к механической обработке, чем ребро между гранями тетрагонтриоктаэдра (поверхности эллиптического цилиндра на рис. 3.1). Иногда положение гексоктаэдроид на гномонической проекции пересекает непрерывный световой рефлекс, простирающийся от поверхности додекаэдроид до точки октаэдра. Такой случай может быть связан с формой механического истирания алмаза – формой квазистатического сжатия, и использование понятия гексоктаэдроид здесь будет некорректным

(см. главу 5). Есть еще одна причина образования поверхностей вблизи граней октаэдра на месте гексоктаэдроидов – это травление (резорбция, коррозия поверхности алмаза) (см. главу 4). Необходимо признать, что нет абсолютной уверенности в том, что результатом появления граней гексоктаэдроидов на рис. 3.6 и 3.7, б служит растворение, а не травление.

Обобщенная, масштабно-инвариантная форма, описывающая единым способом кристаллы разных размеров, может быть получена путем деления всех компонентов тензора на один из компонентов. Независимо от размеров кристалла обобщенная форма эллиптического цилиндра будет описываться одним, а эллипсоида – двумя независимыми компонентами тензора и углом α . Например, разделив все компоненты на наибольший компонент T_1 , получим обобщенный тензор (3.20) в виде

$$T_{ij} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & t_2 & 0 \\ 0 & 0 & t_3 \end{vmatrix}, \quad (3.22)$$

где $t_i = T_i/T_1$.

На практике удобнее пользоваться относительными параметрами поверхностей второго порядка. Поскольку $A_i = 1/\sqrt{T_i}$ выражает полуоси эллипсоида и эллиптического цилиндра, то справедливы следующие равенства:

$$a_i = \frac{A_i}{A_1} = \frac{1}{\sqrt{t_i}}.$$

Соответственно для описания морфологии алмазов пространство форм растворения трансформируется в три двумерные диаграммы форм на плоскостях (a_2, a_3) , (a_2, α) , (a_3, α) .

По световым рефлексам кристалла-додекаэдроидов можно установить параметры определяющего его форму эллипсоида (A_1, A_2, A_3) и угол его наклона α , пользуясь следующими формулами (Ракин, 2004):

$$\begin{aligned} A_1 &= d/2, \\ A_2 &= A_1 / \sqrt{2 \operatorname{tg} \beta}, \\ A_3 &= A_1 \sqrt{\operatorname{tg}(\varepsilon - \alpha) / \operatorname{tg} \gamma}, \end{aligned} \quad (3.23)$$

где d – диаметр кристалла в направлении полуоси A_1 , $\varepsilon = 45^\circ$ – угол между направлениями $[100]$ и $[110]$, α – половинный угол между точками D' и D'' рефлекса, β – угол между точками A и D , γ – угол между точками C и D (см. рис. 3.4). Приведенные формулы получены для идеального ромбододекаэдроидов с гранным швом (без реликтовых граней октаэдра) и учетом малого угла α . На практике, по нашим измерениям и данным А.А. Кухаренко (1955) и И.И. Шафрановского (1948), он не превышает 7° .

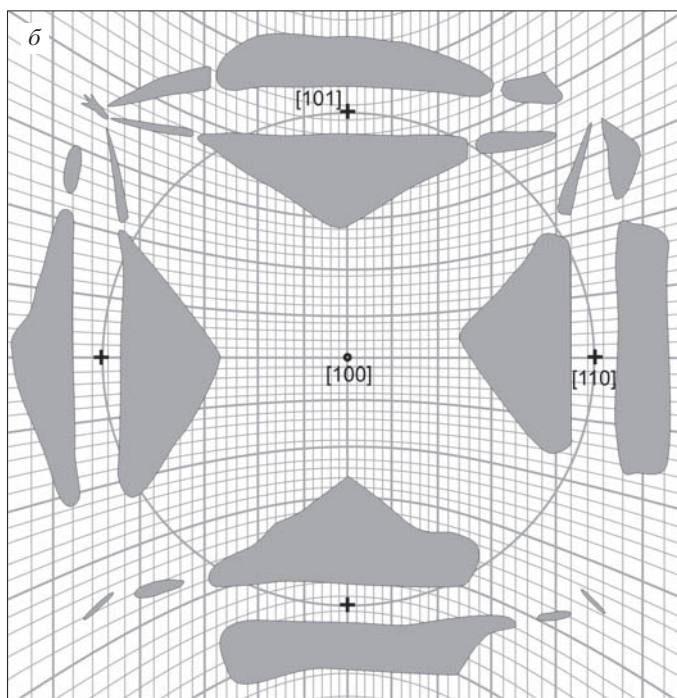
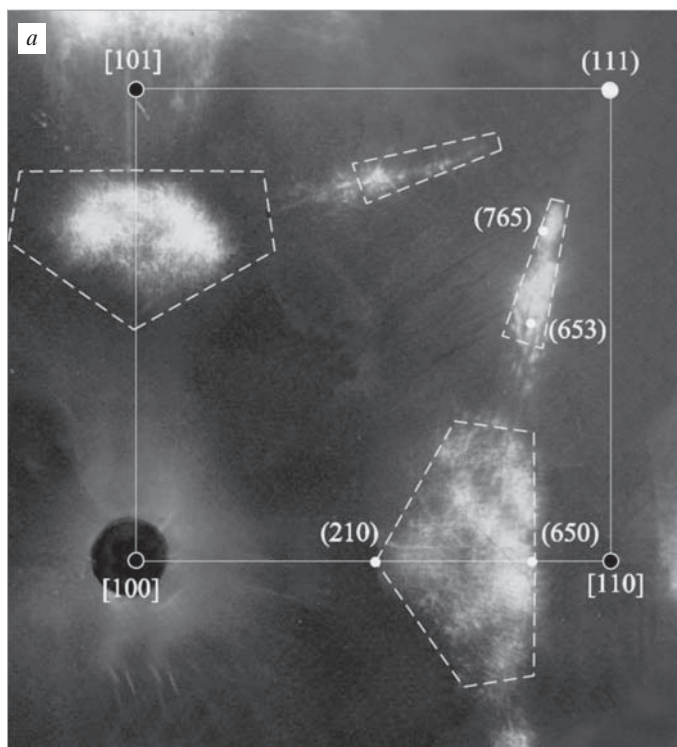


Рис. 3.7. Гномограммы додекаэдров:

a – фотогномограмма тиманского алмаза № 96 россыпи Ичет-ю, первая четверть гномографической проекции; пунктирной линией показаны примерные границы рефлексов додекаэдроидов, на котором представлены плоские сетки (210), (650) и гексоктаэдроидов с плоскими сетками (653), (765); *б* – эскиз гномограммы кристалла Ж1.2 из кимберлитовой жилы трубки Интернациональная с небольшими признаками хаотического механического износа

3.2.4. Особые поверхности растворения

Обсудим несколько видов поверхностей, которые обладают признаками поверхностей растворения, травления и механического износа. Это поверхности эллипсоида II типа и конуса. Конвергентные свойства этих поверхностей обычно затрудняют расшифровку их генезиса. Однако, используя комплекс всех физиографических и полярных характеристик морфологии кристалла, обычно удается отнести данные поверхности к тому или иному процессу. Опишем поверхности эллипсоида II типа и конуса как поверхности растворения, а в других разделах вернемся к описанию их как поверхностей травления (см. главу 4) и механического износа (см. главу 5).

Эллипсоид II типа. На ряде кристаллов алмаза нами были обнаружены поверхности, рефлексы от которых на гномонической проекции располагаются ближе к оси четвертого порядка (рис. 3.8). В основном это кристаллы алмаза кубического облика (тетрагексаэдрониды). Форма рефлекса $A'B'C'$ близка к треугольной, что можно интерпретировать как отражение треугольной формы граней тетрагексаэдрониды (24-гранника). Такую поверхность формально также можно описать эллипсоидом, но иного типа, с другим набором полуосей B_i и особой ориентацией (рис. 3.9). Полуоси эллипсоида II типа – $B_{1,2,3}$, пронумерованные также в порядке возрастания их длин, ориентированы таким образом, что только полуось B_2 совпадает с одной из осей симметрии L_4 структуры алмаза (см. рис. 3.9). Угловые размеры рефлекса на экране гониометра по любому направлению не превышают 15° . Соответственно тензор, описывающий поверхность растворения тетрагексаэдрониды, в главной системе координат также имеет диагональный вид (3.20). Компоненты тензора соотносятся как $T_1 \gg T_2 > T_3$. В кристаллографической системе координат тензор устойчивости для поверхностей тетрагексаэдрониды имеет вид (3.21), в котором угол α' следует заменить углом β . Угол поворота главной системы координат тензора относительно кристаллографической β существенно меньше угла α' и меняется в пределах от 0 до 10° . Напомним, что для описанного выше эллипсоида растворения (I типа) угол поворота α' составляет от 38 до 45° .

Важно отметить, что эллипсоид II типа практически всегда представлен на кристалле алмаза не одной гладкой поверхностью, как эллипсоид I типа, а совокупностью поверхностей на параллельно ориентированных бугорках (или на стыкующихся друг с другом ямках), что принципиально отличает обсуждаемую поверхность. Их интегральный рефлекс на гномонической проекции представляется световым пятном, близким по форме к треугольнику. Выделение эллипсоида II типа как особого вида аппроксимирующей поверхности не столь очевидно, как выделение главного эллипсоида растворения, но может иметь смысл, если принять во внимание следующее:

- во-первых, кубониды алмазов с их характерной формой существуют и широко распространены в природе (алмазы IV разновидности по Ю.Л. Орлову (1973));

- во-вторых, присутствие на одном кристалле одновременно двух типов эллипсоидных поверхностей может быть объяснено особенностями форми-

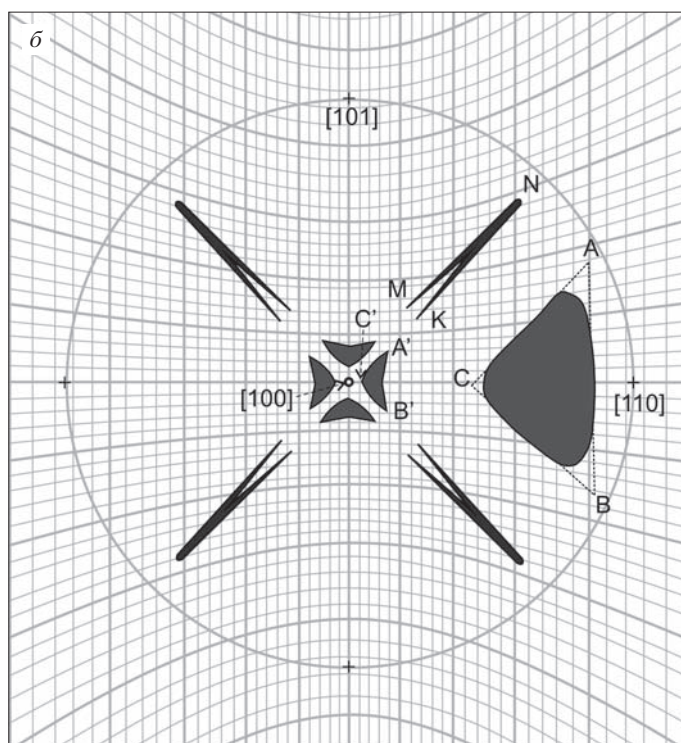
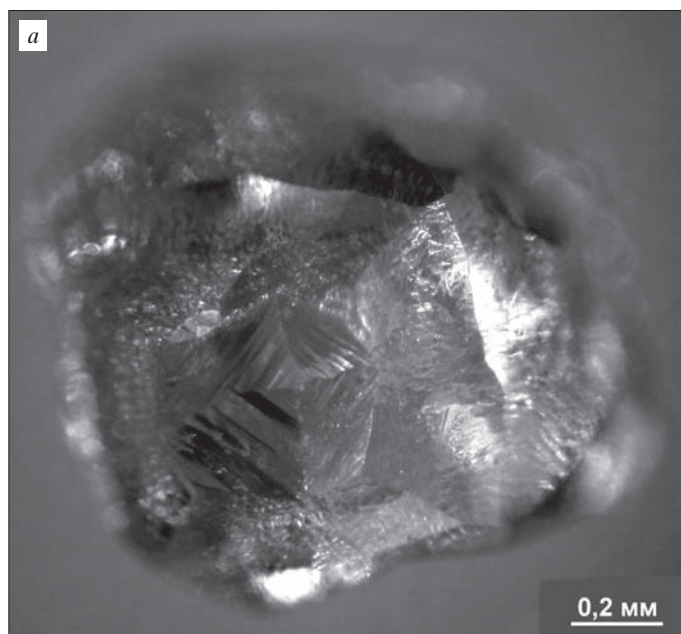


Рис. 3.8. Фото фрагмента поверхности (а) и гномограмма (б) кристалла алмаза комбинированной формы № 8-11 из россыпи участка Холомолоох

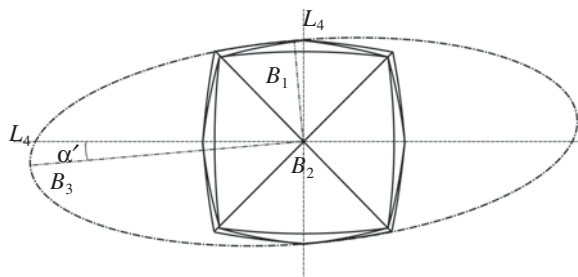


Рис. 3.9. Ориентация эллипсоида II типа относительно кристаллографической системы координат

ляют собой два разных алмаза с различными концентрациями дефектов. Соответственно при выходе на поверхность кристалла (вблизи оси четвертого порядка) сектора роста грани куба криволинейная грань может отличаться по форме от остальной поверхности, где проявляет свои кристаллофизические свойства сектор роста октаэдра (см. рис. 3.8).

По причине фрагментарности исходной поверхности тетрагексаэдроида точность аппроксимации поверхности алмаза (см. рис. 3.8, а) эллипсоидом II не столь высока, как главным эллипсоидом. Для расчета параметров эллипсоида II в модели идеализированного тетрагексаэдроида можно использовать соответствующим образом обозначенные формулы вида (3.23).

Дополнительный рефлекс MNK на гномограмме (см. рис. 3.8, б) образован в результате отражения от боковых граней ямки «травления», расположенной по оси L_4 кристалла (см. рис. 3.8, а). Точки N получены от самых глубоко расположенных участков поверхности, а точки M и K указывают на начало образования поверхности конуса на гранях ямки травления. В глубине ямок травления, расположенных на алмазе в местах выхода оси четвертого порядка, участок цилиндрической поверхности субграней сложен плоскими сетками {544}, тогда как на выходе из ямки – сетками {522}. Рефлексы эллиптического цилиндра, находящиеся в положении MNK на гномограмме, обусловлены отражением от боковых поверхностей регенерационных бугорков (положительный рельеф), расположенных на различных криволинейных поверхностях. При этом, чем выше (ближе к внешней открытой поверхности) расположен фрагмент поверхности цилиндра на реальной поверхности алмаза, тем больше проявляется эффект расщепления линейного рефлекса цилиндра на дуги конических поверхностей (точки M , K на рис. 3.8, б), о которых будет сказано ниже. Последнее наблюдение тесно связано с общими эволюционными закономерностями форм растворения алмаза. Нами установлено, что поверхности эллиптического цилиндра на кристалле алмаза во всех без исключения случаях выпуклые, что свидетельствует о положительных значениях ненулевых компонентов тензора устойчивости (3.17).

Можно признать, что развитая выше гипотеза об эллипсоиде II типа как особой форме растворения, описывающей генезис поверхностей, дающих рефлекс $A'B'C'$ на гномонических проекциях алмаза (см. рис. 3.8, б), недостаточно надежно обоснована. Ниже предложены еще две интерпретации генезиса поверхностей, находящихся в положении $A'B'C'$, близком к плоской сетке грани куба на гномонической проекции алмаза (см. рис. 3.8, б),

рования дефектной структуры алмаза, различающейся по секторам роста граней октаэдра и куба. По существу эти секторы роста представ-

основанные на появлении вогнутых поверхностей растворения и механическом истирании алмаза. Какая из этих гипотез лучше отражает природу таких поверхностей, предстоит установить в дальнейшем, а пока для количественной характеристики поверхностей $A'B'C'$ можно использовать описанную модель эллипсоида II типа и модифицированные формулы (3.23). В дальнейшем под эллипсоидом мы будем понимать только эллипсоид I типа.

Эллиптический конус. Прежде всего заметим, что поверхность растворения, которую предстоит обсуждать, представляет собой переходный тип от эллиптического цилиндра к эллипсоиду и близка к фрагментам поверхностей трех видов: вытянутого эллипсоида, однополосного гиперboloида и эллиптического конуса (рис. 3.10).

В начальной стадии растворения на ребрах октаэдра небольшие по площади участки поверхности алмаза можно описать не только эллиптическим цилиндром, но и вытянутым эллипсоидом. Если между компонентами тензора (3.20) выполняются неравенства $T_2 > T_1 \gg T_3$ и $\alpha' = 45^\circ$, тензор (3.21) практически совпадает с тензором (3.18). Такая поверхность может вполне заменить цилиндрическую при существовании на кристалле больших относительных площадей граней октаэдра. Постепенное уменьшение угла $\alpha' < 45^\circ$ и рост компонента T_3 должны приводить к раздвоению рефлекса (см. рис. 3.10, б) и появлению гранного шва. Со временем компонент T_1 превышает T_2 и между поверхностями эллипсоида и октаэдра появляется ребро, на котором наблюдается скачок в скоростях растворения. В этот период эллипсоид уже полностью сформирован. После исчезновения реликтовых граней октаэдра угол при гранном шве достигает 14° ($\alpha = 7^\circ$).

Следует иметь в виду, что переходный тип поверхности образуется в условиях преобразования «двумерного» диффузионного поля растворения в «трехмерное». На этой стадии можно гипотетически допустить формирование вогнутых (хотя бы в одном направлении) участков поверхности. Например, дугообразный вид рефлекса (см. рис. 3.10, а) может давать фрагмент поверхности однополосного гиперboloида:

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - \frac{z^2}{A_3^2} = 1. \quad (3.24)$$

В направлении, перпендикулярном дуге, гиперboloид имеет положительную кривизну (вогнутость). В таком случае гипотетический тензор устойчивости в собственной системе координат

$$T_{ij} = \begin{vmatrix} T_1 & 0 & 0 \\ 0 & T_2 & 0 \\ 0 & 0 & -T_3 \end{vmatrix}, \quad (3.25)$$

в котором $T_2 > T_1 \gg T_3$. Ориентация гиперboloида в кристаллографической системе координат такая же, как и у обсуждавшегося выше эллипсоида. Тен-

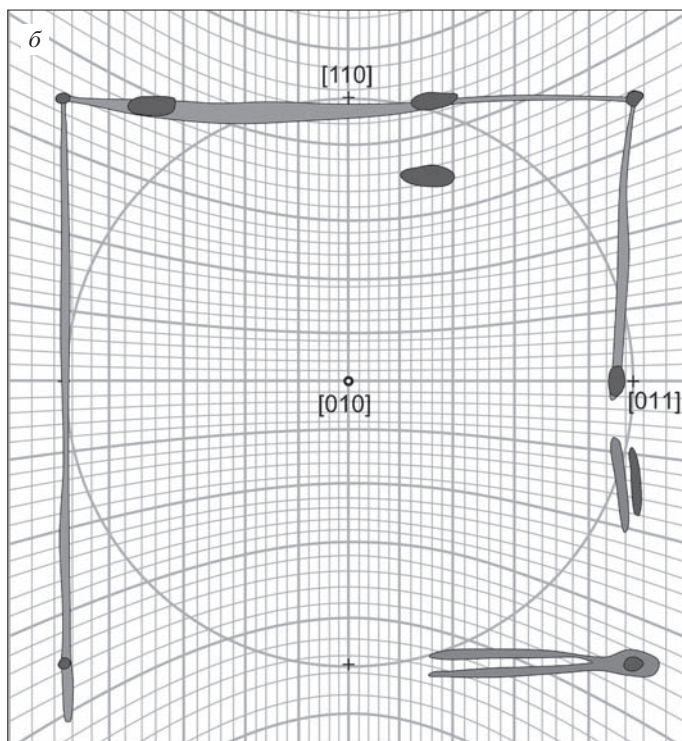
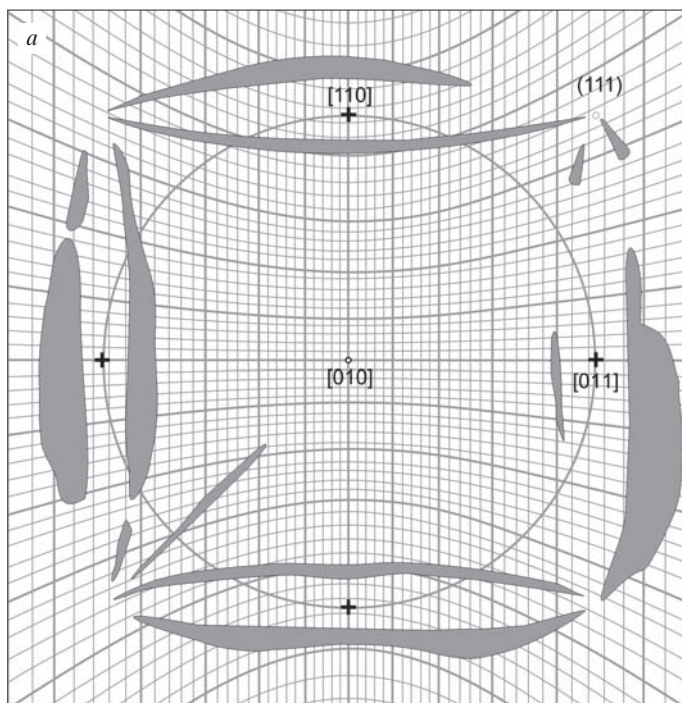


Рис. 3.10. Поверхности конуса (скорее поверхности травления, а не растворения) на кристалле алмаза Ж-10 из кимберлитовых жил трубки Интернациональная (Якутия) (а) и кристалле MGD10-31 из первой коллекции из бассейна р. Макаубас (Бразилия) (б). На гномограмме б темным цветом выделены более яркие рефлексы, которые указывают на большую площадь участков поверхностей, создающих этот рефлекс

зор в системе координат, связанной со структурой кристалла, имеет пять ненулевых компонентов, как в выражении (3.21), отличие заключается только в знаке перед T_3 . Однако дальнейшая эволюция такой поверхности алмаза при растворении происходит через трудно объяснимое явление – превращение однополосного гиперболоида в эллипсоид. Этот качественный переход должен совершаться только через поверхность цилиндра или полное исчезновение данного участка поверхности и замену другими типами поверхностей при их конкуренции. Но такие явления на алмазах нами не наблюдались.

Иные условия диффузии возникают в ямках травления, желобах, во входящих углах на участках срастания двух субиндивидов и др. Здесь эллипсоидная поверхность может никогда не образоваться, но поле диффузии способно вызвать возникновение вогнутой поверхности. Тогда на участках поверхности часть компонентов тензора устойчивости могут принимать отрицательные значения. При двух отрицательных компонентах характеристическая поверхность становится двухполосным гиперболоидом (двояковогнутой). Таким образом, можно сделать вывод о том, что тензор устойчивости алмаза на положительной поверхности не может иметь отрицательные компоненты, но на отрицательной – в ямках травления и желобах – это возможно.

Сложность, возникающая при описании дугообразного рефлекса (см. рис. 3.10, *a*), характеризующего переходный режим диффузионного поля, вынуждает обратиться к особой выпуклой поверхности, которая не может быть характеристической поверхностью какого-либо тензора устойчивости химических связей на поверхности кристалла.

Рассмотрим эллиптический конус, поверхность которого описывается каноническим уравнением

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 0 \quad (3.26)$$

и существенно отличается от поверхностей типа (3.10). В теории тензора устойчивости поверхность конуса не может существовать, поэтому нет необходимости в выделении конуса (3.26) как самостоятельного, хоть и переходного, вида поверхности растворения. Следует также учесть, что гиперболоиды (например (3.24)) асимптотически приближаются к поверхности конуса при больших значениях x , y , z или очень малых A_1 , A_2 , A_3 . Поэтому мы будем использовать термин «конус», понимая под ним специфический переходный тип поверхности. Термин «конус растворения» часто употребляется в минералогической литературе при морфологическом описании кристаллов природных минералов, впервые же использовал поверхность конуса (поверхность второго порядка) для описания округлых поверхностей растворения алмаза И.И. Шафрановский (1948).

Заметим, что, исследуя детально «конусы растворения» на кристаллах кальцита, топаза, берилла, можно легко убедиться в их эллипсоидной природе. Они представляют собой не конусы, а выпуклые округлые пирамиды, составленные из поверхностей эллипсоида, особым образом вырезанных операциями симметрии соответствующих кристаллов. Поэтому называть их конусами можно весьма условно.

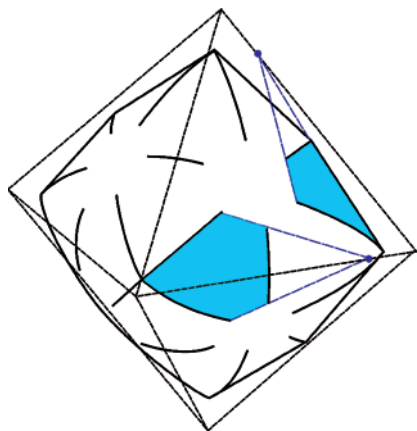


Рис. 3.11. Ориентация поверхностей конуса на кристалле алмаза

Однако наши наблюдения показывают, что поверхность механического износа алмаза, описываемая уравнениями высокого порядка, чаще сходна с конической, чем эллипсоидной. Некоторые криволинейные поверхности травления также напоминают конические, поэтому конус как аппроксимирующая поверхность является удачной моделью не столько форм растворения, сколько форм механической деградации и травления.

Поверхности конуса растворения на алмазе образуются по поверхностям эллиптического цилиндра с началом формирования гранного шва. На гномонической проекции полярного комплекса рефлексов алмаза дуга поверхности конуса не является идеально тонкой линией как, например, прямая, отражающая поверхность цилиндра, но бывает достаточно узкой и простирается непрерывно от одной точки октаэдра (111) до смежной ($11\bar{1}$) (см. рис. 3.10). Данные поверхности конуса на алмазе могут быть связаны не только с растворением, но и с механическим истиранием, о чем свидетельствует расширение ряда симметричных рефлексов.

Поверхность конуса растворения должна быть вписанной в двугранный угол смежных граней октаэдра, поэтому вершина конуса располагается на ребре исходного октаэдра или близко к нему (рис. 3.11). Под воздействием операций симметрии алмаза на его поверхности образуются 24 эквивалентные поверхности, никак не связанные с центром кристалла. При одном ребре октаэдра образуются два антипараллельных конуса, на стыке которых формируется гранный шов.

Очевидно, что ось конуса не совпадает с четверной осью симметрии алмаза, но по мере растворения кристалла она должна все больше приближаться к оси четвертого порядка. Гипотетически в процессе растворения четыре эллиптических конуса должны одновременно приближаться по форме к круговым конусам и сходиться в единую поверхность конуса с осью, совпадающей с четверной осью алмаза, что представляет собой конус I типа по И.И. Шафрановскому (1948). Описываемый предельный круговой конус уже не будет включать в себя плоские сетки четырех смежных с данной вершиной граней октаэдра и, расширяясь, будет увеличивать угол между осью и образующей до значения более $35^{\circ}16'$. Таким образом можно объединить наблюдаемую коническую поверхность на кристалле алмаза с гипотетическим круговым конусом I типа, выделенным впервые И.И. Шафрановским. Однако приведенная схема эволюции конуса далека от действительности, поскольку так называемый конус растворения, отделившись от цилиндра быстро и незаметно, без качественного преобразования в поверхность эллипсоида и описанный предельный случай кругового конуса И.И. Шафрановского не реализуется. Тем не менее поверхность пре-

дельного конуса с осью, совпадающей с четверной осью кристалла и углом образующей около 30° , была обнаружена нами на алмазах Якутской провинции, однако такие поверхности мы связываем с поверхностями травления и последующего полирующего износа кристаллов (см. главу 4).

Поверхность эллиптического конуса описывается тремя параметрами (3.26), но относительные параметры конуса, сохраняющие основные особенности формы поверхности, можно получить, умножив уравнение (3.26) на c^2 . Расчет двух относительных параметров конуса a/c и b/c по форме рефлекса (см. рис. 3.10, *a*) даже в рамках идеализированной модели, в которой поверхность кристалла образована только из конических поверхностей, неоднозначен, поскольку измеряемая поверхность представлена в пределах сектора конуса с плоским углом $70^\circ 31'$, захватывающим меньшую полуось и лежащим в основании конуса.

Задачу расчета параметров конуса можно упростить, поскольку в такой развертке эллиптический конус может быть достаточно точно аппроксимирован круговым конусом:

$$x^2/a_0^2 + y^2/a_0^2 - z^2 = 0, \quad (3.27)$$

с одним относительным параметром a_0 . Расчет двух величин – наклона оси и параметра кругового конуса a_0 – можно произвести по следующей методике.

Дуга кругового конуса, как известно, должна совпадать с одной из параллелей сферы, ориентированной по оси конуса на настраиваемой гномонической сетке (см. рис. 2.4). Угол наклона оси конуса и соответственно параметра α градусной сетки рассчитывается достаточно просто. На плоскости гномонической проекции мысленно построим в точке (111) касательную к дуге нижнего конуса, расположенного в верхней полуплоскости (см. рис. 3.10, *a*). Касательная отделяет на вертикальной оси [100] кристаллографической проекции отрезок длиной h . С помощью этой величины можно рассчитать угол наклона настраиваемой сетки по формуле

$$\alpha = \arctg((R - h)/(2R - h)). \quad (3.28)$$

Угол наклона α оси конуса к плоскости проекции находится всегда в пределах от 0 до $35^\circ 16'$. Рассчитав его численное значение, подставляют в систему уравнений (2.2) при известных координатах рефлекса октаэдра на гномонической проекции ($x = R$, $y = R$) и находят значение угла ρ , который соответствует углу образующей конуса. Относительный параметр a_0 в уравнении кругового конуса (3.27) равен тангенсу ρ .

Таким образом, поверхность алмаза, дающая верхний рефлекс дуги на рис. 3.10, *a*, может быть достаточно хорошо приближена поверхностью кругового конуса, ориентированного под углом $\alpha = 12^\circ 20'$ к оси четвертого порядка [100]. Решая систему уравнений (2.2) относительно ρ , находим параметр конической поверхности $a_0 = 0,488$. Необходимо учитывать, что угол поворота оси кругового конуса, не совпадает с углом эллиптического конуса, и поэтому круговой конус является не более чем одним из вариантов описания реальной поверхности, весьма сходной с конической.

3.2.5. Простые формы растворения алмаза

К простым формам растворения, описываемым соответствующим тензором устойчивости, относятся только три формы: октаэдр, эллиптический цилиндр, эллипсоид (табл. 3.1). Переходную форму конуса и эллипсоид II типа можно считать формами растворения с определенными оговорками.

Описанные типы поверхностей, наблюдаемые на кристаллах алмаза, можно отразить на обобщенной гномограмме простых форм растворения алмаза (рис. 3.12). Все указанные грани, будучи размноженными элементами симметрии, формируют габитус кристалла алмаза. Каждая из криволинейных поверхностей, кроме октаэдра, представляет не одну, а семейство простых форм растворения алмаза с разными по значению параметрами поверхностей. Заметим, что парой плоскостей как характеристической поверхностью тензора устойчивости формально может быть обозначена любая грань кристалла с рациональными индексами Миллера, но октаэдр является единственной плоскогранной простой формой, встречающейся на округлом растворенном алмазе.

Таблица 3.1

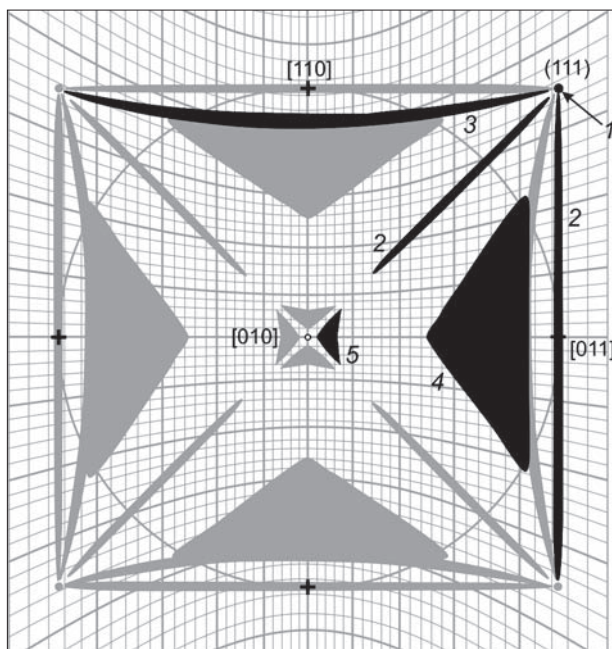
Простые формы растворения алмаза

Традиционное описание	Описание (простая форма)	Кол-во параметров обобщенной простой формы	Комментарий
Октаэдр	Октаэдр (О)	0	Равновесная форма {111} входит в состав комбинированных форм растворения
Октаэдроид, ромбододекаэдроид	Эллиптический цилиндр (Ц)	1	Входит в комбинированную форму, а также ограничивает ямки травления и поверхности отрицательного рельефа
Октаэдроид, додекаэдроид	Эллиптический конус (К)	2	Переходная, редкая, быстро трансформирующаяся форма. Развивается из эллиптического цилиндра с началом формирования гранного шва
Додекаэдроид с гранным швом	Эллипсоид (Э)	3	Наиболее часто встречающаяся форма. Возможна стационарная и предельная форма
Гексоктаэдроид	То же	3	Не является самостоятельной формой и встречается только в комбинированной форме додекаэдроидов с октаэдром
Тетрагексаэдроид	Эллипсоид II (Э ₂)	3	Редкая форма растворения (травления), возможно, является поверхностью механического истирания. Встречается на кристаллах кубического облика

Рис. 3.12. Обобщенная гномоническая проекция поверхностей растворения алмаза.

Темным цветом показаны поверхности: 1 – октаэдр, 2 – эллиптический цилиндр, 3 – конус, 4 – эллипсоид, 5 – эллипсоид II типа

Объяснить существование комбинированных форм растворения на кристалле алмаза можно следующим образом. При растворении выживают те формы, скорость растворения которых оптимальна и соответствует скорости переноса вещества от кристалла в среду, т. е. форме диффузионного поля или, точнее, векторному полю диффузионных потоков. Если перенос вещества в



среде ускоряется или смещается точка равновесия (например при изменении температуры или давления), что позволяет усилить растворение, то происходит смена форм растворения с медленно растворяющихся на быстро растворяющиеся. Конкуренция форм, возникновение и сохранение новых при постоянной мощности диффузионных потоков происходят особым образом: между двумя макроскопическими гранями, имеющими скорости растворения J_1 и J_2 ($J_1 < J_2$), может существовать грань только с промежуточным значением скорости растворения $J_1 < J_3 < J_2$. Этот принцип уже был использован нами при объяснении появления граней гексоктаэдроидов на стыке практически нерастворимой грани октаэдра и быстрорастворимого додекаэдроидов.

Естественно, учитывая сглаженное динамическое диффузионное поле вокруг кристалла, маловероятно встретить на кристалле одновременно все типы поверхностей растворения. Не очень часто наблюдаются кристаллы с комбинированными формами, образованными даже двумя видами поверхностей растворения, а тем более тремя, что объясняется большим различием в скоростях растворения граней. Важно также иметь в виду, что поверхности цилиндра и октаэдра могут быть обусловлены всеми тремя обсуждаемыми в данной работе процессами – растворением, травлением и механической деградацией. Поэтому основная часть комбинированных форм, как правило, представляет собой композицию поверхностей разного генезиса. Решение вопроса о происхождении поверхностей цилиндра и октаэдра возможно только при сопоставлении ряда дополнительных признаков, о которых будет сказано ниже.

Наряду с гранными простыми формами растворения на кристалле алмаза необходимо выделить криволинейные ребра и вершины, завершающие полное описание поверхности растворяющегося кристалла.

Встречаются четыре типа ребер растворения: 1) между гранями эллипсоида, 2) между гранью эллипсоида и гранью цилиндра, 3) между гранями октаэдра и эллипсоида и, возможно, 4) ограничивающие грани эллипсоида II типа. Первый тип ребер подразделяется на три подтипа: 1-а) ребро между смежными фрагментами эллипсоида – гранями додекаэдроида, примыкающими к общей оси четвертого порядка, 1-б) ребро, называемое гранным швом, через которое проходит ось второго порядка, и 1-в) ребро между гранью додекаэдроида и гранью гексоктаэдроида. Второй тип ребер можно подразделить на два подтипа: 2-а) ребро между гранью додекаэдроида и гранью цилиндра и 2-б) ребро между гранями гексоктаэдроида и цилиндра. Следует отметить, что на кристаллах алмаза ребро 2-б ни разу нами не наблюдалось, хотя на гномограммах оба ребра иногда присутствуют одновременно. Между гранями октаэдра и округлыми поверхностями эллипсоида выделяются ребра 3-а, а между гранями октаэдра и поверхностями гексоктаэдроида – ребра 3-б. При этом между поверхностью цилиндра и гранью октаэдра ребро не появляется. И, наконец, если эллипсоид II типа считать формой растворения, то формально можно рассмотреть еще два вида ребер: 4-а) между смежными гранями эллипсоида II типа и 4-б) между гранями эллипсоидов обоих типов. Однако такие ребра нами специально не исследовались.

Двугранные углы при ребрах на формах растворения алмаза обладают переменными значениями (см. рис. 3.12). Наиболее острое ребро 1-а с одного конца, у выхода четверной оси кристалла алмаза, имеет угол около 36° , а с другого, у выхода тройной оси, – 20° . Угол при гранном шве 1-б фактически одинаков по всей длине ребра, в среднем составляет 10° , но иногда достигает $14\text{--}15^\circ$. Ребро 1-в обычно разделяет грани под небольшим углом от 2 до 4° , в максимуме достигая $8\text{--}10^\circ$. Угол при ребре 2-а в предельном случае достигает 7° и так же, как и гранный шов 1-б, фактически одинаков по всей длине ребра. Ребра 3-а в среднем описываются двугранным углом 15° , а 3-б – углом 7° . Ребра 4-а теоретически должны описываться двугранным углом около 2° , а 4-б – до 20° . Приведенные значения углов достаточно точно вычисляются по гномограммам кристаллов.

На растворяющемся кристалле алмаза между гранями разных форм растворения формально можно выделить множество вершин разного типа. Однако на предельной форме растворения – додекаэдроиде – чаще всего встречаются только два типа вершин – на выходах четверной и тройной осей кристалла. У первой вершины в предельном случае наблюдаются четыре грани, а у второй – шесть граней эллипсоида.

Докажем, что на предельной форме растворения алмаза – додекаэдроиде – должны одновременно присутствовать ребра, по крайней мере, двух типов – 1-а и 1-б.

На алмазе уральского типа явно выделяются 24 выпуклые элементарные поверхности треугольной формы, отделенные друг от друга ребрами. Элементарные поверхности на алмазе сложены таким образом, что на кристалле проявляются шесть четырехгранных вершин, расположенных на выходах осей четвертого порядка, и восемь шестигранных вершин на осях третьего порядка. В четырехгранных вершинах сходятся четыре ребра од-

ного типа, и симметрия вершины соответствует симметрии четверной оси кристалла. Поскольку симметрия алмаза не допускает оси шестого порядка, в шестигранных вершинах на осях третьего порядка должны сходиться ребра двух типов, чередующиеся в порядке обхода вокруг вершины, понижая симметрию шестигранной вершины до третьего порядка, как того требует группа симметрии структуры алмаза. Потому на алмазе уральского типа – додекаэдроиде – обязаны быть ребра строго двух структурных типов.

3.3. ЭВОЛЮЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАСТВОРЕНИЯ АЛМАЗА

Рассмотрим последовательность смены форм растворения алмаза, начиная с исходного октаэдра и заканчивая ромбододекаэдроидом, и оценим потерю массы кристалла на разных этапах растворения. Согласно нашим исследованиям формы алмазов уральского (бразильского) типа с помощью параболического гониометра, выстраивается ряд этапов растворения, которые можно наиболее наглядно описать с помощью гномонических проекций кристаллов (рис. 3.13).

С началом растворения пограничный диффузионный слой только начинает формироваться у плоских граней ростовой формы алмаза – октаэдра. Толщина его во много раз меньше длины ребра кристалла. Этот случай отражает условия одномерной диффузии, и тензор устойчивости принимает вид (3.13). На ребрах октаэдра практически сразу начинается двумерная диффузия и тензор устойчивости (3.17) описывает цилиндрическую поверхность. По мере роста толщины поля диффузии картина становится трехмерной. Тогда появляется третий ненулевой компонент у тензора устойчивости (3.20).

Рассмотрим этот процесс в деталях. Начало растворения ребер октаэдра алмаза (см. рис. 3.13, *а*) вызывает формирование поверхностей эллиптического цилиндра (см. рис. 3.13, *б*). На гранях октаэдра возникают ямки, традиционно называемые ямками травления (см. рис. 3.13, *б*), субграни которых обычно сложены криволинейными поверхностями эллиптического цилиндра, но иногда плоскими сетками тригонтриоктаэдра $\{hll\}_{h<1}$ (рис. 3.14), принадлежащими поверхности цилиндра, – $\{899\}$, $\{788\}$, $\{677\}$ и др. Стоит заметить, что в результате истинного травления (растворения метастабильной структуры алмаза) также могут появиться указанные плоские сетки тригонтриоктаэдра. Но, учитывая множественность рефлексов от поверхностей травления, которые возникают не только на линии тригонтриоктаэдра, но и в поле гексоктаэдра, травление существенно отличается от растворения. Закономерно, что плоские сетки ромбододекаэдра $\{011\}$ и октаэдра $\{111\}$ тоже лежат на поверхности этого цилиндра (рис. 3.15). Поэтому первая криволинейная поверхность растворения – эллиптический цилиндр – определяет «обратную» ориентацию ямок травления на грани октаэдра. Вершины октаэдра также ограниваются небольшими по площади поверхностями цилиндра, и поэтому на гномограммах иногда появляются диагональные рефлексы, лежащие на прямой тетрагонтриоктаэдров (см. рис. 3.12, *б*). Теоретическая форма кристалла на первом этапе растворения может быть представлена 44 по-

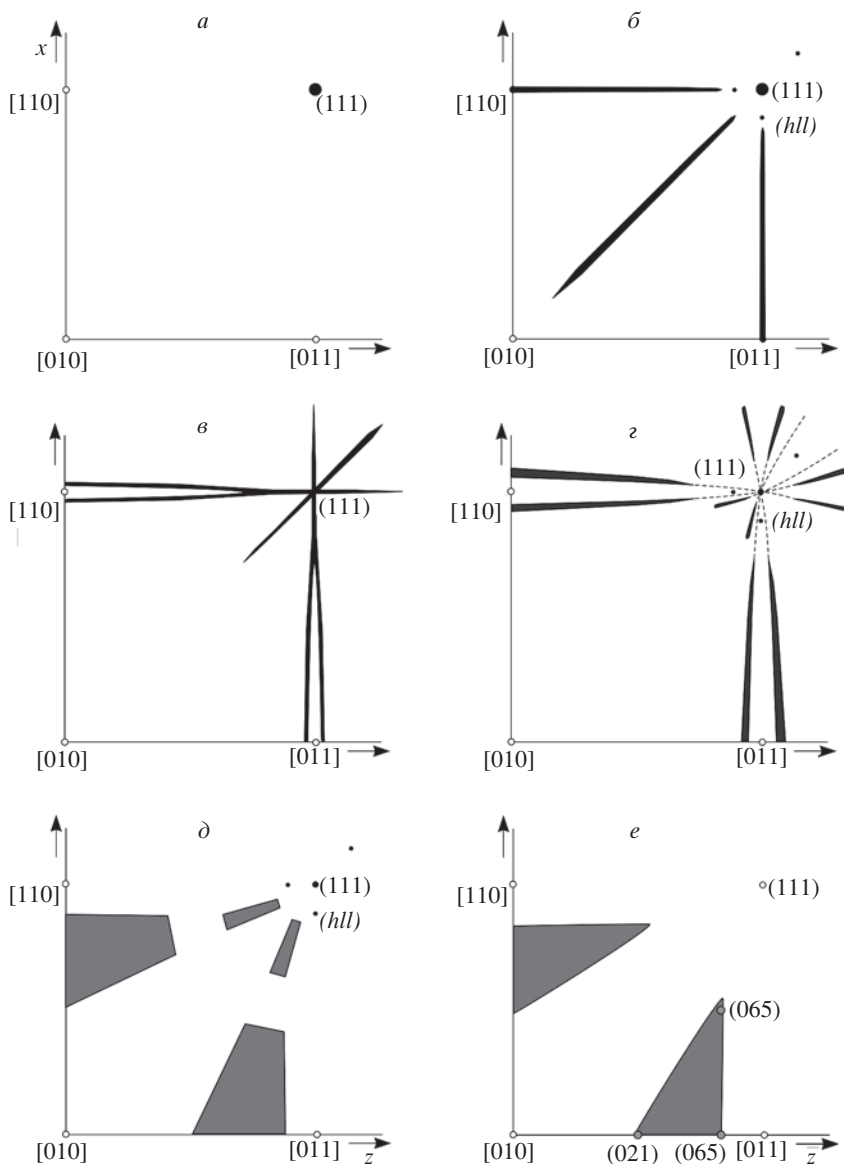
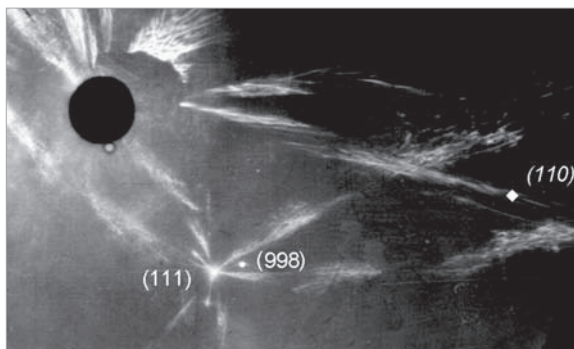


Рис. 3.13. Эволюция форм растворения кристалла алмаза. Первая четверть гномограмм поверхности.

Реально присутствующие поверхности закрашены темным цветом; *a* – исходное состояние – идеальный октаэдр, равновесная форма, стационарная и предельная формы роста; *б* – начало растворения, формирование эллиптического цилиндра; *в* – развитие поверхности конуса и образование гранного шва; *г* – начало формирования поверхностей гексоктаэдроид; *д* – развитые выпуклые поверхности ромбододекаэдроид и гексоктаэдроид и реликтовые грани октаэдра; *е* – предельная форма – ромбододекаэдр с гранным швом

Рис. 3.14. Фрагмент фотогномограммы кристалла тиманского алмаза с ограненной ямкой истинного травления.

Об этом свидетельствуют пучки рефлексов, выходящих из точки октаэдра. Неправильная кристаллографическая установка

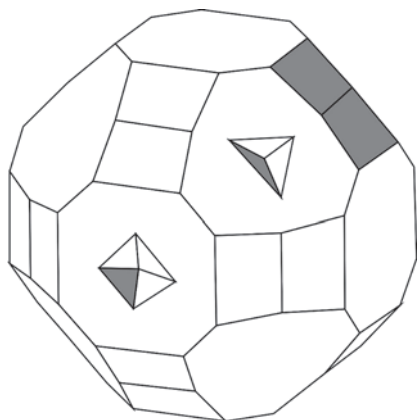


верхностями, принадлежащими двум простым формам – октаэдру (8 граней) и эллиптическому цилиндру (36 граней) (см. рис. 3.1).

Потеря массы кристалла на первом этапе составляет от 0 до 1%.

На втором кратковременном этапе растворения, который нами не наблюдался, но который должен существовать согласно физике процессов растворения, начинает формироваться гранный шов, разделяющий эллиптический цилиндр на две симметричные поверхности конуса с максимальным углом разориентации 2α (см. рис. 3.13, в). На гномонической проекции прямая линия цилиндрической поверхности должна расщепляться на две дуги конуса. Конус должен быть эллиптическим, но, поскольку на поверхности кристалла проявляется только его небольшой фрагмент, как было отмечено выше, конус можно считать круговым. Повторим, что конус – это не характеристическая поверхность какого-либо тензора устойчивости, он выделен нами как переходная поверхность между эллиптическим цилиндром и эллипсоидом. Форма идеального кристалла на втором этапе содержит формально 32 грани: 8 граней октаэдра и 24 грани конуса (см. рис. 3.11). Потеря массы на второй стадии растворения составляет, вероятно, до 2–3%. Формирование гранного шва с углом 2α косвенно свидетельствует о влиянии центрального поля диффузии в кристаллорастворяющей среде и нормальном механизме растворения кристалла, когда растворение ребра бывшего октаэдра алмаза вблизи вершины происходит интенсивнее, чем в середине.

Грань октаэдра долго сохраняется в габитусе кристалла и растворяется чаще только под действием ямок травления, полностью покрывающих ее



поверхность (см. рис. 3.6), или исчезает под наступлением окружающих быстро растворяющихся криволинейных граней эллипсоида. Термин «ямки травления» здесь вполне можно использовать, поскольку растворение грани октаэдра, как и ее химическое травление, происходит чаще всего по месту выхода линейного

Рис. 3.15. Единство природы поверхностей криволинейного рельефа на кристалле алмаза.

Грани отрицательных пирамид в ямках травления разных участков поверхностей образованы поверхностями первичной формы растворения – эллиптическим цилиндром, которые на положительном рельефе трансформируются в поверхность эллипсоида I типа

дефекта – дислокации. Поэтому избирательный механизм растворения октаэдра напоминает химическое травление, избирательность которого является главным свойством.

На третьем этапе растворения вокруг грани октаэдра часто возникают фрагменты поверхностей гексоктаэдроида (рис. 3.5–3.7, 3.13, *г, д*). Грань ромбододекаэдроида с накрест лежащими через грани октаэдра двумя гранями гексоктаэдроида образуют единую поверхность эллипсоида, отмеченную пунктирной линией на рис. 3.13, *г*. Потеря массы на этом этапе достигает 5–8%. Важная особенность формы алмаза на третьем этапе растворения связана с тем, что грани октаэдра разделяют поверхность одного элементарного эллипсоида на несколько фрагментов таким образом, что количество элементарных поверхностей на кристалле в идеальном случае достигает 80 (см. рис. 3.5).

В ходе дальнейшего растворения фрагменты поверхностей ромбододекаэдроида и гексоктаэдроида становятся все более выпуклыми (см. рис. 3.13, *д*) – потеря массы доходит до 15–20%. И с исчезновением граней октаэдра и одновременно гексоктаэдроида остаются только грани ромбододекаэдроида с гранным швом, дающие на гномонической проекции характерный треугольный рефлекс (см. рис. 3.13, *е*, 3.4). Этот четвертый этап начинается с потери кристаллом более 25% массы и продолжается до полного растворения кристалла.

Оценку потери массы (25%) можно получить путем несложных расчетов. Объем вписанного в правильный октаэдр шара составляет 74% от объема октаэдра. Шар представляет собой додекаэдр, образованный симметричными поверхностями предельного эллипсоида с тремя одинаковыми полуосями. Увеличивая две из трех осей эллипсоида, мы получим додекаэдр заведомо больший по объему, чем шар. Таким образом, потеря массы алмаза при трансформации октаэдра в среднестатистический додекаэдр с полуосями (1; 1,4; 2,8), вписанный в октаэдр, составляет не более 1/4 от исходной массы.

Додекаэдронный облик алмаза при неизменных условиях растворения в дальнейшем уже должен быть постоянным. Однако параметры эллипсоида могут меняться. Дальнейшая эволюция формы происходит в рамках семейства эллипсоидов, среди которых еще предстоит выделить подмножество стационарных форм эллипсоидов и, возможно, некую конечную форму, существование которой применительно к округлым формам растворения еще предстоит доказать или опровергнуть.

Обнаружено, что все поверхности отрицательного рельефа – ямки травления на выходах осей L_3 и L_4 – описываются поверхностями эллиптического цилиндра, характерного для первой начальной стадии процесса, редко – поверхностью конуса (второй стадии растворения). Иногда ямки травления ограняются рациональными гранями тригонтриоктаэдра, например {899}, что свидетельствует о медленном «квазиравновесном» растворении вещества из ямки травления кристалла наружу, ограниченном малой скоростью диффузионного потока (см. рис. 3.14). В это время поверхности положительного рельефа, находящиеся в условиях большей интенсивности растворения, успевают трансформироваться до поверхности эллипсоида.

Смена форм растворения происходит в ходе постоянного естественного отбора. Наблюдения показывают, что эллипсоид является самой эффективной формой растворения алмаза.

3.4. КОМБИНИРОВАННЫЕ ФОРМЫ РАСТВОРЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ АЛМАЗА

Заметим, что для объяснения комбинированной формы растворения можно применить принцип «минимального объема» Г.В. Вульфа, только с учетом начальной формы октаэдра. Так, кристалл приобретает форму, ограниченную минимальным объемом серии центральных поверхностей второго порядка и начального октаэдра. Центральные расстояния до поверхностей определяются значениями компонентов соответствующих тензоров, которые, в свою очередь, связаны со скоростями растворения.

С учетом пяти типов поверхностей растворения монокристаллов алмаза уральского типа: октаэдр (О), цилиндр (Ц), конус (К) и два вида эллипсоидов ($\mathcal{E}$) и ($\mathcal{E}_2$), в качестве независимых типов поверхностей растворения алмаза комбинаторное количество всех форм растворения, включающих простые и комбинированные формы, за исключением самостоятельной простой формы октаэдра, составит 29. Форму кристалла при его словесном описании можно представить формулой, в которой последовательно перечисляются типы указанных поверхностей по мере уменьшения их площади. Например, начало растворения описывается формой ОЦ, вторая стадия образования эллиптического конуса – ОК. Эволюционный ряд смены форм кристалла алмаза в ходе растворения (см. рис. 3.13, *a–e*) соответствует последовательности: О – ОЦ – ОЦК – ОК – $\mathcal{EO}$ – $\mathcal{E}$.

Учитывая все возможные соотношения площадей поверхностей, теоретически получим 300 форм, среди которых количество комбинированных форм теоретически составляет 296. Конечно, на алмазе возможно формирование не всех форм.

Если из числа простых форм растворения исключить две спорные формы, обладающие конвергентными признаками, – конус (К) и эллипсоид II типа ($\mathcal{E}_2$), то комбинаторное количество всех форм растворения алмаза, за исключением самостоятельной простой формы октаэдра, будет равно 6. К ним относятся формы Ц, $\mathcal{E}$, ОЦ, О $\mathcal{E}$, Ц $\mathcal{E}$, ОЦ $\mathcal{E}$. Перечисляя все соотношения площадей поверхностей, теоретически получим 14 форм растворения алмаза и соответственно 12 комбинированных форм. Эволюционный ряд (см. рис. 3.13, *a–e*) соответствует записи О – ОЦ – ОЦ $\mathcal{E}$ – О $\mathcal{E}$ – $\mathcal{EO}$ – $\mathcal{E}$.

Возможен также компромиссный вариант классификации, в котором выделяются четыре простые формы растворения без эллипсоида второго типа – О, Ц, К и $\mathcal{E}$. Количество форм растворения кристалла алмаза в этом случае равно 14, а с учетом площадей поверхности получим теоретически 63 различные формы растворения и 60 комбинированных форм.

Комбинированные формы растворения на монокристаллах алмаза наблюдаются в следующих случаях:

1) кристалл находится на начальных стадиях растворения, когда сохраняются грани октаэдра (потеря массы меньше 25%);

2) кристалл имеет как положительный (выпуклый), так и отрицательный (ямки, впадины, вогнутости) рельеф поверхности;

3) происходила регенерация или колебательный процесс с периодической сменой роста и растворения кристалла;

4) кристалл обладает неизометричным обликом, и соответственно симметрия поля концентрации в среде понижена, что приводит к неравномерному растворению;

5) ошибочно отнесены к таковым формы механического истирания и травления.

Первый из перечисленных факторов можно проиллюстрировать схемой эволюции формы алмаза на начальных этапах растворения (см. рис. 3.13). Три первых этапа эволюции формы алмаза при растворении характеризуются комбинированной формой. На последнем, четвертом, этапе форма, описываемая поверхностью эллипсоида, уже не является комбинированной.

Участки отрицательного рельефа (ямки травления, борозды, области сопряжения срастающихся субиндивидов, двойников и др.) на кристалле растворяются медленно по причине ограниченного массопереноса, и, в то время как основная поверхность кристалла приобретает форму эллипсоида, поверхности отрицательного рельефа могут долго сохранять грани эллиптического цилиндра или конуса (см. рис. 3.8, б).

Часто кристаллы алмаза несут признаки естественной механической обработки, при которой форма поверхности меняется особым образом. Поэтому формально можно расширить количество комбинированных форм, включив в них на общих основаниях формы истирания и травления, и при этом называть их комбинированными формами растворения, механического истирания и травления.

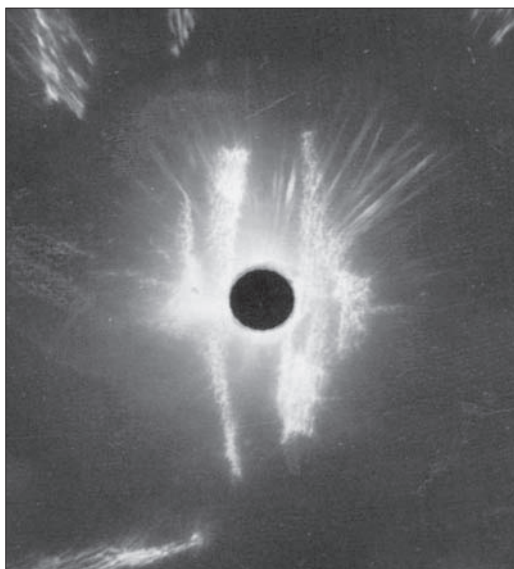
3.5. ФОРМЫ РАСТВОРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПОНИЖЕНИЯ ВНЕШНЕЙ СИММЕТРИИ

Часто форма рефлексов от кристалла алмаза в той или иной мере закономерно искажена (см. рис. 3.4). Асимметрия может быть связана с анизотропией растворения в несимметричном концентрационном поле или неизометричностью кристалла. Асимметрия облика кристалла достаточно просто влияет на форму рефлексов и легко определяется на гномограммах. Асимметрия внешнего концентрационного поля не столь очевидна, но может быть выявлена в форме рефлексов.

Рассмотрим два общих случая понижения симметрии, обусловленные особенностями самой кристаллорастворяющей среды – обдув неподвижного кристалла растворяющим флюидом (симметрия среды ∞mm) и вращение кристалла в ходе растворения (симметрия среды ∞/m). Вращение или обдув не должны сказываться на симметрии рефлексов послойно растущего кристалла, но влияют на облик кристалла через скорость нормального роста. Растворение алмаза происходит иначе, и симметрия анизотропной среды обязана проявляться в форме рефлексов.

Согласно принципу П. Кюри, симметрия $m\bar{3}m$ внешней формы кристалла алмаза при обдуве (∞mm) может трансформироваться в пять групп сим-

Рис. 3.16. Фотогномограмма поверхности додекаэдроида № 53, разделенного гранным швом. Оптическая ось гониометра совпадает с двойной осью алмаза. Кристалл месторождения Ичет-ю (Тиман)



метрии: $4m$, $3m$, $mm2$, m , 1. Первые три группы получаются при совпадении оси обдува с осями четвертого, третьего и второго порядка структуры алмаза. Последние два случая реализуются, когда ось обдува находится в одной из плоскостей симметрии алмаза, но не совпадает ни с одной из осей симметрии структуры или ни с одним из элементов симметрии. Свидетельством обдува кристалла может быть форма алмаза,

описываемая термином «двуликий Янус» (Афанасьев и др., 2000), свидетельствующая о разных условиях растворения двух сторон кристалла.

При вращении кристалла (∞/m) вокруг осей четвертого, третьего и второго порядка симметрия полного комплекса рефлексов криволинейных поверхностей кристалла алмаза может понижаться соответственно до $4/m$, $\bar{6}$, $2/m$. Когда ось вращения кристалла не совпадает ни с одной из осей симметрии алмаза, во внешней форме кристалла исчезают все элементы симметрии, кроме центра инверсии, и группа симметрии поверхности становится $\bar{1}$. Однако вращение кристалла легко выявляется по исчезновению плоскостей симметрии в форме рефлексов (см. рис. 3.7, рис. 3.16). При обдуве, наоборот, сначала исчезают оси симметрии, плоскости могут сохраняться дольше (рис. 3.17). Группа симметрии поверхности кристалла устанавливается после анализа формы всех рефлексов, что представляет собой достаточно трудоемкую задачу. Но в первую очередь важно установить, какой из двух общих случаев реализуется – обдув или вращение кристалла. Решить это обычно можно по единственной гномограмме.

Фотогномограмма рис. 3.4 демонстрирует исчезновение плоскостей симметрии, проходящих вдоль четверной оси. При этом искажена и форма треугольного рефлекса. Фотогномограмма, полученная по оси второго порядка, также фиксирует исчезновение параллельных ей плоскостей симметрии (см. рис. 3.16). На гномограмме рис. 3.17 запечатлена комбинированная форма кристалла алмаза, на которой основная простая форма – эллипсоид (два неполных треугольных рефлекса), а дополнительные – октаэдр (четыре рефлекса) и эллиптический цилиндр (семь фрагментов рефлексов). Если рефлексy разных простых форм группируются в разных полуплоскостях, то это можно интерпретировать как обдув кристалла, при котором формируется «двуликий Янус». Внешне в облике кристалла при визуальноморфологическом анализе ось обдува может не проявляться, но в картине рефлексов она определяется четко. На рис. 3.17 четверная ось исчезает, а, по край-

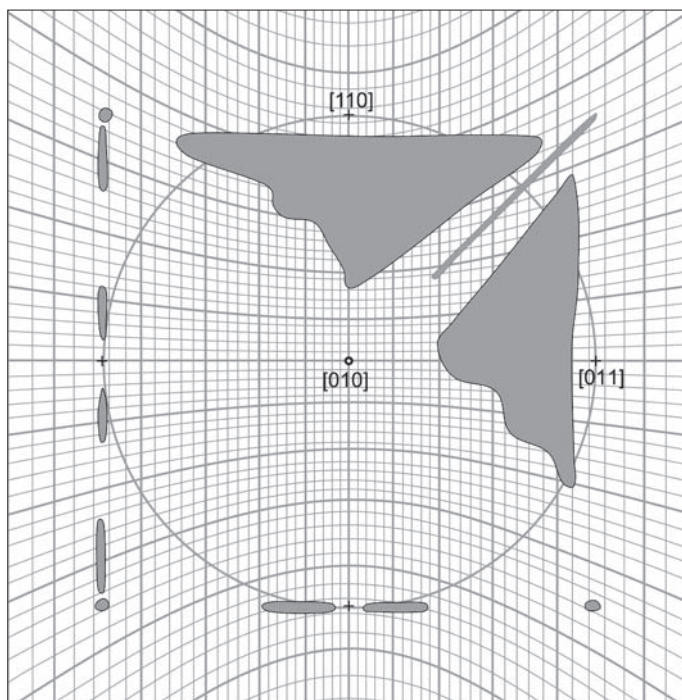


Рис. 3.17. Гномограмма алмаза Top-8 бразильской коллекции из бассейна р. Макаубас. Комбинированный рефлекс. Представлены формы октаэдра, цилиндра, эллипсоида. На кристалле присутствуют признаки механического истирания и травления

ней мере, одна диагональная плоскость симметрии, параллельная вектору обдува, проходящая из первой в третью четверть проекции, сохраняется. Направление обдува можно установить по ранним формам растворения – октаэдру и цилиндру, сохранившимся в областях тени, где скорость растворения очевидно понижена. Один диагональный рефлекс цилиндра, присутствующий в первой четверти проекции, образован поверхностью отрицательного рельефа в ямке травления, находящейся на выходе оси четвертого порядка $[010]$ из кристалла.

Понижение симметрии сопровождается разделением одной простой формы на несколько разных форм со своим набором параметров. На рис. 3.18 проиллюстрировано понижение симметрии кристалла под воздействием внешних диссимметризирующих факторов обдува и вращения. С помощью интенсивности цвета показана скорость растворения соответствующего участка поверхности октаэдра. Для цилиндра и эллипсоида установлено, что в каждом случае количество простых форм будет разным (табл. 3.2). В частности, группа пониженной симметрии m представлена двумя случаями, которые различаются на обеих формах – цилиндра и эллипсоида.

Кристалл алмаза, рефлексы от граней которого приведены на рис. 3.4, можно отнести к группе симметрии $4/m$ как результат вращения кристалла против часовой стрелки вокруг четверной оси, совпадающей с оптической осью гониометра. Форма кристалла-додекаэдроида в данном случае определяется четырьмя разными элементарными эллипсоидами, два из которых представлены восемью симметричными гранями и два –

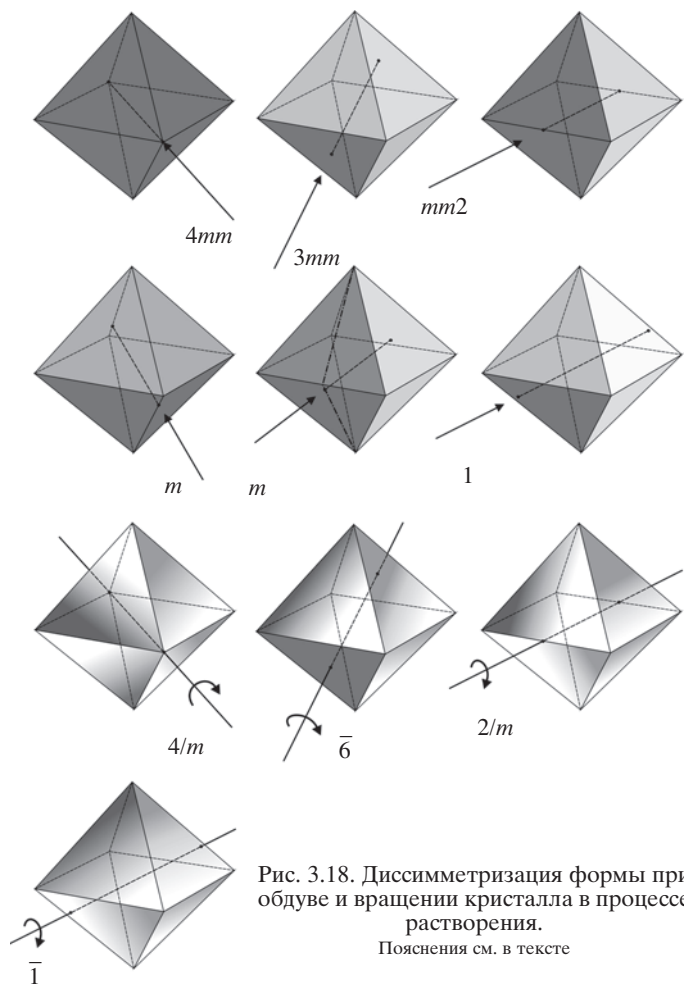
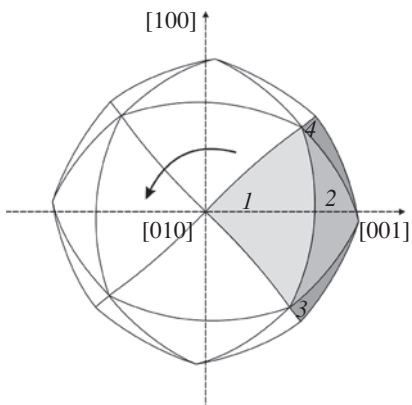


Рис. 3.18. Диссимметризация формы при обдуве и вращении кристалла в процессе растворения.

Пояснения см. в тексте

Рис. 3.19. Искажения формы додекаэдроида при растворении и вращении кристалла. Номерами обозначены четыре разные простые формы



Количество простых форм растворения, присутствующих на одном кристалле алмаза, с учетом принципа П. Кюри

Явление, симметрия среды	Группа симметрии кристалла	Простые формы эллипсоида*	Кол-во параметров формы кристалла	Простые формы цилиндра*	Общее кол-во параметров формы
Диффузия, ° ° t	$m\bar{3}m$	1_{24}	3	1_{12}	1
Диффузия и вращение кристалла, ° / m	$\bar{1}$	12_2	48	6_2	6
	$2/m$	6_4	24	2_2+2_4	4
	$4/m$	2_8+2_4	14	1_4+1_8	2
	$\bar{6}$	4_6	16	1_6+1_6	2
Диффузия и обдув кристалла, ° mm	1	24_1	96	12_1	12
	m	$12_2, 8_1+8_2$	36, 48	$2_1+5_2, 4_1+4_2$	7, 8
	$mm2$	4_2+4_4	24	$2_1+1_2+2_4$	5
	$3m$	4_6	12	2_3+1_6	3
	$4mm$	4_4+1_8	15	3_4	3

*В нижнем индексе указан порядок простой формы (количество симметрично-эквивалентных граней).

четырьмя (рис. 3.19). Любая из четырех простых форм растворения в данном случае описывается своим набором параметров. Для форм 1 и 2 (см. рис. 3.19) поворот главной системы координат тензора устойчивости относительно кристаллографической не ограничивается одним полярным углом α' . В результате воздействия роторного концентрационного поля (в системе координат, связанной с кристаллом) происходит дополнительный азимутальный поворот тензора на небольшой (порядка нескольких градусов) угол ϕ в другой плоскости, перпендикулярной первой. Элементарная поверхность, вырезаемая линиями ребер из эллипсоидов при симметричном преобразовании $4/m$, теряет свою единственную плоскость симметрии. Вследствие вращения кристалла кривизна прилегающих к одному ребру смежных участков симметричных граней будет существенно различна, что на гномонической проекции кристалла алмаза выражается разными длинами боковых сторон $A'C'$ и $C'B'$ треугольного рефлекса (см. рис. 3.4). Величина угла ϕ в кристаллографической системе координат должна быть связана с величиной ротора поля массопереноса. Вторые две формы (рис. 3.19, 3, 4) кратностью 4 характеризуются одним полярным поворотом главной системы координат тензора, но на разную величину угла α' . Таким образом, кристалл-додекаэдронид алмаза с внешней симметрией $4/m$ будет описываться уже не одной простой формой эллипсоида с тремя обобщенными параметрами (четырьмя параметрами одного тензора устойчивости), как при изотропном центральном поле диффузии $\infty\infty m$, а четырьмя простыми формами растворения, определяемыми в сумме 14 обобщенными параметрами поверхности. Аналогичный анализ можно выполнить для всех простых форм кристаллов алмаза по группам симметрии, представленным в табл. 3.2.

3.6. СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФОРМЫ РАСТВОРЕНИЯ АЛМАЗОВ

3.6.1. Расчет параметров обобщенного эллипсоида алмаза

Округлые поверхности растворения на кристаллах алмаза, являясь характеристическими поверхностями тензора устойчивости химических связей на поверхности кристалла, могут иметь небольшие различия в параметрах поверхностей. Эти различия (вариации) обусловлены неоднородностями состава и структуры кристалла, искажениями облика кристалла относительно изометричного, а также неоднородностями концентрационного поля вокруг кристалла. Тем не менее установление средних значений и величин средних отклонений параметров поверхностей представляет собой вполне решаемую задачу.

Среди всех форм растворения наиболее важна, без сомнения, форма эллипсоида – предельная форма растворения алмаза уральского типа. Поэтому задачей исследования в наиболее общем виде является расчет среднестатистической формы растворения (параметров обобщенного эллипсоида), характеризующей совокупность кристаллов одного генезиса. Прежде чем изучать выборку кристаллов, необходимо установить средние значения параметров поверхности отдельного кристалла.

Для достижения наибольшей точности при аппроксимации эллипсоидом реальной поверхности растворения конкретного алмаза необходимо выполнить усреднение по возможно большему количеству рефлексов от одного кристалла. Такая процедура необходима также для устранения влияния естественных искажений облика кристаллов (удлинения, уплощения и др.).

На одной гномонической проекции в параболическом гониометре при стандартной кристаллографической установке алмаза располагаются четыре треугольных рефлекса ABC (см. рис. 3.4). Последовательно меняя ориентировку кристалла в гониометре (шесть разных позиций), можно получить все 24 рефлекса от элементарных поверхностей кристалла. Так, на наиболее изометричном кристалле алмаза Top-02 из бразильской коллекции проведены измерения угловых характеристик 16 треугольных криволинейных граней (рис. 3.20). Сходный по форме кристалл показан на рис. 3.3. По формулам (3.23) рассчитаны отношения полуосей всех эллипсоидов, которыми можно описать 16 элементарных поверхностей. Полученные вариационные ряды приведены в табл. 3.3. В предпоследней строке таблицы указаны средние угловые размеры рефлексов, по которым рассчитаны также усредненные параметры идеализированного эллипсоида (цифры выделены курсивом). Треугольные рефлексы обсуждаемого алмаза (см. рис. 3.20) в небольшой степени растянуты вдоль стороны AB , что является признаком незначительного механического износа кристалла. Однако при расчетах параметров эллипсоида фактор механического износа алмаза не учитывался.

По данным табл. 3.3 построены статистические ряды частот встречаемости для трех параметров эллипсоида (рис. 3.21). С учетом характерного вида колоколообразных гистограмм эмпирические данные параметров a_2 и a_3 аппроксимированы методом наименьших квадратов логарифмически нормальным законом распределения. Параметры распределений – математическое ожидание (МО) и среднеквадратичное отклонение (СКО) – приве-

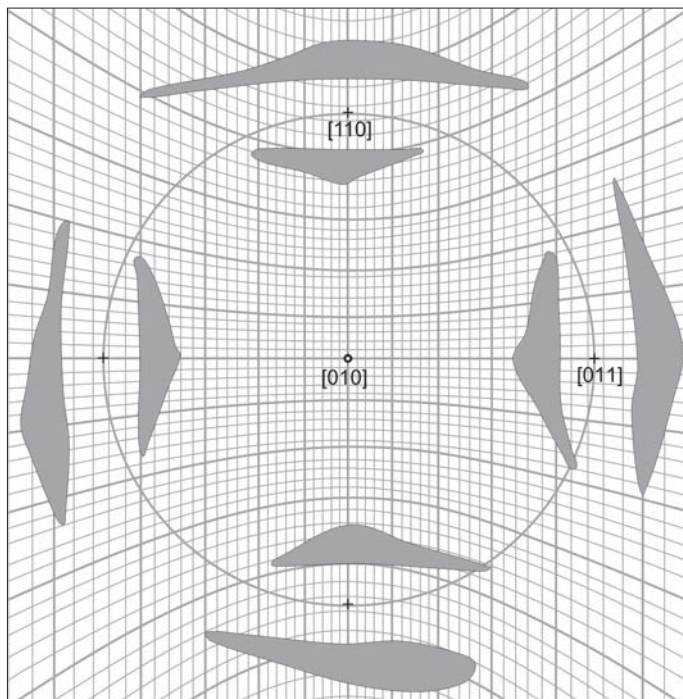


Рис. 3.20. Одна из четырех гномограмм кристалла Топ-02 (бассейн р. Макаубас, штат Минас Жерайс, Бразилия).

Кристалл обладает формой растворения, слегка модифицированной пластическими течениями структуры переменного направления и диффузионным полирующим травлением

дены в табл. 3.3. Близкие значения дает закон нормального распределения Гаусса. Между тем очевидно, что функциям распределения параметров a_2 и a_3 должна быть свойственна асимметрия, связанная с тем, что их значения по определению всегда превышают 1. По этой причине закон логнормального распределения предпочтительнее. Большая погрешность измерений угла α не позволяет использовать для расчета статистические модели, но можно предположить, что для угла поворота главной системы координат тензора выполняется тот же закон логнормального распределения. К сожалению, применение критерия «хи-квадрат» для проверки достоверности статистической гипотезы в отношении данных табл. 2.3 некорректно из-за их ограниченности. Однако будем считать закон логнормального распределения, характерный для огромного числа природных явлений, в которых независимые случайные величины ограничены снизу и обусловлены флуктуациями переменных физической системы, справедливым для параметров обобщенного эллипсоида растворения алмаза.

Таким образом, даже для максимально изометричного кристалла додекаэдриода коэффициент вариации параметров эллипсоида достигает 0,09 для a_2 и 0,05 для a_3 . Весьма вероятно, что относительная погрешность определения параметров a_2 и a_3 обобщенного эллипсоида кристалла не может быть больше 9 и 5%, а по углу α она составляет около 10%, если расчеты провести также по модели нормального распределения. Значения параметров эллипсоида, рассчитанные по средним арифметическим значениям угловых характеристик световых рефлексов, вполне близки к математичес-

Параметры световых рефлексов алмаза-додекаэдроид

№ п.п.	AB	$C'D'$	$D'D''$	$C'C''$	a_2	a_3	α , град
	град						
1	38	6	9	21	1,433	2,851	4,5
2	40	6	10	22	1,394	2,826	5
3	44	7	9	23	1,323	2,637	4,5
4	32	3	10	16	1,570	4,001	5
5	33	6	9	21	1,545	2,851	4,5
6	36	6	9	21	1,475	2,851	4,5
7	36	6	9	21	1,475	2,851	4,5
8	30	5	8	18	1,624	3,152	4
9	38	6	9	21	1,433	2,851	4,5
10	44	10	8	28	1,323	2,220	4
11	56	8	9	25	1,153	2,465	4,5
12	34	6	9	21	1,521	2,851	4,5
13	38	6	8	20	1,433	2,876	4
14	33	7	9	23	1,545	2,637	4,5
15	33	5	8	18	1,545	3,152	4
16	42	6	9	21	1,357	2,851	4,5
Среднее	37,94	6,19	8,89	21,25	1,434	2,810	4,44
Параметры распределений					МО – 1,426 СКО – 0,128	МО – 2,803 СКО – 0,129	

Примечание. Пояснения см. в тексте.

ким ожиданиям аппроксимирующих распределений и с хорошим приближением вполне могут быть использованы как усредненные параметры формы данного кристалла алмаза.

Для выяснения зависимости распределений трех параметров эллипсоида по всем поверхностям одного кристалла были рассчитаны парные коэффициенты корреляции. Учитывая, что отражающие криволинейные грани замыкают всю поверхность кристалла и увеличение площади одной из граней закономерно приводит к уменьшению площадей смежных с ней граней, естественно ожидать наличия определенной связи между параметрами поверхностей, но не обязательно выполнения закона отрицательной корреляции, характерного для статистически замкнутых систем (Ткачев, 1999). Напомним, что формулы (3.23) получены на основании предположения о совершенном кристалле с равными симметричными округлыми гранями. Изометричная форма грани додекаэдроид алмаза способствует тому, что, чем меньшую площадь на проекции имеет грань, тем больше полуоси эллипсоида, и, наоборот, чем больше грань, тем меньше полуоси эллипсоида. Поэтому между a_2 и a_3 ожидался и был обнаружен положительный коэффициент корреляции 0,63. Но отсутствие корреляции между a_2 и α ($r = -0,06$) и заметную связь между a_3 и α (0,33) трудно объяснить.

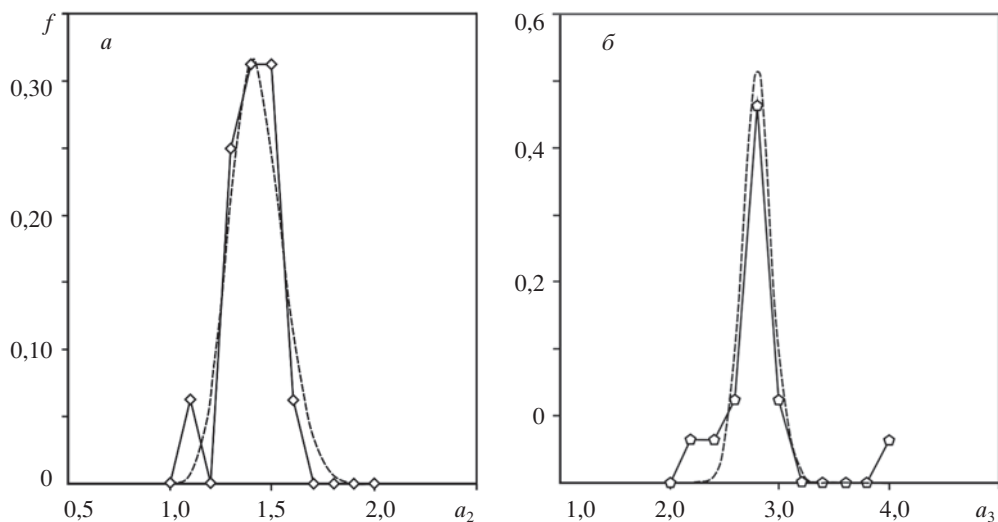


Рис. 3.21. Функции распределения относительных параметров a_2 и a_3 эллипсоида, описывающего поверхность изометричного бразильского алмаза Топ-02. Пунктирной линией показаны функции логарифмически нормального распределения, аппроксимирующие эмпирические кривые

Естественно, что проводить детальные замеры всех 24 граней каждого кристалла-додекаэдра не представляется возможным. Поэтому нами использовались данные одной, реже двух гномограмм одного кристалла, на каждой из которых присутствовали от одного до четырех симметричных треугольных рефлексов. Соответственно обобщенный эллипсоид рассчитывался по средним значениям угловых размеров имевшихся в распоряжении рефлексов (обычно до четырех на единственной гномограмме) и учитывались коэффициенты вариации относительных параметров обобщенного эллипсоида.

3.6.2. Среднестатистический эллипсоид для выборки алмазов

Очевидно, что механизм нормального растворения кристаллов допускает вариации параметров поверхностей второго порядка как на одном, так и на разных кристаллах, находящихся в одинаковых термодинамических условиях. Хотя природный процесс растворения всегда характеризуется флуктуациями термодинамических параметров, он не определяет в явном виде закон статистического распределения параметров поверхностей растворения. Учитывая, что каждый из трех параметров поверхности a_2 , a_3 и α обобщенного эллипсоида для одного выделенного кристалла подчиняется закону распределения, близкому к логарифмически нормальному, можно предположить, что этот закон справедлив для параметров всех элементарных поверхностей кристаллов алмаза из одной парагенетической совокупности. Однако, к сожалению, для природных кристаллов алмаза проблему парагенезиса на основании только кристалломорфологии, по нашему мнению, нельзя считать в принципе разрешимой. Даже сонахождение кристал-

лов алмаза в любом из «коренных» источников (кимберлит, лампроит и др.) не дает основания считать их парагенетичными, поскольку такой источник может оказаться только транспортером алмазов, но не средой их зарождения и роста.

Для россыпных кристаллов алмаза сформулированная статистическая гипотеза еще менее обоснована. Физические закономерности формирования россыпи усложняются, но задача статистики может оказаться одновременно и более простой. Россыпь представляет собой парастерическую ассоциацию минералов, в которой закон распределения параметров формы кристаллов будет зависеть от множества факторов ряда физико-химических процессов рассеяния и концентрирования минералов. Многочисленные наблюдения показывают, что генеральные совокупности округлых алмазов мира, в том числе из россыпных месторождений Якутии, Бразилии и Урала, характеризуются общепризнанной формой додекаэдроида уральского типа. Поэтому средние показатели формы кристалла алмаза, очевидно, должны обладать устойчивостью и надежно характеризовать статистический ряд. Для таких выборок выполняется закон больших чисел. Согласно предельным теоремам теории вероятностей, множество случайных явлений в природе подчиняется определенным общим закономерностям. В частности, в распределениях случайных и даже некоторых зависимых величин, обусловленных воздействием множества независимых факторов, лежит обычно нормальный закон распределения (Абезгауз и др., 1970).

Примем гипотезу нормального распределения для логарифмов параметров a_2 , a_3 и α обобщенного эллипсоида для выборки россыпных алмазов, вошедших в парастерическую ассоциацию не только по причинам их совместного происхождения, транспортирования, концентрирования в россыпи, но и одинаковой сохранности в россыпи и в процессе технической добычи и сепарирования. Эта гипотеза не связана с описанным выше законом распределения параметров криволинейных граней на одном кристалле.

Примем также, что три параметра поверхности обобщенного эллипсоида в статистической выборке алмазов независимы друг от друга, что единичному кристаллу, как было показано, совершенно не свойственно.

В коллекции округлых бразильских алмазов, насчитывающей 97 кристаллов, на 57 были обнаружены рефлексы и фрагменты треугольной формы, располагающиеся на гномонической проекции кристалла в области, характерной для эллипсоида растворения. В выделенную группу кристаллов с треугольным рефлексом были включены алмазы как с формами растворения, так и комбинированными формами, сочетающими признаки растворения, механического истирания и травления. На первом этапе наших исследований не были использованы критерии, позволяющие различать поверхности истирания, растворения и травления, поэтому формы механической деградации поверхности алмаза, а также травления (в основном диффузионного режима) обусловили наличие ошибок и большой диапазон значений измерений. Расчеты параметров обобщенного эллипсоида по угловым размерам треугольного рефлекса были произведены с помощью формул (3.23). Полученные результаты представлены в статистических рядах частот встречаемости на рис. 3.22.

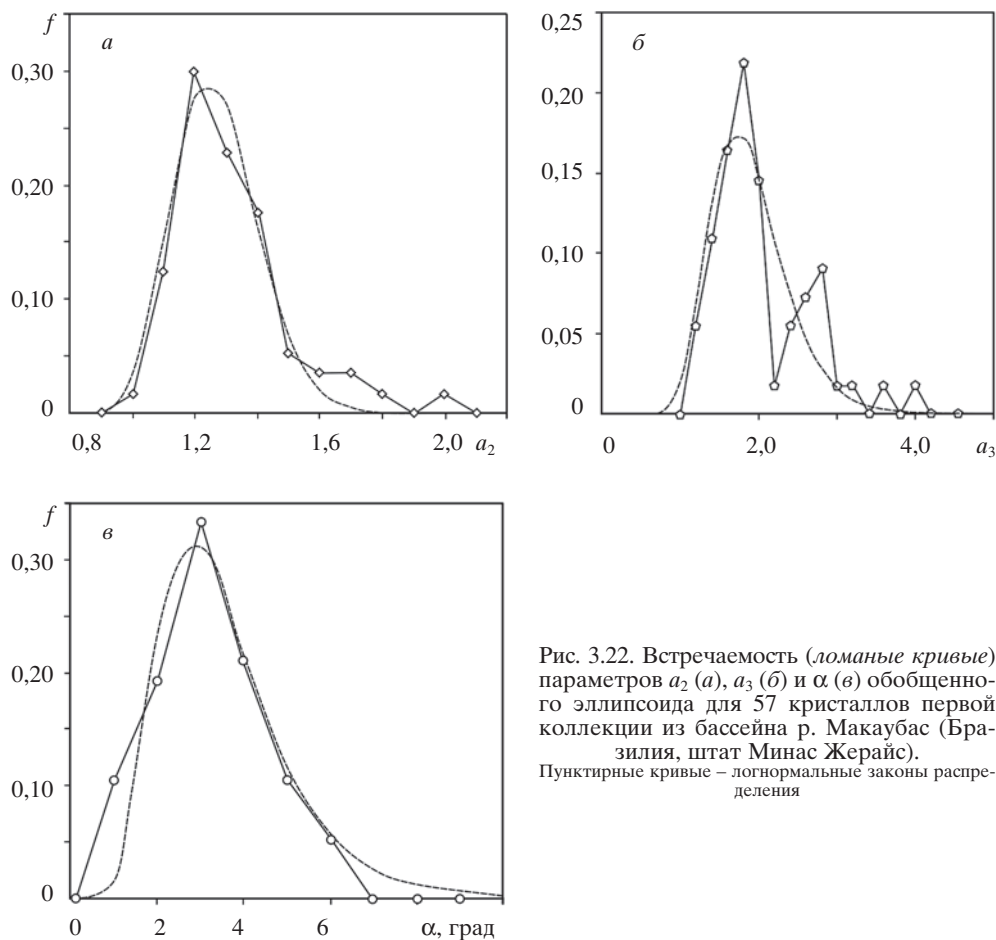


Рис. 3.22. Встречаемость (ломаные кривые) параметров a_2 (*a*), a_3 (*б*) и α (*в*) обобщенного эллипсоида для 57 кристаллов первой коллекции из бассейна р. Макаубас (Бразилия, штат Минас Жерайс). Пунктирные кривые – логнормальные законы распределения

Эмпирические данные аппроксимированы логнормальным законом распределения по методу наименьших квадратов. Установлено, что функция распределения параметра a_2 весьма сходна с логарифмически нормальным законом, но другие показатели формы a_3 и α не достаточно хорошо подчиняются аппроксимирующим кривым (см. рис. 3.22). Отличие функций распределения от теоретического закона мы связываем с тем, что небольшая исследуемая выборка 57 кристаллов представлена неоднородной совокупностью, в которой объединены группы кристаллов, по крайней мере, трех типов: 1) кристаллы алмаза с первичными поверхностями растворения, мало измененными процессами механической деградации; 2) кристаллы, демонстрирующие на гониометре вторичные поверхности растворения, развивающиеся по рельефу регенерации; 3) кристаллы, претерпевшие видимый механический износ при квазистатическом сжатии. Кроме того, вероятно, закон распределения угла поворота главной системы координат тензора устойчивости относительно кристаллографической системы координат отличается от логнормального.

Таблица 3.4

Параметры логнормальных распределений показателей поверхностей 57 бразильских алмазов из первой коллекции (р. Макаубас, штат Минас Жерайс, Бразилия)

Параметр	МО	СКО	СКО/МО
a_2	1,267	0,138	0,109
a_3	1,892	0,496	0,262
α	3,596	1,557	0,433

Несмотря на явное несовпадение эмпирических и теоретических кривых для a_3 и α , приведем полученные усредненные характеристики для коллекции бразильских алмазов согласно логнормальной модели распределения (табл. 3.4).

Коэффициенты вариации для a_3 и α соответственно почти в три и более чем четыре раза превышают таковой для параметра a_2 , что также косвенно свидетельствует о неоднородности выборки, включении в нее форм механического износа и травления.

Систематическая ошибка, обусловленная одной из форм механической деградации – пластическим течением структуры, уменьшает длину только одной полуоси A_2 . Соответственно занижается относительный параметр a_2 и множество его значений оказываются более компактными (уменьшается дисперсия значений). Остальные параметры поверхности не чувствительны к фактору пластического течения, обнаруживающемуся при механической деградации алмаза и поэтому неоднородности выборки проявились в законе распределения (см. рис. 3.22, б). Поскольку ошибка, связанная с фактором пластической деформации, не принимает постоянного значения и распределена случайно, ее учет при расчете данных табл. 3.4 не производился. Дальнейшие исследования поверхности алмазов бразильских, якутских и уральских коллекций были проведены с разделением на группы кристаллов с поверхностями растворения и механической деградации. Отдельно учитывался фактор травления, влияющий на форму растворения.

Таким образом, колоколообразный тип кривых распределения параметров эллипсоидных поверхностей по совокупности алмазов уральского типа позволяет находить средние значения параметров и дисперсии, пользуясь, например, логнормальным законом распределения. В дальнейшем средние значения, описывающие среднестатистическую форму алмаза уральского типа по изучаемой совокупности, можно нанести на диаграмму формы алмазов, например, в координатах (a_2, a_3) и (a_2, α) , анализируя особенности среднестатистической формы алмаза конкретного месторождения или провинции.

3.7. РЕГЕНЕРАЦИЯ АЛМАЗА

3.7.1. Регенерация в условиях стабильности структуры алмаза

Если в высокопараметрической квазиравновесной системе кристалл–среда в результате изменения термодинамических условий (скачка давления, изменения температуры, привноса или выноса какого-либо компонента) химический потенциал углерода в среде (флюиде или расплаве) будет незначительно больше химического потенциала углерода в структуре алмаза, то начнется «распад» поверхностей ромбододекаэдроида, тетрагексаэдроида, гексоктаэдра и других фигур на аксессуары в первую очередь

с гранями октаэдра, ромбододекаэдра и куба. При этом площадь поверхности кристалла увеличивается, но термодинамический тренд таков, что дополнительная поверхность не приводит к приросту свободной энергии в системе кристалл–среда, даже, наоборот, уменьшает ее. Алмаз, по всей видимости, единственный среди минералов сохраняет плоскогранную форму кристалла, находясь в термодинамическом равновесии со средой при сверхвысоких давлении и температуре, характерных для верхней мантии Земли. Наличие граней на кристаллах алмаза свидетельствует о том, что разность удельных энергий криволинейной поверхности алмаза и простой формы октаэдра (и ромбододекаэдра), и в меньшей степени куба существенно превышает флуктуации свободной энергии, обусловленные флуктуациями энтропии при высоких термодинамических параметрах, в расчете на единицу поверхности. Поэтому диссипация свободной энергии кристалла в ходе трансформации криволинейной поверхности в плоскогранную при больших флуктуациях энтропии в высокопараметрических условиях представляет собой естественный процесс движения системы к термодинамическому равновесию. Можно утверждать, что поверхность кристалла является его уникальной характеристикой (по сравнению с любыми другими характеристиками, например дефектностью), отличающейся наибольшей чувствительностью к изменениям термодинамических условий вблизи равновесия.

При достижении термодинамического равновесия на первично округлой поверхности кристалла должны возникать плоскогранные акцессории. Средние размеры первых таких пирамид можно связать со средней величиной флуктуации свободной энергии. Но со временем в условиях термодинамического равновесия происходят перестройка поверхности и укрупнение деталей рельефа, приводящие к понижению поверхностной энергии. Такой равновесный процесс трансформации поверхности практически не отличим от роста кристалла на стадии регенерации при эффективно действующем пересыщении. Однако существует одно отличие: в равновесных условиях акцессории, образовавшиеся в результате равновесных флуктуаций, могут быть огранены разными гранями (плоскостями октаэдра, ромбододекаэдра и реже куба), но, укрупняясь, они трансформируются только в так называемый занозистый вид – октаэдрический габитус, тогда как при существенно неравновесном регенерационном росте комбинированная форма акцессорий (кубооктаэдрическая) сохраняется.

Таким образом, признаком эффективно действующего пересыщения при трансформации кристалла к ростовой форме можно считать плоские сетки куба, встречающиеся на акцессориях на гранях алмаза.

Перестройку криволинейной поверхности алмаза в равновесных условиях и рост акцессорий при действующем пересыщении удобно обозначать общим термином «регенерация». Собственно регенерация алмаза начинается при возникновении пересыщения в окружающей среде (Асхабов, 1979). В перестройке поверхности при регенерации большую роль играют винтовые и краевые дислокации. Следует обратить внимание на то, что наиболее крупные акцессории регенерации формируются на выходах дислокаций и плоскостей скольжения при пластической деформации кристалла, где накапливается наибольшее число краевых дислокаций (рис. 3.23, а). Хотя по-

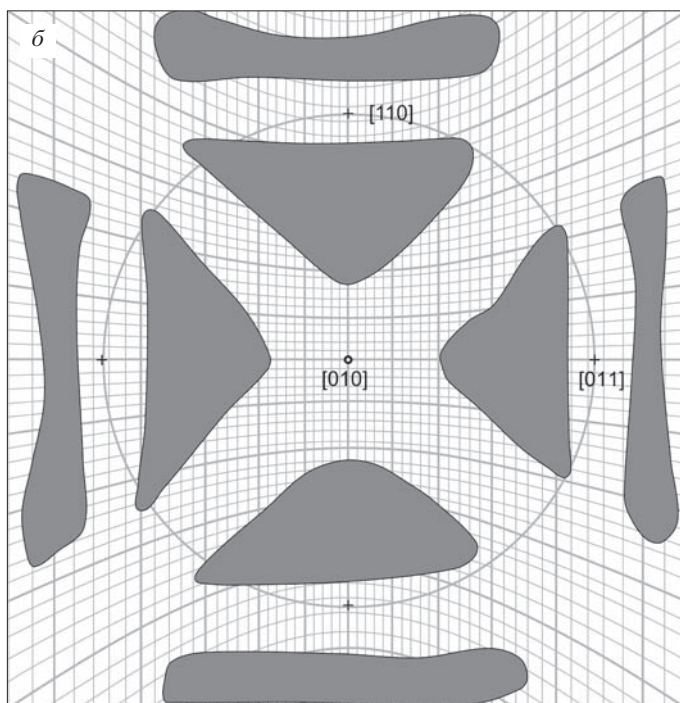
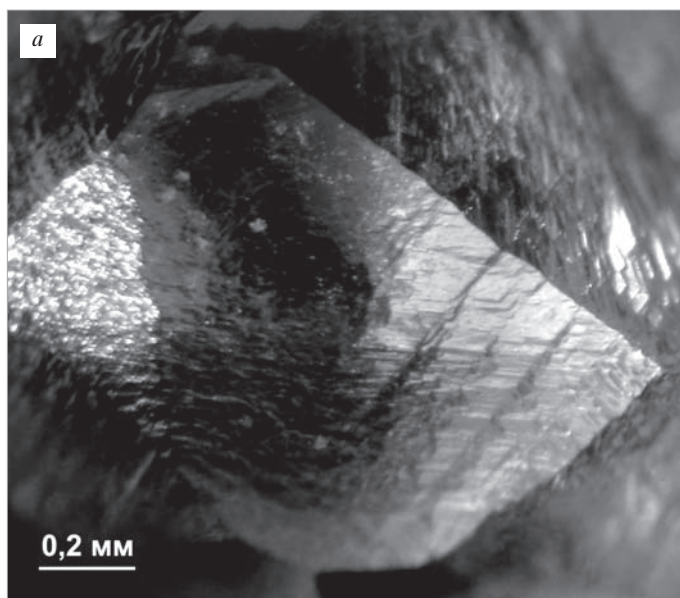


Рис. 3.23. Поверхность регенерации алмаза MGD10/35 из бразильской коллекции бассейна р. Макаубас (штат Минас Жерайс, Бразилия) (а) и гномограмма кристалла (б). Аксессуары регенерации, сложенные гранями куба и октаэдра, трассируют линии выхода плоскостей пластической деформации {111} на его поверхность

лярный комплекс нормалей к поверхности данного кристалла соответствует форме растворения с небольшим хаотическим износом, гранная форма аксессуарии регенерации сложенных гранями октаэдра и куба отчетливо проявляется на фото кристалла (см. рис. 3.23).

Картина рефлексов от округлого алмаза, полностью покрытого пирамидами регенерации, в параболическом гониометре теоретически должна качественно меняться: должны исчезать протяженные световые области додекаэдроида и вместо этого возникать яркие пятна в положении октаэдра $\{111\}$. Развитые аксессуарии регенерации обычно не являются пирамидами, они огранены тремя смежными гранями при одной вершине, чаще двумя гранями октаэдра и одной гранью куба, например (111) , $(11\bar{1})$ и (100) . Только аксессуарии занозистого вида можно называть пирамидами, поскольку они образованы четырьмя смежными, объединенными вокруг одной вершины, кристаллографически эквивалентными гранями октаэдра. Грани куба $\{100\}$ алмаза неустойчивы, сильно подвержены растворению (травлению) и распадаются в последующих вторичных процессах растворения на поверхности цилиндра или эллипсоида, поэтому на экране гониометра обычно не проявляются в форме точечного рефлекса. Тем не менее их положение визуально хорошо различается на кристаллах (см. рис. 3.23). Именно вторичное растворение пирамид регенерации и заключительный небольшой механический износ поверхности привели к тому, что треугольник ABC на гномограмме обладает увеличенными по сравнению с обычными размерами, его вершины закруглены и стороны (ребра) не строго прямолинейны.

Если в качестве базовой гипотезы принять механизм послойного роста кристалла алмаза за счет винтовых дислокаций, выходящих главным образом на грани октаэдра, то механизм роста граней куба может быть не дислокационным, но также послойным, стимулированным выходом слоев роста с грани октаэдра на ребра, смежные с гранью куба. В этом случае на грани куба будут накапливаться примеси, ингибирующие скорость тангенциального роста ступени по грани, поэтому грань куба имеет все шансы сохраниться в ростовой форме кристалла. Такой механизм реализуется при росте синтетических алмазов в камерах сверхвысоких давлений и температур (см. главу 1). Согласно описанному механизму, плоские грани ромбододекаэдра тоже могут присутствовать на кристалле, но они, как показывает анатомия природных кристаллов алмаза (Варшавский, 1968; Бескрованов, 1992; Хачатрян и др., 2008), имеют еще меньшую встречаемость, чем грани куба. Тем не менее положение граней ромбододекаэдра на кристалле алмаза, пережившем этап растворения до стадии додекаэдроида и начавшем регенерационный рост, будет постепенно проявляться. Тригональные слои с прямолинейными сторонами, образующиеся на гранях октаэдра и имеющие полицентрический вид, формируются чаще при регенерационном росте как классические макроступени роста. Здесь мы не рассматриваем генезис дитригональных слоев с выпуклыми сторонами, часто наблюдаемых при травлении алмаза, например, в карбонатных расплавах (Khokhryakov, Pal'yanov, 2010).

Ростовые макроступени накапливают адсорбированные на поверхности кристалла примеси, замедляющие тангенциальный рост. Перемещаясь по

границы октаэдра от центра к периферии, эшелоны макроступеней собираются на краях регенерированной грани октаэдра, на ребрах – в местах положения граней ромбододекаэдра. Концентрация примесей возрастает и приводит к значительному замедлению скорости нормального роста поверхности ромбододекаэдроидов. Так можно объяснить генезис комбинационной формы октаэдр–ромбододекаэдроид, на которой практически идеальные плоские грани октаэдра соседствуют с бороздчатыми, криволинейными поверхностями ромбододекаэдроидов, отравленного примесями. На последних в результате действия описываемого механизма роста проявляется так называемая параллельная сноповидная или занозистая штриховка (рис. 3.24).

Однако параллельная штриховка, образованная регенерационными процессами, отличается от штриховки, связанной с ростовой зональностью кристалла или полосчатостью, возникшей в результате пластической деформации кристалла (рис. 3.25). Зональность расположения дефектов в теле алмаза, образовавшаяся при его росте, в ходе растворения проявляется на поверхности додекаэдроидов в виде концентрических гексагональных полос вокруг выхода оси L_3 . В секторах роста разных граней октаэдра ростовая зональность синхронна, поэтому полосы вокруг разных тройных осей должны быть идентичными. На некоторых кристаллах алмаза со Среднего Тимана и вишерских алмазах ростовая зональность проявляется особенно ярко. На рис. 3.25 представлено фото якутского алмаза из россыпи Булкур со штриховкой, весьма напоминающей ростовую полосчатость. Однако в данном случае штриховка возникла в результате пластических деформаций (см. главу 4), которые, возможно, были стимулированы ростовыми дефектами, облегчающими скольжение по соответствующим плоскостям спайности алмаза, поэтому в разных секторах роста граней октаэдра штриховка оказалась так сходна.

В рамках предлагаемого механизма регенерации, участвующего в развитии комбинированной формы октаэдр–ромбододекаэдроид, возможен крайний случай, когда адсорбированные на ступенях роста примеси в больших количествах накапливаются на поверхностях ромбододекаэдроидов и кристалл приобретает октаэдрический облик с желобами по ребрам $\langle 110 \rangle$ (рис. 3.26).

Интересно отметить, что рефлексы от поверхностей додекаэдроидов бразильского кристалла № 12-1 на гномонической проекции на экране параболического гониометра формируют особый, характерный по форме криволинейный сегмент, относимый нами к рефлексам от механически обработанных поверхностей при ударном износе кристалла (см. главу 4). Такая картина рефлексов алмаза очень распространена среди бразильских алмазов и, как правило, не связана с определенным обликом кристалла алмаза. Признаки ударного износа в виде плоскостей пластических деформаций визуально наблюдаются на рис. 3.26, б. Это объяснимо, если учитывать механизм регенерационного роста. Края макроступеней, концентрирующихся на гранях ромбододекаэдроидов, легко подвергаются хаотической механической обработке и полировке, а результирующий рефлекс отражает последнюю стадию эволюции поверхности (рис. 3.26, б).

Комбинированная форма алмаза характерна в целом для процесса регенерации кристалла, который в результате растворения приобретает округ-

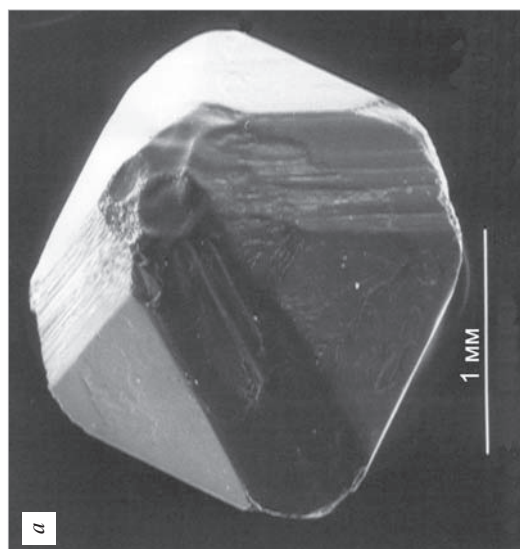


Рис. 3.24. Морфология поверхности кристалла комбинированной формы октаэдр-додекаэдронд MGD10/3 при разных увеличениях (р. Макаубас, штат Минас Жерайс, Бразилия)

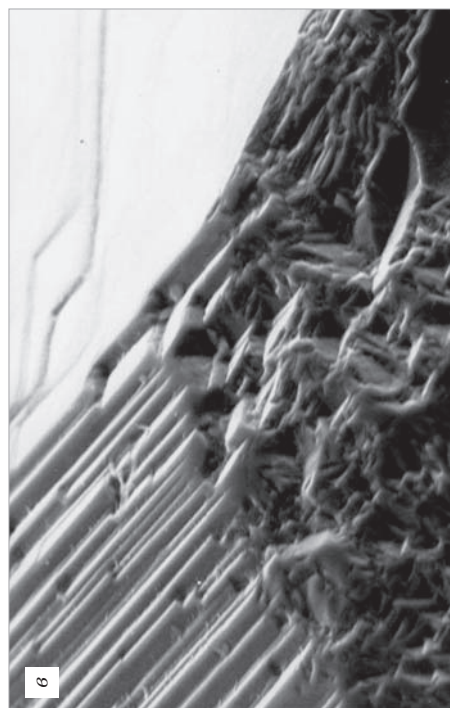
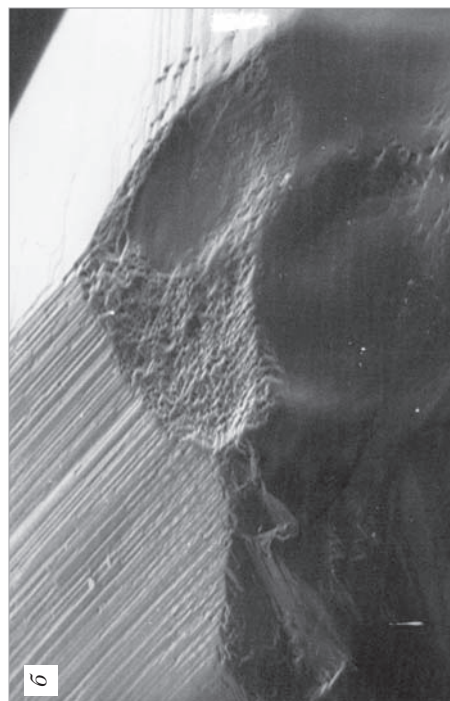
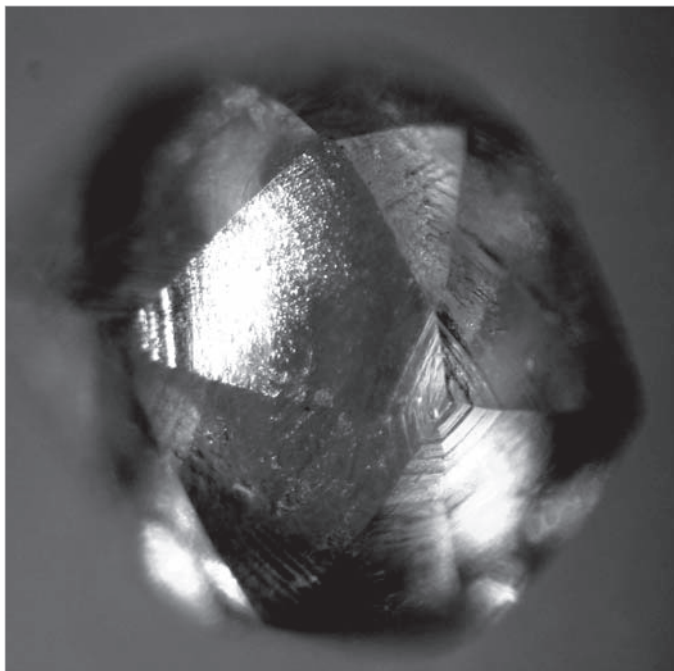


Рис. 3.25. Кристалл-додекаэдроид № 893.1-5 россыпи Булкур (Якутия) с пластической деформационной штриховкой



лые поверхности додекаэдроидов. Поскольку рост не симметричен растворению и механизмы этих процессов различны, полная регенерация кристалла до формы октаэдра занимает гораздо больше времени, чем превращение октаэдра в додекаэдроид при растворении. Поэтому комбинированная форма октаэдр–ромбододекаэдроид (см. рис. 3.24) так широко распространена среди кристаллов алмаза.

В результате наблюдений за природными бразильскими, якутскими и уральскими округлыми алмазами установлено, что одни и те же типы элементарных поверхностей растворения формируются на гладком кристалле и аксессуориях регенерации.

Диагностика регенерационного рельефа с помощью параболического гониометра относительно проста. Как правило, после этапа регенерации природный алмаз испытывает растворение, травление или механическую обработку, поэтому аксессуории регенерации меняют свою форму. Если кратковременный этап регенерации вновь сменяется растворением (или травлением) алмаза, последовательность развития рефлексов на гномограмме отличается от изложенной выше схемы (см. рис. 3.13). Грани октаэдра $\{111\}$ и ребра $\langle 110 \rangle$, располагающиеся на пирамидах регенерации, в ходе растворения трансформируются последовательно согласно описанному выше сценарию, но грани куба $\{100\}$ на том же бугорке регенерации могут сразу преобразовываться в поверхность эллипсоида, минуя стадию эллиптического цилиндра. Кроме того, фрагменты сохранившейся поверхности эллипсоида первичного растворения, не затронутые аксессуориями регенерации, также проявляются в соответствующих областях гномограммы.

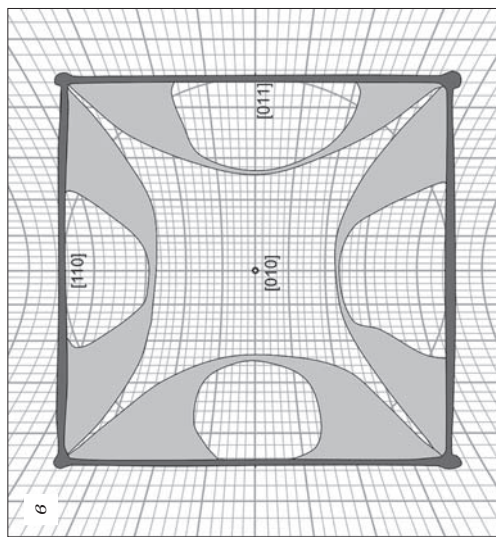
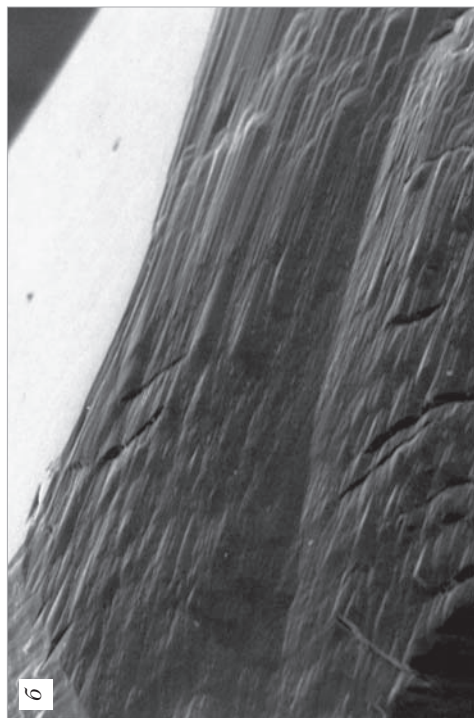
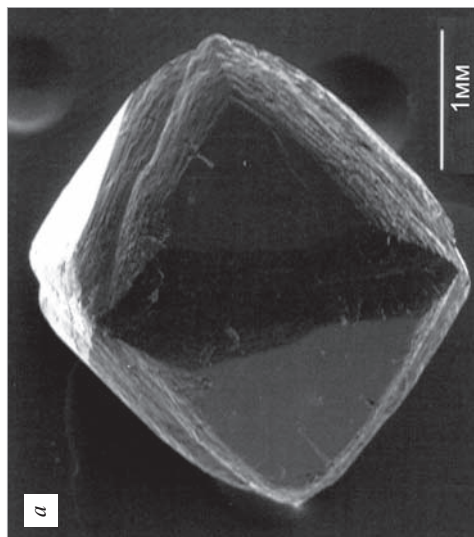


Рис. 3.26. Кристалл алмаза комбинированной формы № 12-1 из бразильской коллекции (бассейн р. Макауabas, штат Минас Жерайс, Бразилия):
 а – общий вид; б – элементы рельефа поверхности додекаэдроида; в – гномограмма кристалла

Под поверхностью первичного растворения мы принимаем только ту поверхность, которой кристалл обладал до регенерационного роста. Так, на гномограмме формируется комбинированный рефлекс, образованный одновременно поверхностями октаэдра (результат регенерации), эллиптического цилиндра (начальное растворение после этапа регенерации) и эллипсоида (реликты первичного растворения и растворение граней куба) (рис. 3.27). Очевидно, что множество растворяющихся бугорков регенерации, сложенных одними и теми же поверхностями, создают на гномонической проекции единую систему рефлексов в одной выделенной области (см. например, рис. 3.23). Дальнейшее растворение регенерационного рельефа алмаза приводит к образованию так называемого шагреневоего рельефа поверхности, а рефлекс от множества аксессуаров на гномограмме формируют зернистое, размытое пятно, напоминающее треугольник ABC , располагающееся строго на его месте. Размеры такого пятна обычно превышают размеры среднего треугольника ABC , но форма близка к нему. При вторичном растворении интенсивность света в пятне распределена относительно равномерно, без уменьшения освещенности в центре пятна. По такому пятну также можно рассчитать параметры обобщенного эллипсоида, который всегда обладает меньшими значениями, чем параметры эллипсоида исходной поверхности алмаза до стадии регенерации. Продолжение процесса растворения должно приводить к постепенному сглаживанию шагреневоего рельефа, а на гномограмме должен наблюдаться переход к правильному ABC -рефлексу додекаэдроида.

Зернистость, неправильная форма и увеличенные размеры пятна на экране гониометра могут быть связаны также с природной хаотической механической обработкой алмазов. Но при этом должны проявляться дополнительные признаки износа поверхности (см. главу 4). В частности, в центре рефлекса ABC должно наблюдаться понижение освещенности (см. рис. 3.27, б). Иногда механическая деградация поверхности бывает слабо выраженной и этот признак может не приниматься во внимание. Вторым фактором, приводящим к появлению поверхности, визуально напоминающей шагреня, – это травление. В результате травления формируется особая группа часто неправильных по форме рефлексов, тяготеющая к точке октаэдра (111) и линии цилиндра. Однако травление выпуклой поверхности алмаза, как правило, не затрагивает всю область треугольного рефлекса растворения, кроме области рефлекса вблизи точки D на гномонической проекции.

При продолжении растворения регенерационного рельефа в первую очередь возникают прямолинейные стороны треугольника (см. рис. 3.27, б), а вершины A , B и C обозначаются только с восстановлением гладкой формы всего ромбододекаэдроида, при полном исчезновении регенерационных бугорков и дополнительных поверхностей, искажающих форму рефлекса. Интересно отметить, что вершина C светового треугольника статистически проявляется быстрее и встречается чаще вершин A и B , что связано, вероятно, не столько с растворением, сколько с последующей механической деградацией поверхности.

Растворение четырехгранных аксессуаров регенерации занозистого вида сначала происходит по схеме, показанной рис. 3.13, но, поскольку пирами-

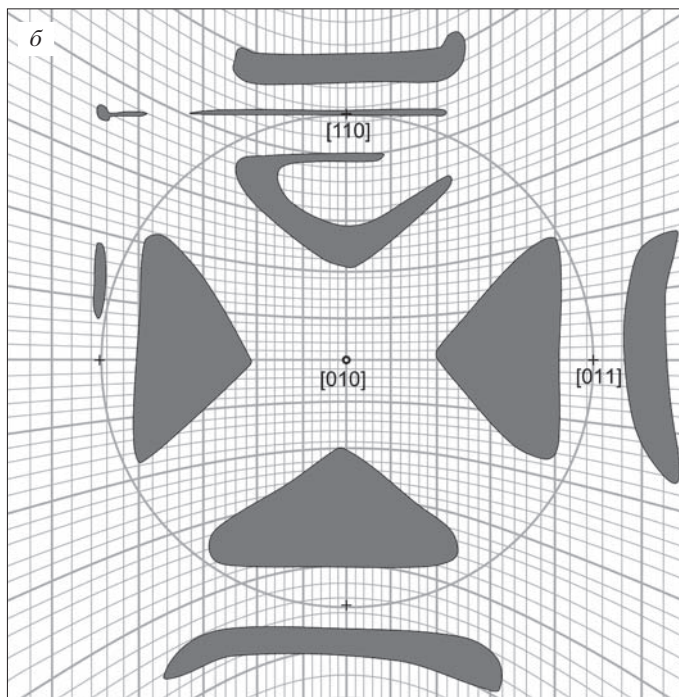
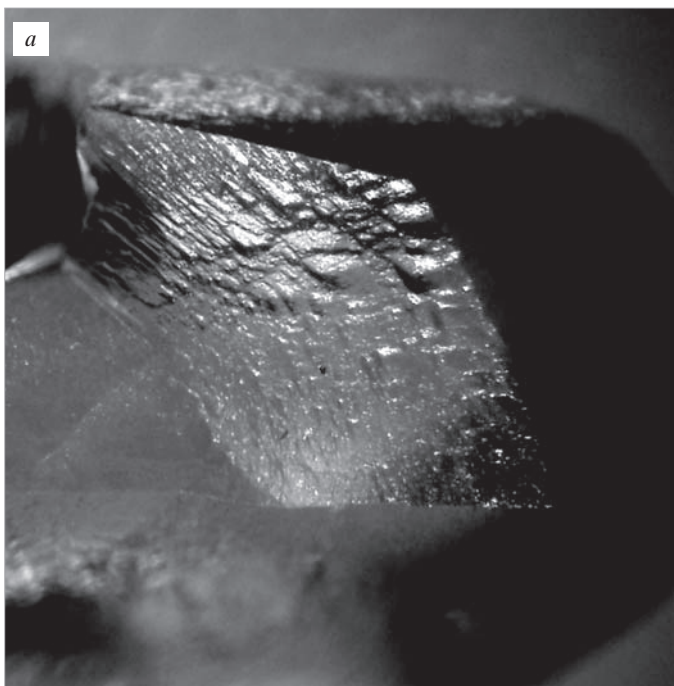


Рис. 3.27. Фрагмент поверхности (а) и гномограмма (б) кристалла № 8-6 из выборки на участке Холомолоох (Якутия).
На кристалле проявлены признаки регенерации и последующих растворения (травления) и небольшого хаотического механического износа

ды, образованные субгранями $\{111\}$, сильно наклонены к поверхности додекаэдроида, на гномограмме после стадии, представленной на рис. 3.13, б, сразу проявляется комбинированный рефлекс, сочетающий поверхности октаэдра, цилиндра и эллипсоида, подобный изображенному на рис. 3.27, б.

Важно отметить, что регенерация качественно изменяет кристаллографические параметры поверхности кристалла. На рис. 3.28, а приводится изображение бесформенного алмаза, испытавшего этап регенерации. Факт регенерации, а не механического износа доказывается наличием видоизмененных вторичным растворением (травлением) поверхностей куба (рис. 3.28, б), которые при механическом откалывании не появляются на алмазе. В ходе гониометрических измерений удалось установить, что он представляет собой незакономерный сросток не менее пяти субиндивидов. На экране гониометра обнаружены яркие точечные рефлексы граней $\{111\}$. Взаимная ориентация трех индивидов достаточно точно выявляется по положению серий рефлексов (рис. 3.28, в). Два рефлекса (*A* и *B*) от октаэдрических граней четвертого и пятого субиндивидов (по одному от каждого) не позволяют установить положение их четверных осей. В данном случае, вероятно, тоже имел место механический износ кристалла.

Одним из признаков регенерации служит плоское дно ямок травления обратнопараллельной ориентации на гранях октаэдра. Плоское дно бывших ямок травления (отрицательных пирамид) наблюдается довольно часто и, как правило, одновременно с регенерационным рельефом. Объяснить такой факт можно дислокационным ростом алмаза. Известно, что наиболее крупные ямки травления локализуются на выходах винтовых дислокаций из кристалла, которые являются также и самыми активными центрами роста. Поэтому на стадии регенерации на дне ямок происходят первые изменения рельефа поверхности алмаза и образуется макроскопически плоская растущая грань.

Необходимо обратить внимание на следующее важное обстоятельство. Рефлексы в положении эллипсоида на комбинированном рефлексе кристалла могут быть образованы как первичной поверхностью растворения, отражающей состояние кристаллической поверхности, предшествующее этапу регенерации, так и поверхностью вторичного растворения бугорков регенерации, дающих суммарный рефлекс, аналогичный первому, в том же пространственном направлении. Вклады обеих поверхностей в картину световых рефлексов можно оценить по внешнему виду кристалла. Если вся поверхность кристалла, имеющего додекаэдрический облик, целиком покрыта округлыми бугорками примерно одного размера, то можно считать, что на гномограмме отражается поверхность вторичного растворения. При наличии небольшого количества округлых акцессорий на открытой поверхности додекаэдроида на гномограмме будет проявляться главным образом поверхность первичного растворения – собственно додекаэдроид (рис. 3.29). Пользуясь таким критерием, можно разделить выборки кристаллов с поверхностями растворения на две группы – с рефлексами на гномограммах от первичных и вторичных поверхностей растворения (предпоследних и последних поверхностей растворения в истории алмаза).

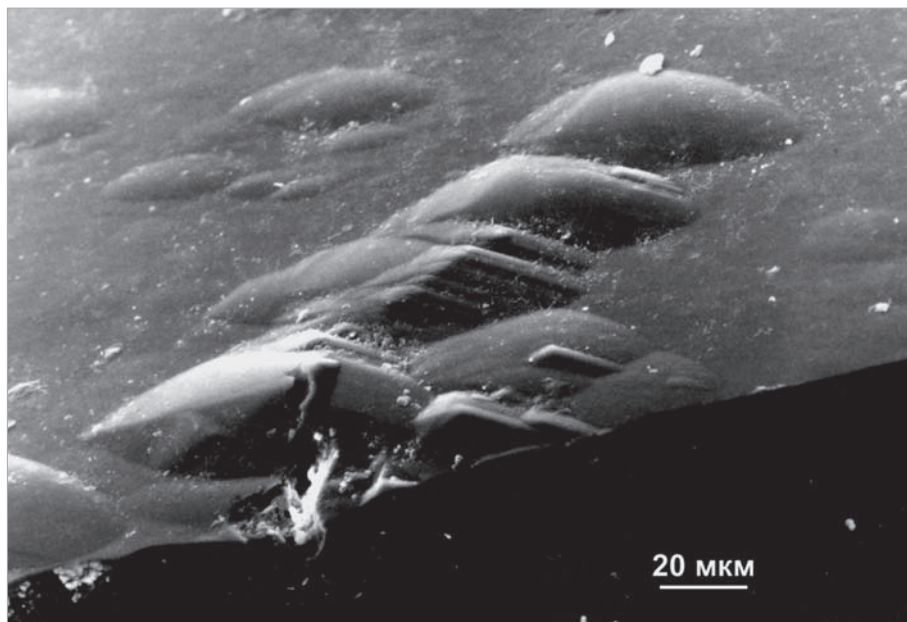


Рис. 3. 29. Поверхность кристалла № 7 из бразильской коллекции (р. Макаубас, штат Минас Жерайс, Бразилия)

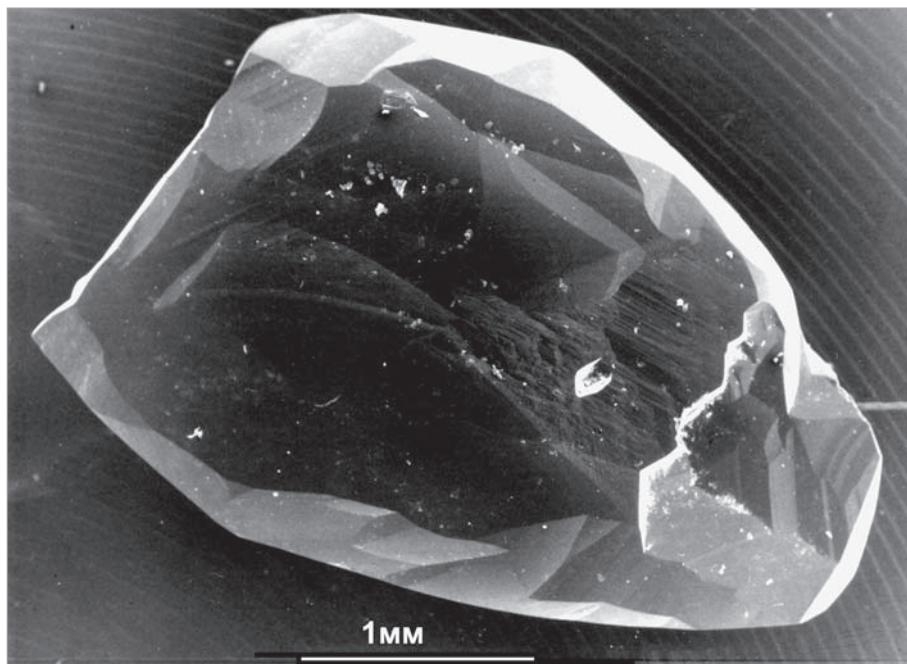


Рис. 3.30. Ламели на поверхности алмаза-двойника № 9 (р. Макаубас, штат Минас Жерайс, Бразилия)

При достаточно длительном вторичном растворении основные морфологические признаки прошедшего кратковременного этапа регенерации на гномонической проекции рефлексов на экране гониометра могут исчезнуть и поверхность приблизится к виду, который соответствовал последней стадии растворения, предшествующей регенерационному росту. Исчезнут новообразованные плоскости октаэдра и поверхности эллиптического цилиндра. Поверхность развитого вторичного растворения уже невозможно будет отличить от поверхности первичного растворения.

Некоторые элементы поверхности можно считать признаками последних в истории кристалла алмаза этапов регенерации, но видоизмененных в результате последнего травления (растворения). К ним можно отнести так называемые ламели на грани кристалла (рис. 3.30), хотя, по мнению ряда исследователей, ламелярная поверхность свидетельствует о механическом истирании алмаза (Афанасьев и др., 2000). Ламели можно интерпретировать как результат совместного растворения (травления) компактной группы выделяющихся наибольшей высотой аксессуарий, внутри которой еще в ходе этапа регенерации частично произошел геометрический отбор. Таким образом, вся поверхность криволинейной грани будет разделена на ряд выживших в конкурентной борьбе крупных ступенчатых ростовых «пирамид» и постепенное их вторичное растворение или диффузионное травление приведет к формированию ламелей как весьма пологих холмов, разделенных отрицательными ребрами (см. рис. 3.30). В ходе последнего растворения аксессуарий возможно образование отдельных участков поверхностей с отрицательной кривизной, особенно в местах, прилегающих к двойниковому шву, но в основном поверхности ламелей, согласно наблюдениям и описанному механизму образования, обладают положительной кривизной и проецируют рефлекс в область эллипсоида. Ламели в той же мере, что и другие поверхности алмаза, могут иметь дополнительные признаки механической обработки на гномограмме.

3.7.2. Регенерация метастабильного алмаза

Можно выделить особый случай регенерации метастабильного алмаза при больших отклонениях от равновесия. Такой случай, вероятно, произошел с кристаллами из россыпи ближнего сноса Новинка (источник – трубка Интернациональная) Ботуобинского района Якутской алмазоносной провинции.

На поверхности кристалла № 178 из россыпи Новинка (рис. 3.31), относимого по визуально-морфологической оценке к так называемым тригонтриоктаэдроидам, хорошо видны множественные аксессуары, формирующие в совокупности псевдограницы тригонтриоктаэдроида. Однако на гномонической проекции в параболическом гониометре кристалл демонстрирует только треугольное кольцо вокруг точек октаэдра и дополнительно ряд ярких рефлексов-точек (рис. 3.32), которые совпадают с F-гранью октаэдра {111}, S-гранями тригонтриоктаэдра {455}, {355} и тетрагонтриоктаэдра {343} согласно теории ПЦС Хартмана–Пердока.



Рис. 3.31. Фрагмент поверхности кристалла № 178 из россыпи Новинка

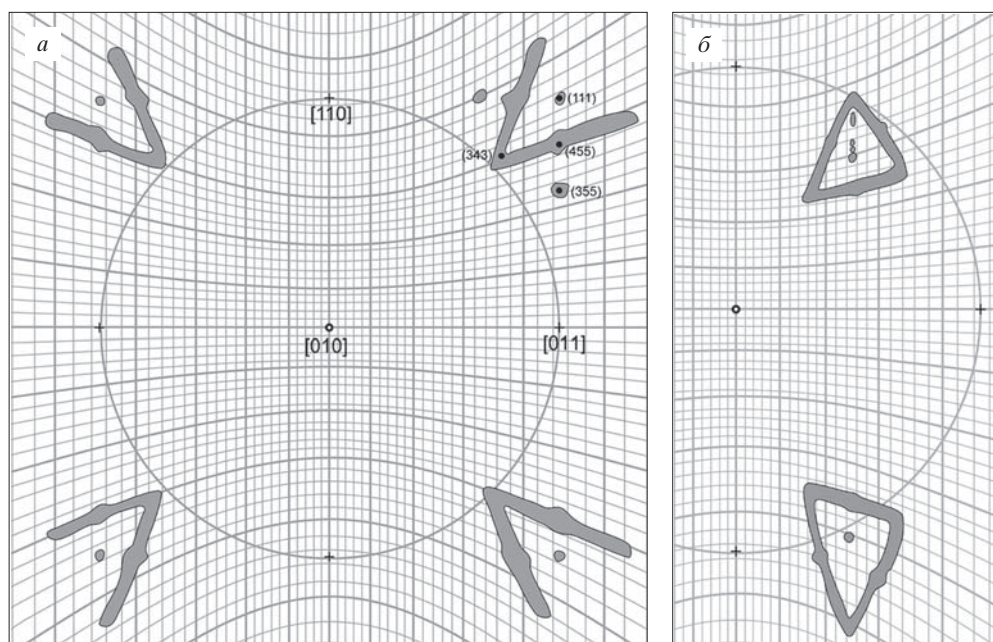


Рис. 3.32. Гномограммы кристалла № 178. Кристаллографическая (а) и внеосевая (б) установок.

Точками показаны положения F- и S-граней структуры алмаза в фундаментальной области согласно теории периодических цепей сильных связей

Грани тетрагонтриоктаэдра {343} встречены нами на искусственных НРНТ-алмазах (см. главу 2) и связаны с ростом алмаза на стадии выключения, в связи с чем высказано предположение (Ракин, Пискунова, 2012) о том, что появление новых S-граней, согласно теории ПЦС, никогда не возникающих на поверхности алмаза при обычном высокопараметрическом росте, может свидетельствовать о сильно неравновесном росте алмаза в условиях метастабильности его структуры – при пониженном давлении.

Есть представления, основанные, в частности, на расчетах фугитивности кислорода, что кристаллизация алмаза может происходить в верхних горизонтах литосферы и земной коре в промежуточных кимберлитовых очагах или непосредственно в кимберлите под воздействием сильно неравновесных флюидов, когда литостатического давления недостаточно для достижения условий термодинамической стабильности структуры алмаза (Haggerty, 1986; Robinson et al., 1989; Pierson, 1993). Можно высказать предположение, что в данном случае кристалл тригонтриоктаэдроид (см. рис. 3.31) испытал регенерационную стадию, находясь в кимберлите под воздействием остаточных флюидов в условиях метастабильности структуры. В ходе выветривания кимберлитовой трубки алмаз был вынесен в россыпь ближнего сноса, где и произошла последняя незначительная механическая обработка поверхности, о чем говорит треугольная форма светового рефлекса (см. рис. 3.32). Утолщения рефлекса в положениях S-граней указывают на большую интенсивность света и соответственно на большую площадь отражающей поверхности. Одновременно можно заметить, что сторона светового треугольника ориентирована близко к дуге 30-й параллели сетки Хилтона. Таким образом, на боковых поверхностях многочисленных аксессуарий кристалла алмаза № 178 формируется поверхность, похожая на конус, направленный осью по четверной оси структуры алмаза и имеющий угол образующей 30° (нормаль к образующей 60°). Внутри треугольного поля кроме точечного рефлекса (111) отмечаются плоские сетки K-граней тетрагонтриоктаэдров (655), (14.13.13) и (26.25.25) (см. рис. 3.32, б). Отклонение этих плоскостей относительно грани октаэдра составляет соответственно 5, 2 и 1° . Образование K-граней, близких к октаэдру, может быть обусловлено также механическим истиранием ребер между F- или S-гранями при выпуклом рельефе (в данном случае ребра между гранями (111) и (433)).

Появление плоских участков F- и S- и K-граней на кристаллах возможно как при росте, так и растворении (травлении) и даже механическом износе. На положительном рельефе возникновение K-граней легче объяснить механическим истиранием, а на отрицательном рельефе (в ямках травления) кинетическими эффектами травления. Однако на гномограмме, представленной на рис. 3.32, линии, соединяющие вершины светового треугольника, свидетельствуют о положительном рельефе, и поэтому фактор механического истирания ребер между S-гранями оказывается наиболее вероятным.

Формы тетрагонтриоктаэдров формируются на алмазе как на выступающих бугорках, так и в треугольных ямках травления параллельной ориентации на гранях октаэдра. В литературе отмечались такие формы (Афанасьев и др., 2000; Khokhryakov, Pal'yanov, 2010), их связывали с определенными окисли-

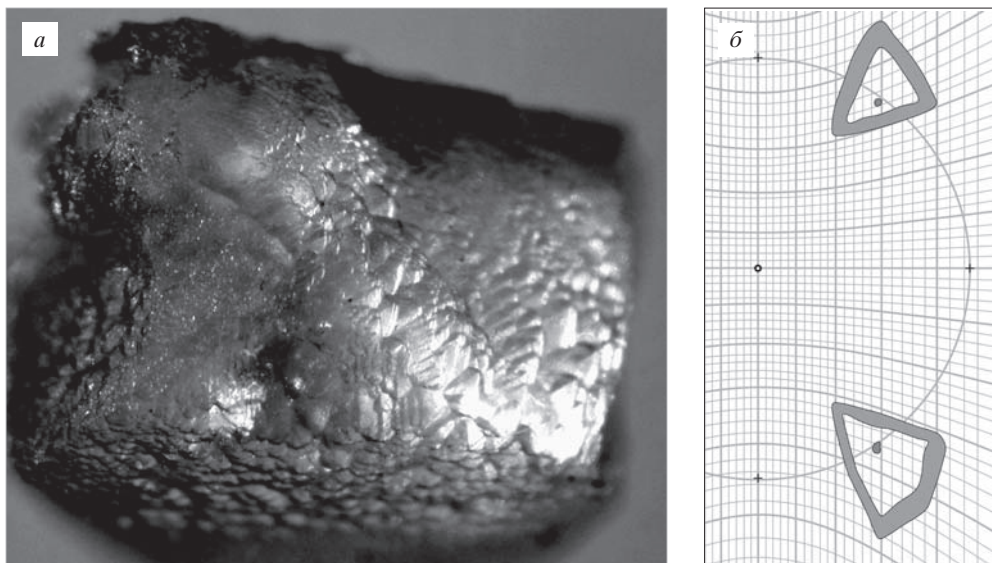


Рис. 3.33. Фрагмент поверхности кристалла № 313 из россыпи Новинка (а) и его внеосевая кристаллографическая проекция (б)

тельными условиями среды – учитывались значения фугитивности кислорода (Fedortchouk, Canil, 2009). Однако в данном случае появление тригонтриоктаэдров и тетрагонтриоктаэдров, вероятно, обусловлено не растворением, а регенерационным ростом алмаза в условиях метастабильности структуры.

Другой кристалл № 313 (рис. 3.33), извлеченный из той же россыпи, демонстрирует подобную структуру рефлекса. Однако отмечаются и небольшие различия. Благодаря излому всех трех сторон треугольного кольца в центральной точке рефлекс более точно проходит через положения S-граней алмаза {455} и {343} (см. рис. 3.33, б). В данном случае сторона светового треугольника не будет описывать коническую поверхность. Непрерывный рефлекс света между S-гранями (455) и (343) обусловлен также небольшим механическим износом бугорков (см. рис. 3.33, а) по разделяющему субгранице ребру.

Таким образом, особенности рельефа обоих кристаллов (№ 178 и 313) из россыпи Новинка свидетельствуют о регенерации кристаллов, прошедшей до стационарного состояния, и последующем небольшом механическом износе. Регенерационные процессы на кристалле алмаза приводят к качественной перестройке системы рефлексов, но облик кристалла при этом может меняться незначительно.

К важнейшим полярным признакам прошедшей регенерации относятся следующие:

- 1) сочетание додекаэдрического или иного облика кристалла с ясными рефлексами октаэдра и эллиптического цилиндра на его гномонической проекции при отсутствии признаков механического износа кристалла и травления;

2) комбинированная картина рефлексов на экране гониометра, состоящая одновременно из точек октаэдра, линий цилиндра и треугольников эллипсоида;

3) особый случай регенерации алмаза в условиях стабильности структуры графита может происходить с образованием бугорков роста и ограничением их S-гранями тетрагонтриоктаэдров и тригонтриоктаэдров.

Иногда плоское дно треугольных по форме ямок обратнопараллельной ориентации на гранях октаэдра может также служить индикатором начавшейся регенерации.

Комбинированный рефлекс, образованный поверхностями растворения трех видов: плоскостями октаэдра, эллиптическим цилиндром, эллипсоидом, – можно считать главным типоморфным признаком процесса регенерации, если при этом отсутствуют признаки механической деградации поверхности и травления.

К сожалению, регенерационный рельеф в совокупности с элементами механической обработки поверхности на кристаллах алмаза уральского типа часто не позволяет рассчитать параметры обобщенного эллипсоида растворения как наиболее важной формы растворения, но выделение таких кристаллов в особую категорию уже представляет собой важный шаг на пути развития теории криволинейных форм кристаллов минералов, в частности при разработке методики расчета среднестатистической формы исследуемой совокупности алмазов.

**ФОРМЫ МЕХАНИЧЕСКОГО ИЗНОСА АЛМАЗА
УРАЛЬСКОГО ТИПА**

**4.1. ВЗАИМООТНОШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАСТВОРЕНИЯ,
ТРАВЛЕНИЯ И МЕХАНИЧЕСКОГО ИЗНОСА
НА КРИСТАЛЛАХ АЛМАЗА**

Согласно введенному нами и описанному в главе 3 тензору устойчивости химических связей на поверхности неравновесного кристалла, каждая поверхность растворения алмаза, являясь характеристической поверхностью тензора, должна иметь свой рефлекс, который занимает определенное положение на гномонической проекции (см. рис. 3.12). Рассматривая только формы растворения, можно сказать, что световые рефлексы от таких поверхностей не должны пересекаться, но могут примыкать в некоторых точках друг к другу. Так, между рефлексами эллипсоида и эллиптического цилиндра всегда существуют «запрещенные» зоны, в которых рефлексы не должны встречаться, что свидетельствует о существовании особых криволинейных ребер на поверхностях растворения. Рефлекс эллипсоида также никогда не пересекается с точкой октаэдра, что на поверхности алмаза отражается в виде ребра. Более того, между основным рефлексом эллипсоида и точкой октаэдра может располагаться криволинейная поверхность гексоктаэдроида, являющаяся фрагментом того же эллипсоида и отделенная ребрами как от грани октаэдра, так и от основной поверхности додекаэдроида. В системе поверхностей форм растворения существует единственное исключение – прямолинейный рефлекс цилиндра. Он начинается непосредственно от точки октаэдра чаще всего без образования какого-либо ребра. Но при этом освещенность точечного рефлекса октаэдра обычно более чем на порядок больше освещенности рефлекса цилиндра, и таким образом достигается качественное различие в характеристиках рефлексов. Существует ли ребро между октаэдром и цилиндром растворения, установить не удалось, поскольку вторичные процессы травления и механического износа особенно эффективны в этой области поверхности алмаза. Наблюдения показывают, что рефлекс цилиндра продолжается непрерывно до точки октаэдра. Цилиндр является также формой и механического износа, и травления, поэтому достоверно установить механизм образования цилиндрической поверхности на кристаллах алмаза чрезвычайно сложно.

Механическая обработка кристалла алмаза с развитыми формами растворения модифицирует рельеф поверхности достаточно сложным образом. Часто на многих монокристаллах алмаза описанное выше правило существования ребер нарушается. Рефлексы от округлых поверхностей алмазов могут находиться в запрещенных областях гномонической проекции,

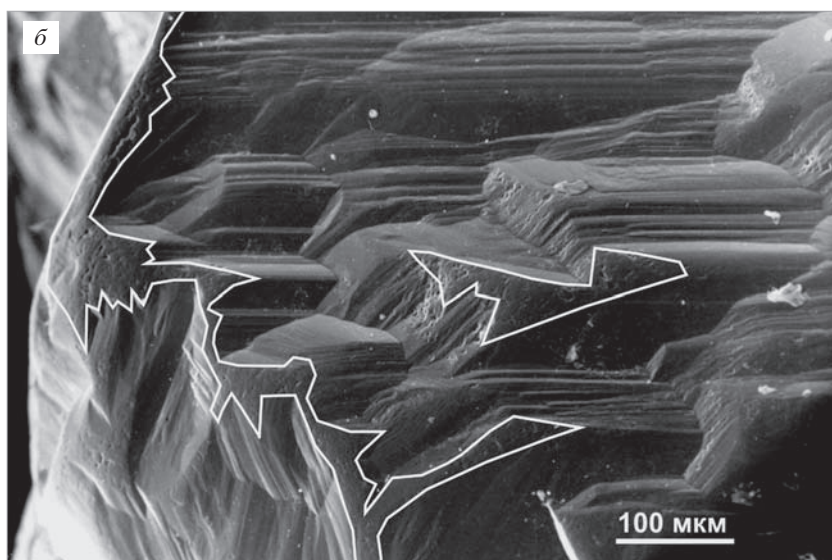
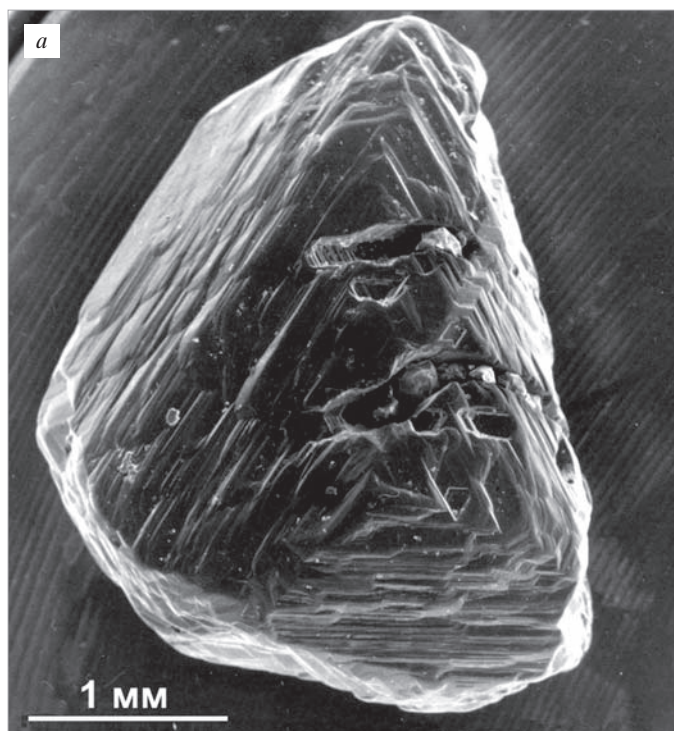


Рис. 4.1. Регенерированная поверхность алмаза № 6 (р. Макаубас, штат Минас Жерайс, Бразилия) с небольшим вторичным растворением (травлением) и явными признаками истирания:
a – общий вид кристалла; *б* – фрагмент поверхности. Белыми линиями выделены два участка поверхностей истирания

часто имеют нехарактерный для форм растворения вид, аномально большие размеры, покрывающие одновременно области разных простых форм растворения, включая смежные запрещенные зоны, а также демонстрируют эффекты понижения симметрии (см. рис. 3.4, 3.17).

Можно допустить, что поверхности, которые трудно описать с позиций теории тензора устойчивости и соответственно отнести к квазиравновесному диффузионному растворению, модифицированы процессами механической деградации (износа, истирания, шлифовки, полировки) или травления алмаза.

Рассмотрим процессы механического разрушения алмаза. Механическая деградация поверхности алмаза может происходить в глубинах литосферы, а также при эвакуации его к дневной поверхности в кимберлитовом или ином транспортёре, при последующей транспортировке водными и воздушными потоками в результате выветривания и в ходе концентрирования и сепарации минералов в россыпях. Хорошо известно, что технология галтовки природных поделочных камней, широко применяемая в камнерезном деле, возникла по аналогии с природными процессами окатывания и полировки камней в прибойной зоне морей или интенсивном речном потоке. Галтовка позволяет получать почти зеркальные гладкие поверхности всевозможной причудливой формы не только поликристаллического агрегата, но и монокристалла. Изучение россыпных алмазов свидетельствует о том, что естественная механическая обработка округлого алмаза может приводить к дополнительному сглаживанию поверхности (рис. 4.1). Иногда граница между поверхностями механической обработки и растворения хорошо заметна под электронным микроскопом (рис. 4.1, б), но чаще она не заметна.

Излагаемые ниже представления о развитии округлой поверхности алмаза уральского типа в процессах механического истирания базируются на известных кристаллофизических закономерностях развития пластических деформаций, напряжений и разрушения кристаллической решетки кубического кристалла симметрии $m\bar{3}m$. Нас в первую очередь интересует механическая трансформация округлых поверхностей алмаза уральского типа.

4.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ДЕГРАДАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ АЛМАЗА. АНИЗОТРОПИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛА

Известно, что механический износ кристалла – образование зародышей разрушения, трещинообразование и скалывание – начинается с возникновения пластических деформаций его кристаллической структуры (Коттрелл, 1958; Най, 1960; Степанов, 1974; Современная кристаллография, 1981). Именно пластические деформации структуры вызывают зарождение трещин. В свою очередь причиной пластических деформаций алмаза, очевидно, являются механические удары и квазистатическое давление на поверхность кристалла со стороны зерен соседних минералов. При этом контакт зерен-ударников с поверхностью алмаза происходит локально, на небольшой площади, где в приповерхностных слоях кристалла формируются значительные напряжения, развиваются пластические деформации, по плоско-

стям скольжения накапливаются дислокации, формируются трещины и образуются сколы. Кристаллы алмаза, не сцементированные с горной породой, подвергаются деформации сжатия, сдвига и редко растяжения.

Известно также, что алмаз, обладая высокосимметричной структурой, при деформациях проявляет анизотропные свойства (Современная кристаллография, 1981). Анизотропию упругих свойств кристалла алмаза можно проиллюстрировать с помощью модуля Юнга. Напряжение в кристалле σ представляет собой тензор второго ранга, который линейно связан с тензором упругой деформации ϵ по закону Гука:

$$\epsilon_{ij} = \sum_{k,l} s_{ijkl} \sigma_{kl}, \quad (4.1)$$

где s – коэффициент упругой податливости, представляющий собой тензор четвертого ранга. Для кубического кристалла алмаза существуют три независимых компонента коэффициента упругой податливости s (из 27), в матричных обозначениях выражаемые как s_{11} , s_{12} и s_{44} (Современная кристаллография, 1981). Модуль Юнга алмаза в произвольном направлении рассчитывается через эти компоненты тензора упругой податливости:

$$\frac{1}{E} = s_{11} + 2 \left(s_{11} - s_{12} - \frac{1}{2} s_{44} \right) (l_1^2 l_2^2 + l_2^2 l_3^2 + l_3^2 l_1^2), \quad (4.2)$$

где l_i – направляющие косинусы вектора силы. Чем больше значение модуля Юнга, тем большие напряжения возникают в кристалле при одной и той же величине деформации. Компоненты коэффициента упругой податливости алмаза s_{11} , s_{12} и s_{44} равны соответственно $9,53 - 0,99$ и $17,4$ ГПа⁻¹ (Современная кристаллография, 1981). Алмаз обладает аномально низким по сравнению с другими минералами показателем упругой податливости. Рассчитанный по формуле (4.2), по направлениям осей $\langle 100 \rangle$ модуль Юнга алмаза принимает наибольшее значение 1049 ГПа, по нормали к граням октаэдра $\langle 111 \rangle$ наименьшее – 787 , а направление $\langle 110 \rangle$ характеризуется промежуточным значением 839 ГПа.

Однако в механической деградации поверхности алмаза главную роль играют не упругие, а пластические (реологические) свойства кристаллической решетки. Поэтому кроме тензора упругой дисторсии u , симметричная часть которого представляет собой описанный выше тензор упругой деформации ϵ , а антисимметричная часть – тензор поворота ω , следует также учитывать тензор пластической дисторсии u^0 , в котором симметричная часть называется тензором пластической деформации ϵ^p , а антисимметричная часть может быть отнесена к тому же тензору поворота ω . Согласно макроскопической динамической теории упругости (Инденбом, Орлов, 1962), в которой важное значение имеют движущиеся дислокации, сумму соответствующих компонентов тензоров упругой деформации и пластической дисторсии можно представить в виде тензора производной вектора полного смещения решетки:

$$\epsilon_{ij} + u_{ij}^0 = \nabla_i u_j. \quad (4.3)$$

Вторая производная вектора смещения по времени связана с дивергенцией тензора напряжений:

$$\rho \ddot{u}_j = \sum_i \nabla_i \sigma_{ij}, \quad (4.4)$$

где ρ – плотность кристалла, ∇_i – компонент оператора Гамильтона. Уравнение (4.4) по существу представляет собой второй, и главный, закон механики Ньютона, определяющий динамику любого механического процесса, включая пластические течения кристалла. Хорошо известно, что дислокации, определяющие вектор смещения решетки, могут перемещаться по системам скольжения со скоростью, приближающейся к скорости звука. Таким образом, между тензором пластической дисторсии и тензором напряжений в кристалле нет непосредственной линейной зависимости типа закона Гука (4.1).

Согласно теории Я.И. Френкеля, для простой кубической решетки критическое скалывающее напряжение составляет примерно $1/(2\pi)$ от модуля сдвига кристалла в данном направлении, а для гранецентрированной решетки алмаза – $1/30$ модуля сдвига (Инденбом, Орлов, 1962). Согласно этим оценкам, предельная величина упругих деформаций обычно не превышает нескольких процентов для большинства кубических кристаллов. Большие деформации являются пластическими, а совсем значительные – хрупкими.

Прочность кристалла приближается к теоретической в двух крайних случаях – при его идеальной структуре и структуре, сильно испорченной дефектами. В остальных случаях макроскопическая прочность кристалла ниже теоретической, часто на два-три порядка (Инденбом, Орлов, 1962). Однако измерение механических свойств кристаллов на практике производится по относительно простым методикам. Например, согласно действующему в нашей стране ГОСТ 9206–80, показатель прочности зерен шлифовальных порошков на основе синтетических алмазов определяют по величине статической нагрузки, вызывающей разрушение алмазного зерна, помещенного между двумя параллельными пластинами из твердого сплава К20 или корунда. В процессе измерений показатель прочности пластины разрушаются и их заменяют новыми или поверхности перешлифовывают. Средний показатель прочности кристаллов порошка определяют по результатам последовательного разрушения 50 зерен.

Хорошо известно, что гранецентрированная кубическая структура алмаза обладает четырьмя системами плоскостей спайности $\{111\}$. В каждой системе плоскостей, например параллельной грани (111) , есть шесть направлений скольжения: $[0\bar{1}1]$, $[1\bar{1}0]$, $[10\bar{1}]$, $[01\bar{1}]$, $[\bar{1}10]$, $[\bar{1}01]$ (рис. 4.2). Сочетание выделенной плоско-

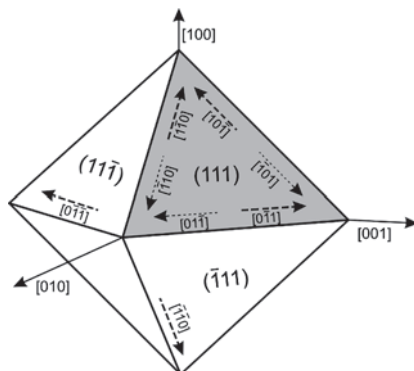


Рис. 4.2. Системы скольжения в кристалле алмаза. Полу жирными стрелками на грани (111) показаны главные системы скольжения для обсуждаемой фундаментальной области

сти спайности и направления скольжения определяет так называемую систему скольжения, например $[0\bar{1}1]$, (111) . При осевом сжатии кристалла в выделенной плоскости могут активизироваться только три системы скольжения. Остальные три реализуются при растяжении. Всего в кристалле алмаза можно выделить 24 системы скольжения, или 12 систем без учета направления сдвига.

Известно также, что, согласно теории деформации кристаллов, произвольная пластическая деформация кубического кристалла (алмаза) осуществляется последовательно максимально по пяти системам скольжения, что следует из свойств симметричного тензора пластических деформаций структуры кристалла (Современная кристаллография, 1981). В общем случае при локальной нагрузке пластическая деформация кристалла происходит поочередно по системам скольжения до такого состояния, пока напряжения в кристалле не будут ниже критического напряжения сдвига. В ходе этого процесса в теле кристалла и в первую очередь в приповерхностных слоях кристалла возникают системы линейных дефектов (краевых дислокаций) и создаются условия для развития трещин и откалывания части кристалла.

Безусловно, решающее значение для деформации поверхности или откалывания небольших частиц (осколков) от кристалла имеет начальная система скольжения, движение по которой нейтрализует основную часть механического напряжения в кристалле. Именно по первой системе плоскостей скольжения происходит наибольший сдвиг решетки, генерируется наибольшее количество краевых дислокаций, деформируется поверхность кристалла и, как следствие, трансформируется световой рефлекс в гониометре. С первой системой скольжения наиболее вероятно связана и первая трещина, определяющая направление скола и форму осколка.

Начальную систему скольжения, по которой прежде всего будут развиваться пластические деформации в результате приложенной нагрузки, позволяет вычислить закон критического скалывающего напряжения (Шмид, Боас, 1938). Касательная составляющая напряжения по выделенному направлению системы скольжения кристалла рассчитывается по формуле

$$\tau = \sigma \cos \chi \cos \lambda, \quad (4.5)$$

где χ – угол между вектором приложенной силы и нормалью к плоскости скольжения $\vec{n}$ (одна из сеток октаэдра алмаза $\{111\}$), λ – угол между тем же вектором силы и направлением скольжения $\vec{\beta}$ (одно из направлений $\langle 110 \rangle$ структуры алмаза, лежащее в выбранной плоскости спайности) (рис. 4.3).

Произведение $\cos \chi \cos \lambda$ принято называть фактором Шмида. Согласно закону критического скалывающего напряжения, при достижении такого напряжения в первую оче-

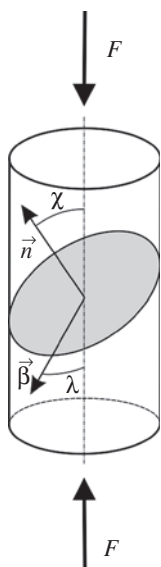


Рис. 4.3. Активизация системы скольжения в кристалле под действием деформирующей нагрузки

редь активизируется та система скольжения, для которой фактор Шмида принимает наибольшее значение. Такое значение фактора определяет первую, главнейшую, систему скольжения, по которой при растяжении или сжатии кристалла осуществляется релаксация основной доли энергии напряжений. В результате первого скольжения меняются компоненты тензора пластической дисторсии и структура кристалла испытывает поворот. Соответственно меняется фактор Шмида и может активизироваться другая система скольжения уже в новой ориентации структуры кристалла, для которой фактор Шмида оказывается наибольшим. Затем все повторяется снова, пока напряжение в кристалле не будет ниже критического значения, составляющего $1/30$ от модуля сдвига.

Рассмотрим отдельные случаи механического воздействия на кристалл алмаза уральского типа.

4.3. КВАЗИСТАТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ КРИСТАЛЛА

4.3.1. Механизм течения кристалла при квазистатическом сжатии

Под воздействием постоянного осевого надкритического сжимающего напряжения в кристалле развиваются процессы размножения и движения дислокаций. В каждой плоскости скольжения, например (111), с учетом ориентации элементарной поверхности додекаэдроида алмаза из шести направлений могут реализоваться только три (см. рис. 4.2). На рис. 4.4 приведены построенные нами изолинии распределений модуля фактора Шмида по трем наиболее вероятным системам скольжения в гномонической проекции (Ракин, 2012б). Напомним, что элементарный участок поверхности алмаза – выбранная нами фундаментальная область, ограниченная точками [010], [110] и (111), на которую приходится механическая нагрузка, находится в пределах телесного угла $\pi/12$. Согласно диффузионной квазиравновесной теории растворения алмаза (см. главу 3), наиболее распространенная фор-

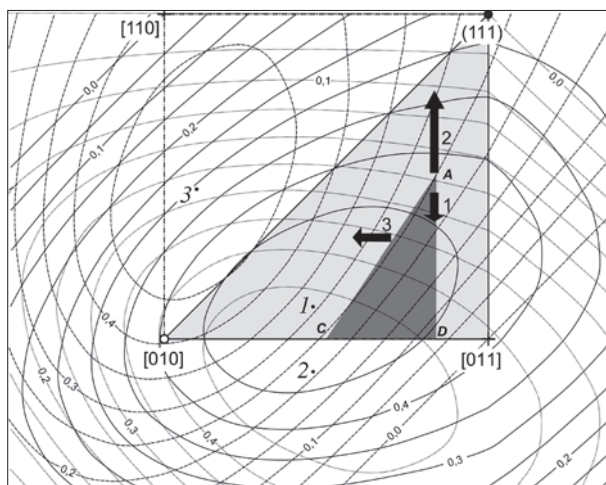


Рис. 4.4. Распределение положительных значений фактора Шмида (условие сжатия решетки) для 3 из 12 наиболее вероятных систем скольжения алмаза.

Точки: 1 – [110], (111) (сплошные линии), 2 – [110], (111) (пунктирные линии), 3 – [011], (111) (штриховые линии). Максимумы соответствуют значению 0,5. Стрелками показаны соответствующие направления искажения рефлекса ACD

ма округлого кристалла алмаза уральского типа описывается треугольником ACD эллипсоида растворения (темное треугольное поле на рис. 4.4). Вершины треугольника соответствуют принятым И.И. Шафрановским (1948) обозначениям.

Пусть точка A соответствует плоской сетке (365), C – (021), D – (065). Квазистатическое давление, приложенное по оси, проходящей через центр кристалла, и пронизывающее элементарную поверхность в некоторой ее точке, приводит к тому, что из трех систем скольжения с наибольшей вероятностью активизируется первая система скольжения – $[\bar{1}\bar{1}0]$, $(\bar{1}11)$. Фактор Шмида в точке C (направление приложения силы – $[021]$) гномонической проекции по указанной системе скольжения принимает наибольшее значение 0,49, в точке D (направление $[065]$) – 0,44, в точке A (направление $[365]$) – 0,42. Направление движения верхних слоев кристалла относительно нижних по плоскости $(\bar{1}11)$ схематически указано короткой стрелкой 1. В результате такого послойного скольжения световой треугольник рефлекса от поверхности додекаэдра алмаза сжимается – катет AD уменьшается и точка A перемещается по направлению к точке D . Важно заметить, что система скольжения 1 для фундаментальной области $[010]$, $[011]$, (111) является системой скольжения 2 для симметричной области, расположенной в соседнем телесном угле $[010]$, $[011]$, $(\bar{1}11)$, зеркальный треугольный рефлекс от которой BCD стыкуется с треугольником ACD по линии CD на кристаллографической проекции (см., например, рис. 3.4). В результате деформации кристалла по системе 1 (см. рис. 4.4) кривизна грани ACD уменьшается незначительно, но кривизна соседней элементарной поверхности BCD (на рис. 4.4 не показана) увеличивается существенно в направлении к точке $(\bar{1}11)$. Если давление приложить к соседнему участку, поверхность которого отражается в виде треугольника BCD , то активизируется система скольжения 2, и в результате аналогичного, симметричного, сдвига рефлекс ACD деформируется в направлении длинной стрелки 2 (длина катета AD значительно возрастет).

Из трех систем наименее вероятно, что активизируется сдвиг по системе скольжения 3 – в плоскости $(11\bar{1})$ по вектору $[0\bar{1}\bar{1}]$ (см. рис. 4.4). Фактор Шмида для направлений силы, проходящих через точки A , C , D в системе скольжения 3, принимает значения 0,25, 0,23 и 0,06. Теоретическое направление деформации светового рефлекса обозначено стрелкой 3. Таким образом, эта система скольжения практически не должна активизироваться при квазистатической нагрузке.

Неравномерность изменения кривизны элементарных поверхностей в результате скольжения обусловлена не только геометрией поверхностей алмаза и ориентацией относительно системы координат, но и площадью сечения кристалла по данной плоскости скольжения. Вероятность сдвиговой деформации и длина вектора сдвига связаны в первую очередь с площадью сечения кристалла по выделенной плоскости сдвига.

Важно отметить, что радиальное приложение силы не более чем идеализированная модель реальной ситуации. Естественно было бы ожидать, что вектор силы, действующий на элементарную поверхность додекаэдра алмаза ACD , имеет значительную тангенциальную составляющую.

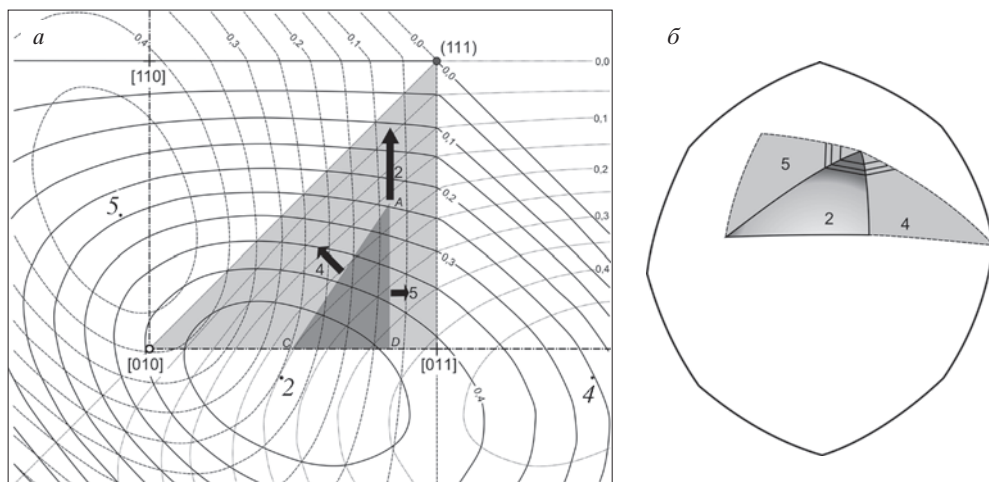


Рис. 4.5. Распределения фактора Шмида для случая сжатия кристалла по трем системам скольжения в плоскости (111) (а) и результат действия трех систем скольжения на поверхность алмаза (б).

2 – $[1\bar{1}0]$ (сплошные изолинии), 4 – $[10\bar{1}]$ (пунктирные изолинии), 5 – $[0\bar{1}1]$ (штриховые линии). Пояснения см. в тексте

На примере задачи о нецентральной столкновении шаров легко выполнить расчет плотности вероятности направления вектора силы в выделенной точке поверхности алмаза при произвольной ориентации кристалла. Установлено, что плотность вероятности обнаружения угла наклона φ силы, деформирующей кристалл, относительно вектора, проведенного из точки контакта в центр кристалла, определяется законом

$$\rho = \sin 2\varphi, \quad (4.6)$$

где угол φ меняется в пределах от 0 до $\pi/2$. Вероятность центрального ($\varphi = 0$) и касательного ($\varphi = \pi/2$) действия силы, согласно (4.6), равна нулю. Максимальная вероятность наблюдается у вектора силы, наклоненного под углом 45° к направлению радиуса-вектора. Усреднив угол наклона φ по всем возможным углам, получим, что при произвольном внешнем квазистатическом воздействии тел на кристалл алмаза уральского типа радиальная составляющая силы в среднем вдвое меньше модуля исходной силы. Такая же величина определяет тангенциальную составляющую силы, непосредственно производящую сдвиг структуры кристалла.

Однако в результате действия тангенциальной компоненты силы, приложенной к элементарной грани алмаза, могут активизироваться и другие системы скольжения. Например, на рис. 4.5, а показаны три системы скольжения в плоскости (111), развивающиеся при сжатии. На данном и предыдущем рисунках использован единый порядок нумерации систем по убыванию вероятности их активизации при нормальном осевом сжатии. Стрелками показаны направления искажения светового рефлекса. С учетом геометрии поверхности алмаза уральского типа при одной длине вектора пластической деформации наибольшее искривление поверхности теоретически долж-

но наблюдаться при сдвиге в плоскости (111) по направлению $[10\bar{1}]$ (система 4 на рис. 4.5, *a*), меньшее искривление поверхности возникает при движении по вектору $[1\bar{1}0]$ (система 2) и совсем небольшое по $[0\bar{1}1]$ (система 5). Однако вероятность активизации системы 2 гораздо выше, чем системы 4 или 5. Стоит обратить внимание, что система скольжения 2 для обсуждаемого участка поверхности является одновременно системой скольжения 5 для соседней симметричной грани додекаэдроида, заключенной в телесном угле $[010]$, $[110]$, $[111]$, а система 4 служит системой 2 для участка заключенного в телесном секторе $[111]$, $[011]$, $[001]$. Поэтому точка *A* рефлекса при многократных пластических деформациях структуры перемещается не в точку (565) (строго по направлению вектора 2 на рис. 4.4), а к точке (111). Это следствие из теории деформаций алмаза имеет важное практическое значение. Многочисленные наблюдаемые факты свидетельствуют о том, что на кристаллах-додекаэдроидах, демонстрирующих полосы пластической деформации и таким образом подтверждающих механические деформации структуры, треугольный рефлекс часто искажен именно так, что точка *A* сдвинута в направлении к точке (111) (рис. 4.6).

Точки *C* и *D* рефлекса обычно неподвижны, поскольку для их перемещения необходимо сдвинуть решетку по площади, близкой к площади центрального сечения зерна, что маловероятно. При квазистатическом сжатии сдвиговые деформации затрагивают большую толщину кристалла по сечению плоскости скольжения, поэтому на противоположной стороне образуются выдвинутые за пределы поверхности, нависающие участки, которые неизбежно скалываются. Так возникают деформационная шероховатость и штриховка округлой поверхности алмаза (рис. 4.6, *a*).

Во всех случаях, кроме системы 1 (см. рис. 4.4), световой рефлекс от элементарной поверхности должен расширяться. При этом следует учесть, что сдвиг по системе 2 компенсирует небольшие искажения, обусловленные скольжением по направлению 1 для элементарной грани *ACD*. Интересно отметить, что наибольшее воздействие окажут векторы силы, ориентированные по направлениям $\langle 194 \rangle$ в кристаллографической системе координат. На гномонической проекции эти направления совпадают с точками 0,5 для всех возможных распределений фактора Шмида (см. рис. 4.4, 4.5), и в этом случае 50% напряжения сжатия при центральном действии силы трансформируется в напряжение сдвига.

Как было замечено, наибольшие сдвиги структуры кристалла происходят по тем плоскостям скольжения, которые имеют наименьшие площади сечений. Поэтому вблизи выходов осей третьего порядка эти пластические течения должны быть максимальны, что и наблюдается на кристалле (см. рис. 4.6, *a*). К этому выводу приводит также и распределение вектора силы (4.6).

Направим, например, вектор силы параллельно любому из 48 направлений $\langle 194 \rangle$ структуры, но выберем наиболее вероятный прицельный параметр согласно закону (4.6) распределения. В этом случае обнаружим, что наибольшая вероятность механического воздействия приходится на область одной из элементарных поверхностей алмаза вблизи выхода тройной оси (см. рис. 4.5, *b*). При этом направление вектора точно соответствует наибо-

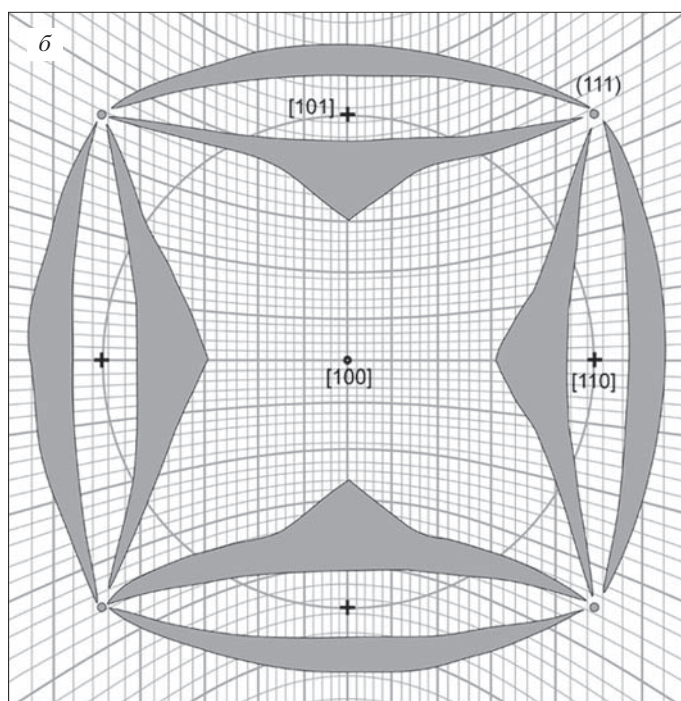
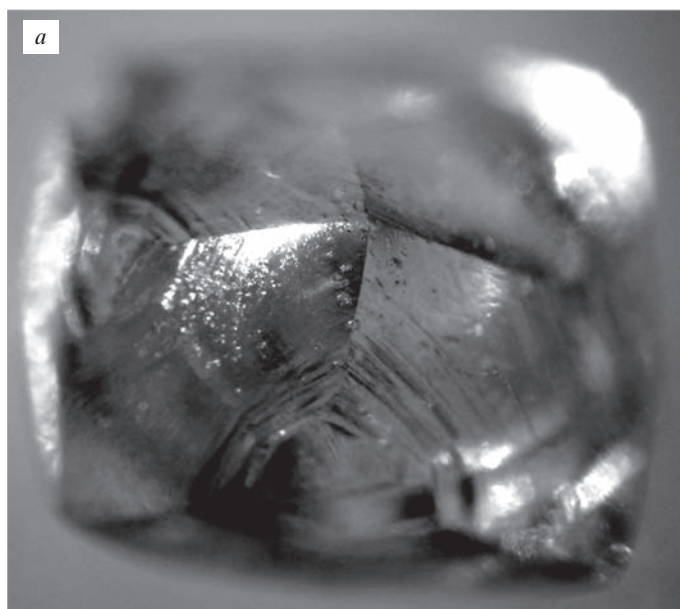


Рис. 4.6. Общий вид (а) и гномограмма (б) кристалла № 17893.1-5 россыпи участка Булкур (Якутия)

лее рациональному направлению для сдвига решетки, а площадь сечения алмаза по плоскости скольжения принимает наименьшие значения. Для выбранного участка элементарной поверхности радиальная составляющая силы активизирует систему скольжения 2, а тангенциальная приводит к сдвиговым деформациям по той же системе скольжения. Для соседних элементарных областей этот вектор силы активизирует системы 4 и 5 (см. рис. 4.5, б). Градиентной заливкой на основной элементарной поверхности алмаза показан участок, где произойдет наиболее вероятный и наиболее значительный сдвиг структуры. Точка приложения силы находится в пределах области градиентной заливки. Выделенный участок занимает довольно значительную площадь проекции кристалла (см. рис. 4.5, б), поэтому вероятность такого события велика. Три полосы показано направление возникающей в этом случае штриховки на трех соседних элементарных участках поверхности алмаза. Можно убедиться, что теоретическая картина сдвиговых деформаций в точности соответствует наблюдениям (см. рис. 4.6). Выбрав другое направление вектора силы, можно убедиться, что на кристалле алмаза уральского типа всегда найдется участок поверхности вблизи выхода одной из тройных осей, где легко может быть осуществлен сдвиг структуры как за счет тангенциальной составляющей нужной ориентации, так и радиальной, действующей в одном направлении, а вероятность этого события довольно велика. Как можно судить по рис. 4.5, б, 4.6, а, она составляет примерно 0,02–0,04.

Крупные плоскости скольжения – полосы пластических деформаций (ППД), развивающиеся по большим сечениям кристалла под действием значительных сил, часто хорошо видны невооруженным глазом или при небольшом увеличении (рис. 4.7). На гномонической проекции данного деформированного кристалла (см. рис. 4.7, б) отмечаются расширение размеров треугольного рефлекса и перераспределение освещенности на края светового поля. Однако в данном случае изменение формы и освещенности рефлекса на экране гониометра обусловлено не только деформациями сдвига, но более значительно хаотическим полирующим износом деформированного рельефа поверхности.

При многоактных переменных и случайно направленных осевых квазистатических деформациях поверхность алмаза уральского типа приобретает *форму пластического течения структуры алмаза (ПТ)* с закономерно трансформированным треугольным световым рефлексом (см. рис. 4.6), который часто встречается на россыпных алмазах Бразилии, Урала и Якутии. Форму такого искаженного светового рефлекса в параболическом гониометре удобно называть кратко – *рефлексом ПТ*. При осевом сжимающем напряжении в кристалле в первую очередь активизируются системы скольжения 1 и 2. При этом точка А треугольного рефлекса ACD устремляется к ближайшей точке октаэдра. Для выделенной фундаментальной области $[010]$, $[011]$, (111) световой рефлекс ACD более всего искажает система скольжения 2, которая активизируется со стороны соседней области, расположенной в октанте гномонической проекции $[010]$, $[011]$, $(\bar{1}11)$. При небольшом по масштабу действии осевого сжатия другие системы скольжения практически не реализуются и форма рефлекса становится легко узнавае-

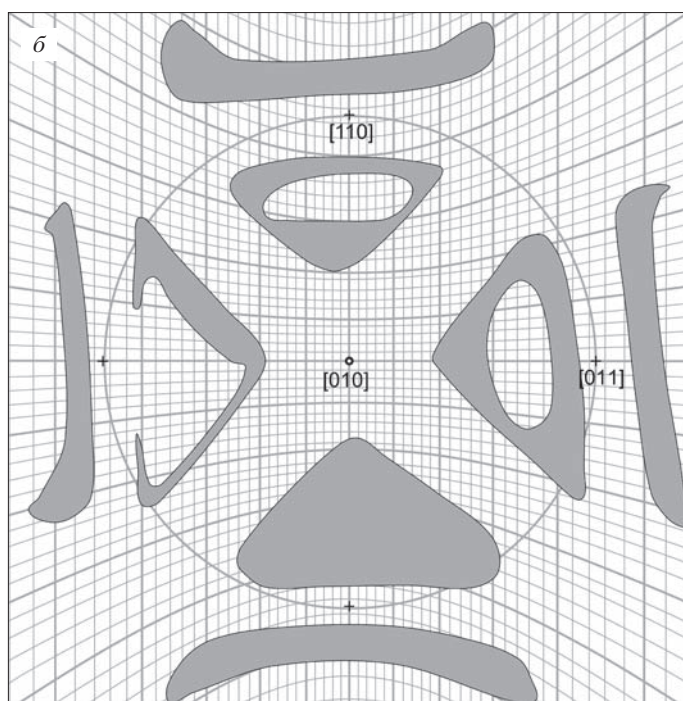
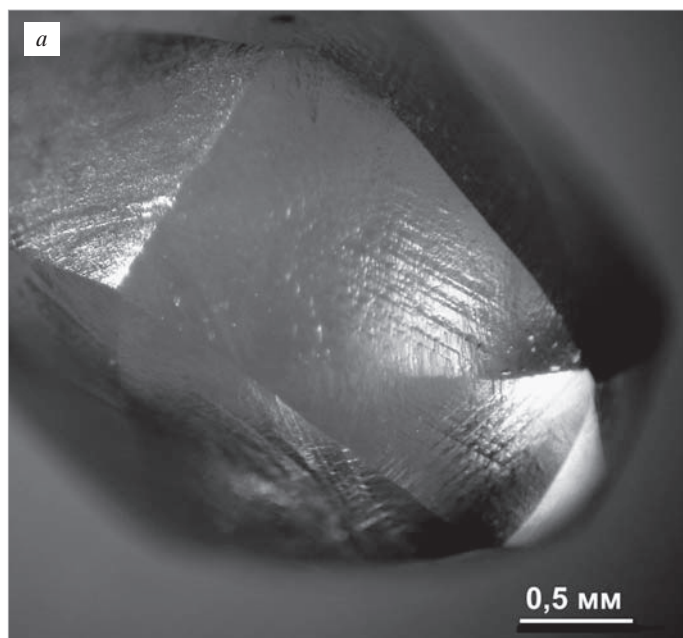


Рис. 4.7. Общий вид (а) и гномограмма (б) кристалла № 17893.1-14 россыпи участка Булкур с разными системами полос пластической деформации

мой (см. рис. 4.6). Такая ситуация развивается с формой округлого кристалла алмаза в случае, если его прокатывать в плотной среде между двумя жесткими медленно скользящими друг относительно друга и сжимающими поверхностями.

4.3.2. Формы рефлекса кристалла алмаза при квазистатической нагрузке

Изображенные на рис. 3.20 и 4.6 искажения треугольного рефлекса додекаэдроида представляют собой образцовый случай деформации структуры алмаза при последовательном, но разнонаправленном квазистатическом сжатии. Однако не всегда первоначальный треугольник эллипсоида растворения угадывается в световом поле пластически деформированного и подвергнутого комбинированному травлению кристалла-додекаэдроида (рис. 4.8), а при последовательном воздействии факторов истирания и травления рефлекс ПТ может быть полностью завуалирован. Трансформация светового рефлекса с образованием сходящегося луча из области эллипсоида в точку октаэдра (рис. 4.9, *а*) происходит не только при воздействии квазистатической механической нагрузки на округлый кристалл. Иногда результаты травления образуют сходный рефлекс (см. главу 5). Но если на таком кристалле одновременно обнаруживаются полосы пластической деформации или концентрические кольца, похожие на проявления ростовой зональности вокруг выхода осей третьего порядка, то вытянутые к точке октаэдра рефлексы-лучи можно уверенно интерпретировать как рефлексы ПТ. Согласно описанной физической модели истирания, формирование рефлекса пластического течения структуры алмаза происходит за счет одной преимущественной системы скольжения, развивающейся под действием осевой нагрузки. При этом на кристаллах с разной исходной формой растворения и разным обликом рефлексы могут немного различаться. Иногда коническая поверхность травления может быть ошибочно принята за поверхность истирания при квазистатической нагрузке. Отличие конуса травления заключается в том, что на гномонической проекции изометричного по облику кристалла он дает узкий, криволинейный рефлекс, простирающийся между точками смежных граней октаэдра, максимально к ним приближающийся и слабобасширяющийся в центре (см. рис. 2.6, *а*; 2.7, *а*; главу 5). При этом параметры конуса травления могут широко варьироваться. Пластически деформированная поверхность алмаза характеризуется строгой треугольноподобной формой центральной части рефлекса и узким лучом, не всегда достигающим до точки октаэдра. Иногда, когда форма кристалла далека от изометричности, рефлекс с одной стороны обрывается каплевидным закруглением.

Если кристалл алмаза уральского типа с гладкими поверхностями растворения подвергается только квазистатической нагрузке, без последней полирующей механической обработки или травления, то световые лучи рефлекса ПТ не касаются точек $\{111\}$ на гномограмме. При пластической деформации по системе скольжения 1 выдвинутые края плоскостей скольжения скалываются и на них всегда образуются ребра. Тонкий шлифующий процесс обработки алмаза, завершающийся в большинстве случаев эволюции формы крис-

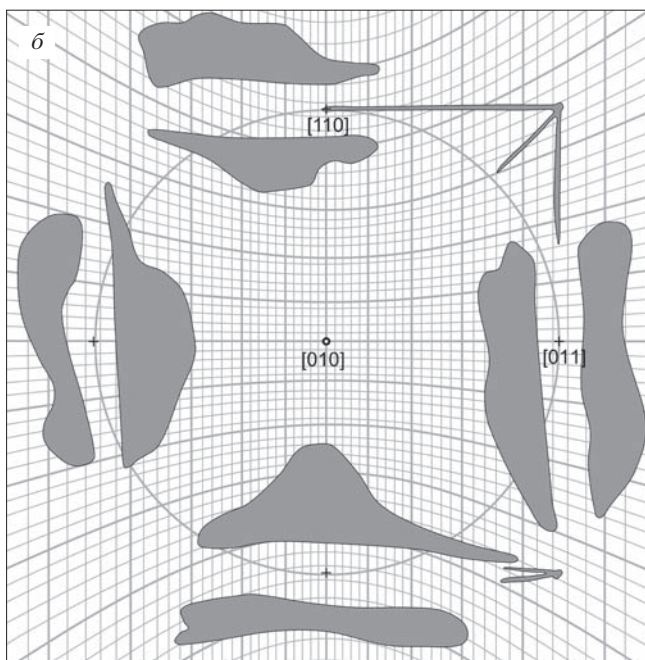
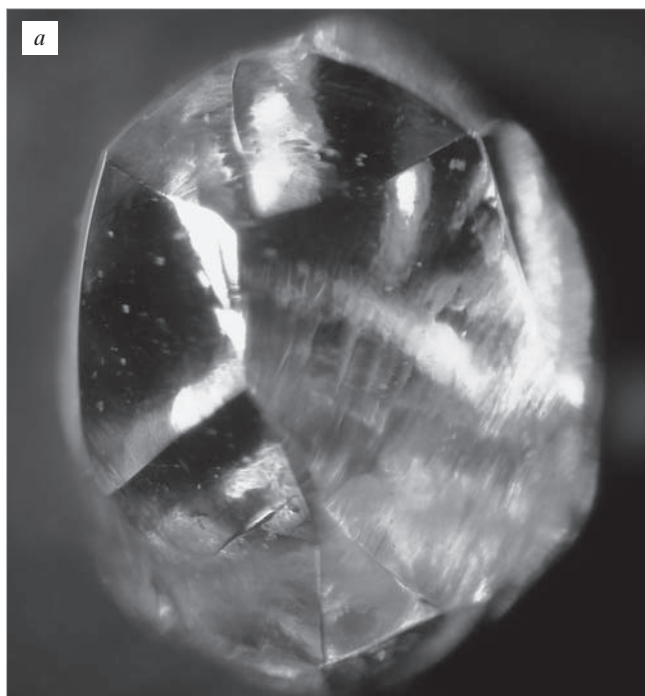


Рис. 4.8. Смешанный режим истирания кристалла Ton-01 из первой бразильской коллекции:
a – общий вид; *б* – гномограмма

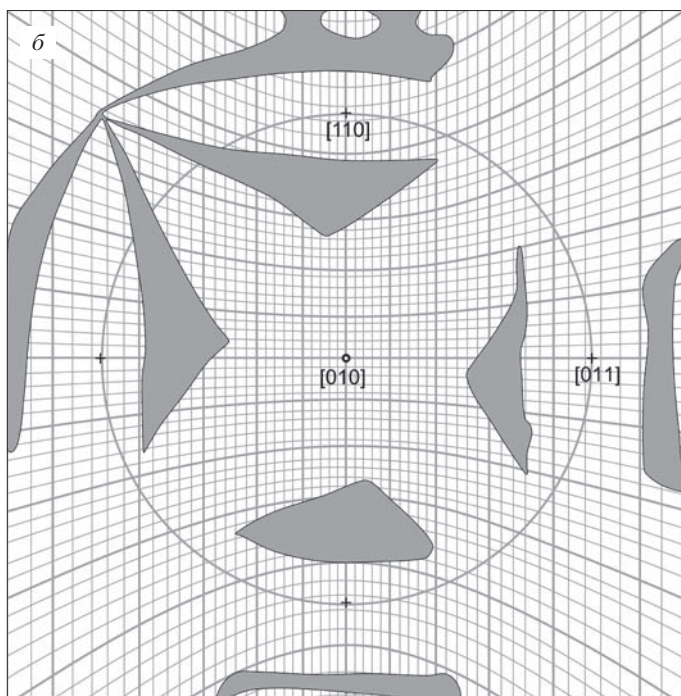
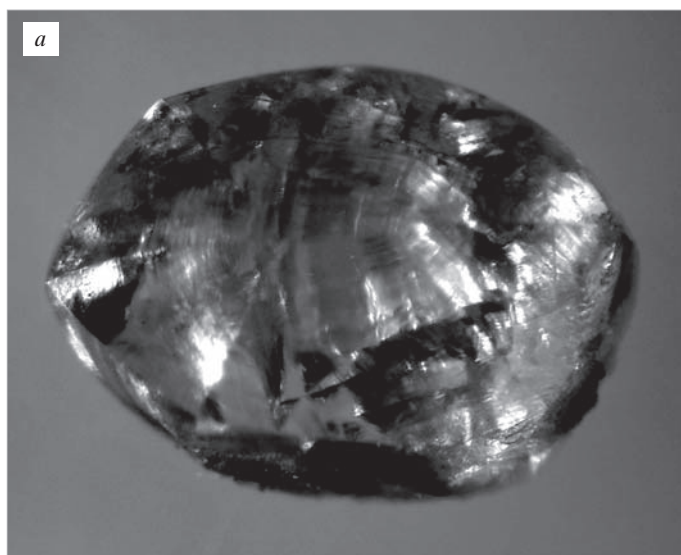


Рис. 4.9. Общий вид (*a*) и гномограмма (*б*) кристалла № 17957-1 (участок Булкур, Якутия)

талла, способен их сгладить до размера длины световой волны, когда вся поверхность выглядит оптически гладкой. В этих условиях рефлекс приобретает более однородную форму и может простираться непосредственно до точки октаэдра (рис. 4.9, б). Травление же, как правило, создает дополнительные рефлексы вблизи точки октаэдра (см. главу 4), за пределами большого круга гномонической проекции, и тем обнаруживает себя.

4.4. ХАОТИЧЕСКИЙ УДАРНЫЙ ИЗНОС КРИСТАЛЛА

Второй крайний случай механической трансформации поверхности алмаза уральского типа связан с быстро протекающими событиями – отдельными ударами по алмазу со стороны соседних зерен минералов, также возможны пластические деформации, но главное воздействие на форму поверхности кристалла оказывают откалывание осколков кристалла и механическая полировка.

4.4.1. Условия хаотического ударного износа поверхности кристалла

Попытаемся оценить энергию удара по кристаллу алмаза, инициирующего в нем пластические деформации, и вероятность такого события. Согласно теоретическим оценкам, для гранецентрированных кристаллов критическое скалывающее напряжение равно $1/30$ модуля сдвига (Инденбом, Орлов, 1962). Модуль сдвига алмаза составляет $0,54$ от модуля Юнга. Поэтому критическая относительная упругая деформация структуры алмаза, после которой начинается пластическое течение, не превышает $1,8\%$. Пусть пластические деформации в изометричном кристалле алмаза массой 1 кар, имеющем диаметр около 4 мм, начинаются с величины 2% . При этом накопленную в упруго деформированной структуре алмаза энергию можно оценить по величине ее деформации:

$$W = \frac{ES(\Delta l)^2}{2l}, \quad (4.7)$$

где E – модуль Юнга алмаза (10^{12} Па), S – площадь контакта зерен, l – диаметр алмаза, Δl – абсолютная деформация, ES/l – коэффициент жесткости зерна. Приняв площадь контакта S равной 1 мм² (сотая часть от площади поверхности зерна) и подставляя известные величины, получим предельную упругую энергию порядка 1 Дж, которую может накопить деформированный алмаз при «точечном» контакте. Плотность энергии в кристалле составит около 16 Дж/см³. Та же энергия накапливается в кристалле любой другой массы при относительной деформации 2% и площади «точечного» контакта, составляющей сотую часть поверхности зерна. Такая максимальная плотность энергии сообщается зерну алмаза массой 1 кар при ударе молота массой 2 кг со скоростью 1 м/с и деформациях, распределенных однородно по сечению зерна. Таким образом, при плотности энергии деформации в кристалле, превышающей указанную величину, начинается пластическое течение.

Рассмотрим действие морских волн на зерна минералов в морской россыпи. Пусть зерна минералов гравийной размерности (2–10 мм в поперечнике) находятся под воздействием прибойной морской волны со средней скоростью движения 1 м/с. Будем считать, что при упругих столкновениях зерен кратковременно вся кинетическая энергия при относительных движениях превращается в энергию деформаций минералов, распределяемую поровну между ударником и мишенью, а относительные скорости движения, как известно из классической механики, в среднем в $\sqrt{2}$ раз выше абсолютных значений. Таким образом, в объеме зерна может накапливаться энергия деформаций, равная примерно 1,5 мДж/см³.

Штормовое воздействие при скорости волн 10 м/с на два порядка увеличивает плотность энергии деформации в зернах (до 0,15 Дж/см³), но и этой энергии явно недостаточно для осуществления пластических деформаций, затрагивающих весь объем кристалла алмаза. Вероятность такого события при единичном ударе при средних скоростях волн в 10 м/с ничтожно мала и составляет меньше 10^{-46} . Эта цифра получена методом численного моделирования равновесного распределения Л. Больцмана по энергиям:

$$P = \int_{w_0}^{\infty} A \exp(-\varepsilon/w_1) d\varepsilon, \quad (4.8)$$

где A – нормирующий коэффициент распределения, $w_1 = 0,15$ Дж/см³ – средняя плотность энергии деформации кристаллического вещества при штормовых скоростях движения частиц, $w_0 = 16$ Дж/см³ – критическая плотность энергии в алмазе, полученная выше.

Существенно иная ситуация развивается в приповерхностной области алмаза, где в силу инерции механических процессов при быстром и точечном воздействии на кристалл локальная плотность энергии деформации может более чем на порядок превышать среднюю плотность по зерну. Расчет по распределению (4.8) показывает, что при ударах по кристаллу алмаза массой 1 кар соседним зерном такой же массы вероятность события, при котором плотность энергии в приповерхностной области превысит критическое значение 16 Дж/см³, составляет уже $5 \cdot 10^{-5}$ в расчете на один удар. Для расчетов приняты следующие предположения:

- плотность энергии $w_1 = 0,15$ Дж/см³ соответствует штормовым условиям;
- при ударе в приповерхностной области кристалла локальная плотность энергии деформации превышает на порядок среднюю плотность энергии по кристаллу;
- кинетическая энергия зерна-ударника переходит в энергию деформаций приповерхностной области алмаза-мишени.

Следует признать, что последнее предположение недостаточно очевидно. Если допустить, что только одно из ста минеральных зерен-ударников при надкритическом ударе по алмазу сохраняется целым, то вероятность раскалывания алмаза понижается до $5 \cdot 10^{-7}$, что обеспечивает достаточно хорошую сохранность совершенному кристаллу, но при этом гарантирует его хаотический полирующий износ в морской прибойной зоне. Важно отметить, что при низкоэнергетической полирующей обработке алмаза ста-

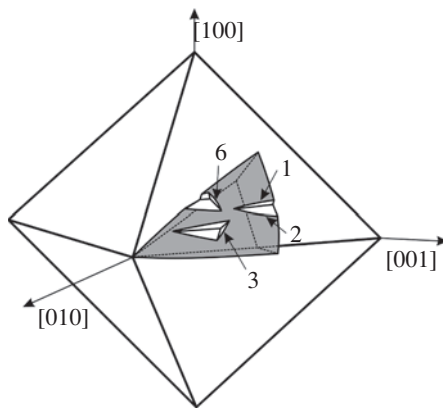
Рис. 4.10. Скалывание элементарной поверхности додекаэдра (выделено темным цветом) алмаза уральского типа. Номера соответствуют системам скольжения структуры алмаза

новится существенной анизотропия механических свойств структуры алмаза (рис. 4.10).

В качестве кандидатов на минеральные зерна-ударники в первую очередь выделим кварц, обладающий наиболее высокими прочностными свойствами по сравнению с другими породообразующими минералами. Его прочность на сжатие составляет 10^9 Па, модуль Юнга – $7,8 \cdot 10^{10}$ Па, что всего на один порядок меньше, чем для алмаза. При этом, что крайне важно, кварц не обладает спайностью в отличие от алмаза, поэтому «статистически» он оказывается не менее прочным, чем алмаз.

С учетом того, что макроскопическая прочность несовершенных кристаллов ниже теоретической на два-три порядка (Инденбом, Орлов, 1962), вероятность износа несовершенного алмаза увеличивается весьма существенно. Можно убедиться, что при критической плотности энергии деформации $w_0 = 0,16$ Дж/см³ вероятность начала образования трещин в приповерхностных областях несовершенного кристалла при штормовых плотностях энергии и условии сохранности каждого сотого зерна-ударника достигает $4 \cdot 10^{-3}$ в расчете на один удар. Естественно, откалывание осколков из приповерхностной зоны несовершенного алмаза должно происходить во много раз чаще, чем раскалывание всего кристалла. Таким образом, приходим к заключению, что дефектные кристаллы алмаза имеют немного шансов сохраниться в галечнике гравийного размера прибойной морской зоны уже после первого шторма, в котором отдельное зерно испытает около 1000 ударов.

Однако в случае речных потоков кинетические энергии взаимодействующих зерен не столь значительны и износ несовершенных кристаллов может происходить гораздо дольше, обеспечивая дальний перенос алмазов разного совершенства при полном сохранении поверхности.



4.4.2. Трансформация поверхности алмаза при хаотической механической обработке

При случайных кратковременных, но интенсивных ударах по поверхности алмаза, когда кристалл подвергается бомбардировке зернами соседних минералов, напряжения в локальных приповерхностных областях кристалла могут достигать значительных величин, а краевые дислокации распределяются по плоскостям сдвига весьма неравномерно. Высокая концентрация дислокаций в приповерхностных областях стимулирует развитие трещин и откалывание осколков. При хаотическом процессе вектор силы удара будет

иметь не только нормальную, но и значительную тангенциальную компоненту. Тем не менее наибольшее воздействие на структуру алмаза уральского типа оказывает проекция вектора силы на нормаль к поверхности, поэтому откалывание кусочка алмаза из участка фундаментальной области всегда происходит при активизации трех наиболее вероятных систем скольжения 1, 2 и 3 (см. рис. 4.4), реализующихся последовательно (см. рис. 4.10). Иногда вместо системы 3 реализуется система скольжения ($[0\bar{1}\bar{1}]$, $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$) (присвоим ей номер 6, хотя она не показана рис. 4.5), которая также имеет высокую вероятность активизации. Форма осколка с поверхности фундаментальной области додекаэдроида алмаза будет напоминать лодочку. Октаэдр на рис. 4.10 показан для получения более ясного представления о направлениях осей кристалла и форме осколков. Плоские грани осколка алмаза, отколовшегося с поверхности додекаэдроида фундаментальной области кристалла, соответствуют плоским сеткам $(\bar{1}\bar{1}1)$, (111) и $(11\bar{1})$ (или $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$). Естественно, что неоднородности дефектной структуры алмаза могут способствовать активизации любой из 12 систем скольжения, но наиболее вероятно, что скол с элементарной поверхности додекаэдроида алмаза осуществляется в результате развития трещин по четырем описанным системам скольжения. Важно, что на выделенном участке поверхности (см. рис. 4.10) система скольжения 3 предпочтительнее системы 6, а на соседнем участке в секторе ($[010]$, $[011]$, $[\bar{1}11]$) наоборот.

Три криволинейных ребра, соединяющих новообразованные плоские грани $\{111\}$ с поверхностью эллипсоида, подвергаются дальнейшему полирующему износу. В результате треугольный рефлекс на гномонической проекции должен закономерно деформироваться. Сглаживание двух наиболее протяженных ребер – 1 и 2 (см. рис. 4.10) – приводит к расширению рефлекса в направлении к точкам октаэдра. Причем ребро 1 закругляется так, что точка B светового рефлекса ABC на кристаллографической проекции перемещается к положению грани $(\bar{1}\bar{1}1)$, а износ ребра 2 аналогично приводит к дрейфу точки A к положению грани (111) . Наблюдения показывают, что в результате тонкой полирующей механической обработки световой рефлекс распространяется непрерывно до граней $(\bar{1}\bar{1}1)$ и (111) , что свидетельствует о полном исчезновении ребер 1 и 2 отдельных сколов под округлыми поверхностями. Поверхность хаотического износа приобретает вид покрытой оспинами кожи (см. рис. 4.1, б).

В отличие от первых двух ребер короткие ребра 3 или 6 (см. рис. 4.10) сохраняются лучше (см. рис. 4.4, б), поскольку их износ неизбежно приводит к растягиванию рефлекса ABC в верхней половине треугольника в направлении к точке октаэдра $(11\bar{1})$ (ребро 3), расположенной во второй четверти гномонической проекции, а в нижней половине – к $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ (ребро 6) в третьей четверти. При этом появляется стремление перекрыть области соседних симметричных граней додекаэдроида. Однако, как показывают инструментальные исследования, смыкания смежных рефлексов додекаэдроида никогда не происходит и единая гладкая поверхность на алмазе никогда не формируется. Согласно наблюдениям, при полирующем износе алмаза уральского типа параллельно линиям тетрагонтриоктаэдров всегда сохраняются острые ребра, разделяющие соседние симметричные рефлексы по-

Рис. 4.11. Гномограмма
бразильского кристалла
MGD11/35.
Темным цветом выделены
более яркие части рефлекса

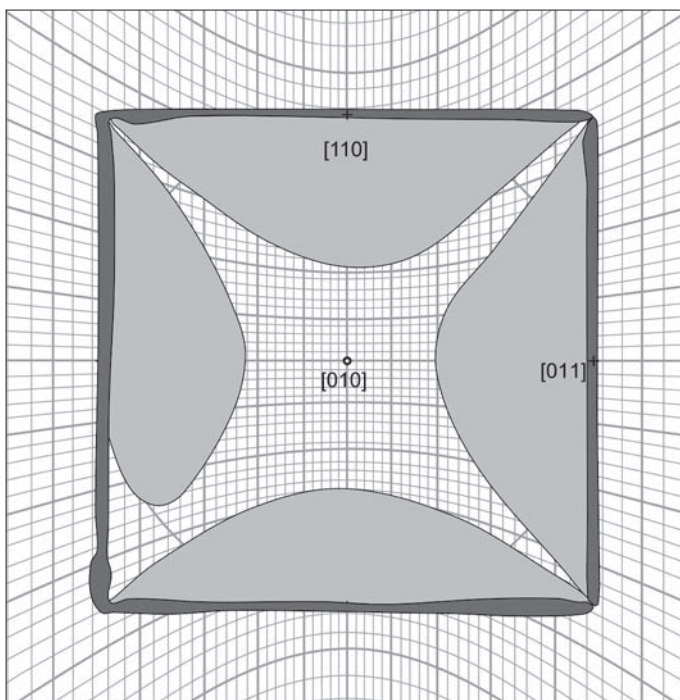
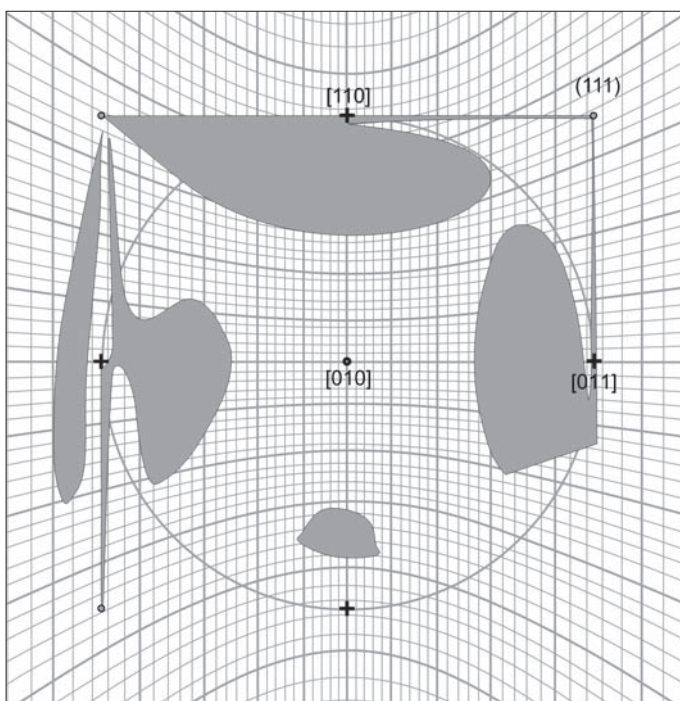


Рис. 4.12. Гномограмма
бразильского кристалла
MGD11/13



верхностей додекаэдроида, видоизмененных хаотической полировкой, и алмаз сохраняет облик додекаэдроида – 12-гранника с округлыми псевдоромбическими гранями.

В конечном счете спайные отщепы и приполированные ребра на поверхности алмаза начинают выглядеть как штриховка, иногда сноповидная. На рис. 3.26 кристалл комбинированной формы с желобами по ребрам октаэдра демонстрирует на додекаэдрических поверхностях удлиненные акцессории, образованные процессом регенерации алмаза. На участках положительного рельефа акцессории частично трансформированы ударным износом, о чем свидетельствуют плоскости спайности, выходящие на поверхность алмаза (рис. 3.26, б). Длительный полирующий износ поверхности приводит к тому, что световой рефлекс в итоге приобретает форму криволинейного сегмента, ограниченного двумя смежными точками октаэдра, линией тригонтриоктаэдров и линией конической поверхности с фиксированными угловыми параметрами (см. рис. 3.26, в; 4.11, 4.12). Поверхность такого алмаза можно считать *предельной формой рефлекса ударного износа (УИ)*. Треугольные световые рефлексy, обладающие свойством пониженной освещенности в центре (см. рис. 4.7, б), а также криволинейные сегменты предельной формы ударного износа (см. рис. 4.11) можно назвать *рефлексом УИ*.

4.4.3. Изменения светового рефлекса при ударном износе кристалла

Начальная стадия механической обработки додекаэдроида вполне закономерно характеризуется расширением поля треугольного рефлекса *ABC* додекаэдроида и перераспределением интенсивности рефлекса из центра треугольника на его края (см. рис. 4.7, б). Это связано с формированием спайных отщепов, уничтожающих в первую очередь фрагменты поверхностей эллипсоида, с нормальными, попадающими в центральную часть светового треугольника *ABC* на кристаллографической проекции.

Важно отметить, что хаотический интенсивный ударный износ поверхности, приводящий к формированию макроскопических трещин на алмазе (рис. 4.13), и менее интенсивный полирующий износ (см. рис. 4.11, 4.12) представляют собой две стороны одного процесса. Пользуясь изложенными выше представлениями о равновесном распределении по энергиям в ансамбле частиц, можно прийти к выводу, что на один интенсивный удар, вызывающий отщеп значительного фрагмента кристалла, приходится множество менее энергичных, но также надкритических ударов, скалывающих и шлифующих небольшие выступающие фрагменты поверхности. Поэтому интенсивный ударный износ кристалла не может быть отделен от механической полировки.

Предельный рефлекс на гномограмме имеет хорошо узнаваемый вид криволинейного сегмента, ограниченного с одной стороны линией цилиндрической поверхности по формам тригонтриоктаэдров, а с другой – явно выраженной линией кругового конуса (см. рис. 4.11, 4.12). Световой сегмент покрывает рефлексy сразу четырех простых форм растворения: октаэдра, эллиптического цилиндра, эллиптического конуса и эллипсоида. Для изо-

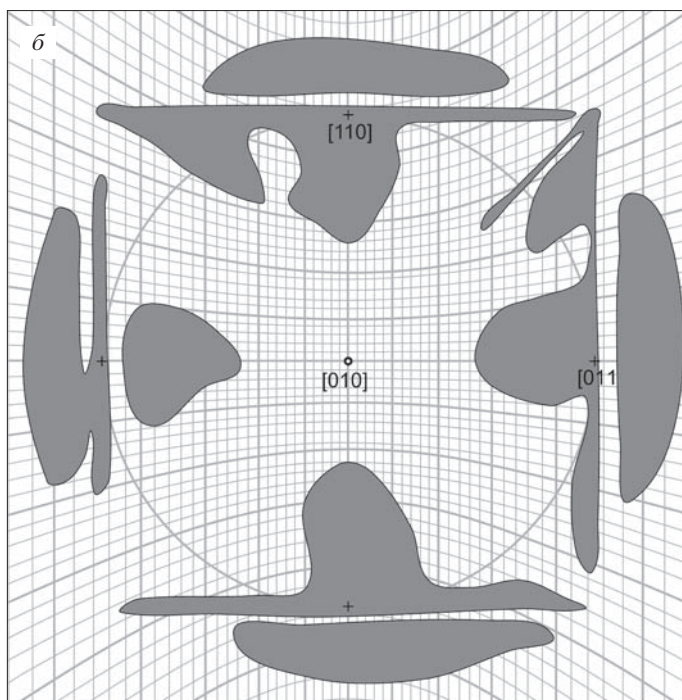
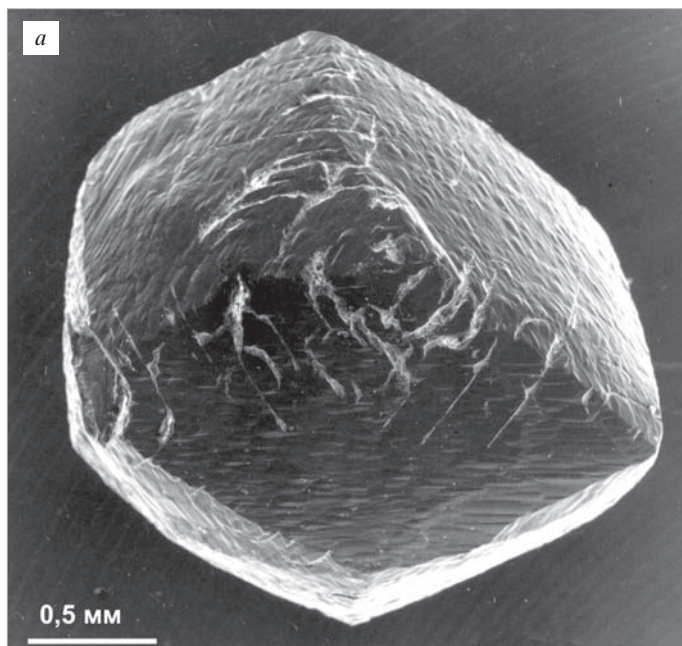


Рис. 4.13. Общий вид (а) и гномограмма (б) кристалла № 8 из бразильской коллекции (бассейн р. Макаубас, штат Минас Жерайс, Бразилия)

метричных кристаллов разного облика – додекаэдроида, октаэдроида или алмаза комбинированной формы – форма такого предельного рефлекса УИ стабильна и практически не меняется, но освещенность рефлекса на экране гониометра демонстрирует значительные вариации. Иногда максимум яркости тяготеет к линии конуса, ограничивающей площадь сегмента со стороны четверной оси (рис. 4.14, *а*), иногда — к вершинам сегмента, точкам октаэдра (см. рис. 3.26, *в*). Различные варианты освещенности, наблюдаемые на рефлексах УИ, показывают, что интересующая нас поверхность алмаза не может быть описана уравнениями второго порядка, тем не менее строгие и закономерные очертания светового рефлекса на гномонической проекции не оставляют сомнений в том, что поверхность хаотического износа определяется структурой алмаза. Вариации интенсивности не всегда обусловлены только одним фактором. На рис. 4.14, *б* приведен эскиз гномограммы бразильского кристалла Топ-11, который был подвержен травлению после формирования поверхности предельного хаотического износа. В этом случае поверхность кристалла приобретает характерный бугорчатый вид, иногда форму булыжной мостовой, в которой просматривается симметрия кристалла (рис. 4.14, *а*). Начало процесса хаотического механического износа запечатлено на кристалле рис. 4.7. Диффузионное травление после предельного случая хаотического износа способно «распределить» освещенность рефлекса по периферии сегмента УИ на экране гониометра. Внутренняя часть рефлекса при этом становится слабо освещенной и диффузно рассеивает свет. Такая последовательность воздействия факторов ударного износа и травления характерна для многих кристаллов из бразильской коллекции.

Важным свойством поверхности второго порядка является почти равномерное или монотонное изменение освещенности рефлекса на экране гониометра. Анализируя геометрию хода лучей в параболическом гониометре, можно прийти к выводу, что интенсивность света в пределах треугольного рефлекса от поверхности эллипсоида растворения должна плавно увеличивается от стороны *AB* к точке *C* треугольника. Однако иногда на алмазах наблюдается обратная закономерность: максимум интенсивности находится на стороне *AB* треугольника (см. рис. 3.4), что можно связать с неизбежным наложением эффектов механического износа или травления на форму кристаллов уральского типа. Во всяком случае, если рефлекс от криволинейной грани алмаза на гномограмме сохраняет строгую треугольную форму, а его освещенность достаточно равномерна, то поверхность алмаза с высокой точностью можно описать поверхностью второго порядка – трехосным эллипсоидом. Напомним также, что треугольный рефлекс правильного додекаэдроида получается в результате раскрыя поверхности характеристического эллипсоида фундаментальным трехгранным телесным углом, образованным плоскостями зеркальной симметрии структуры алмаза (см. рис. 3.2). При этом параметры эллипсоида могут меняться в ограниченных интервалах.

Симметрия предельного рефлекса УИ (см. рис. 4.11) указывает на то, что ориентация обсуждаемой поверхности износа, особенно на границах независимой области, вырезаемой трехгранным телесным углом, неслучайна.

Элементарная поверхность алмаза, проецирующая рефлекс УИ, как было указано выше, определяется системами пластического скольжения структуры алмаза и анизотропией структуры кристалла при хаотической полирующей механической обработке. Фрагмент элементарной поверхности износа в пределах фундаментальной области структуры размножается операциями симметрии структуры алмаза на 48-гранник, на котором четыре симметричных фрагмента, окружающих ось второго порядка, сливаются в одну гладкую выпуклую грань ромбододекаэдроид неравномерной кривизны. В результате получается 12-гранник – ромбододекаэдроид без обычного для алмаза уральского типа гранного шва (рис. 4.15). Криволинейные ребра 12-гранника только вблизи выхода оси четвертого порядка сохраняются острыми, но постепенно, при приближении к оси третьего порядка и выходу криволинейной поверхности грани на плоские сетки октаэдра, исчезают, а в центре грани ромбододекаэдроид, на месте выхода двойной оси, наблюдается фрагмент цилиндрической поверхности.

Поверхность эллиптического цилиндра на сегменте УИ (см. рис. 4.11, 4.12, 4.14, в) обычно хорошо видна в виде яркой, чаще всего равномерно освещенной прямой линии, соединяющей яркие точки октаэдра. Эффект яркой линии на экране гониометра, получающейся от области короткого ребра ромбической грани, связан не только с небольшим кинетическим травлением указанных кристаллов, но и с нулевой кривизной поверхности в перпендикулярном к этому ребру направлении. Здесь активно развивается штриховка, образованная в результате сколов поверхности плоскостями октаэдра, поскольку для формирования скола в данной области поверхности достаточно только двух наиболее вероятных систем скольжения. Полировочное истирание штриховки ведет к формированию ясно выраженной поверхности цилиндра. В итоге образуется достаточно широкая по площади поверхность, близкая к эллиптическому цилиндру (см. рис. 4.15), дающая яркий линейный рефлекс.

Линия конуса, соединяющая те же точки октаэдра, обычно очерчена неравномерно, но также весьма четко. Конус в данном случае как уравнение второго порядка – это наиболее простое описание совокупности нормалей к полосе поверхности кристалла, прилегающей к плоскости зеркальной симметрии структуры алмаза, проходящей через ось L_4 . Все три линии границы независимой области на поверхности алмаза лежат в плоскостях симметрии структуры алмаза и являются плоскими. Важную особенность предельного рефлекса УИ составляет тот факт, что конус, ограничивающий площадь криволинейного сегмента, приближается к строго определенной форме. Он близок к круговому конусу, и, согласно расчетам, ось конуса ориентирована под углом около 22° к соседней четверной оси кристалла $[001]$ (близко к направлению $[025]$ в структуре кристалла алмаза), а угол образующей конуса составляет около 49° . Иногда конус демонстрирует эллиптические свойства. Например, на рис. 4.11 огибающая рефлекса предельного хаотического износа в фундаментальной области близка к эллиптическому конусу, у которого полуоси эллипса в сечении плоскостью $z = h$ (см. формулу 3.26) $ah/c > bh/c$ (ось ox направлена параллельно кристаллографической оси $[100]$, oy – по направлению $[05\bar{2}]$, а oz – $[025]$). Встречает-

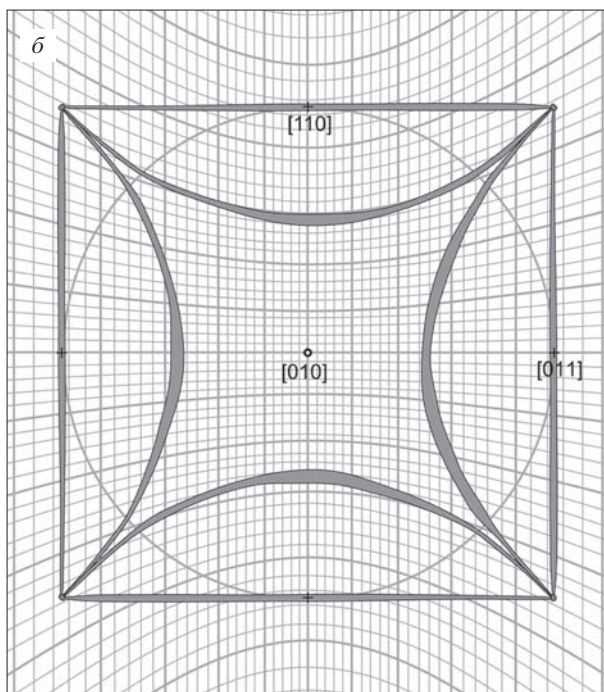
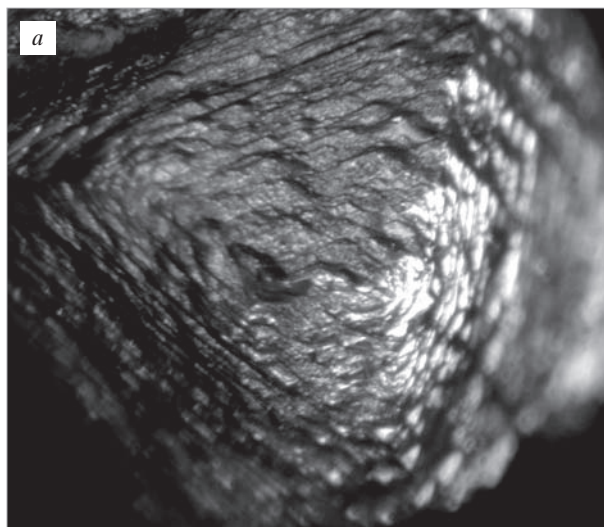
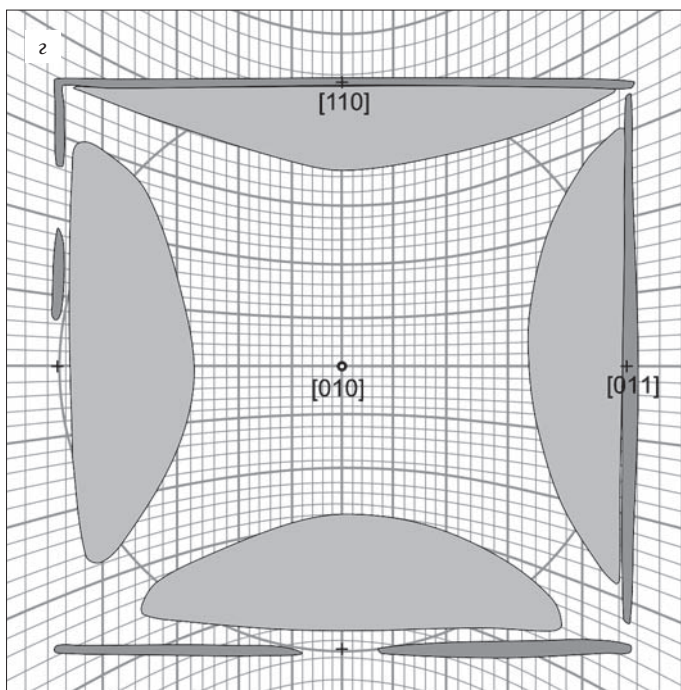
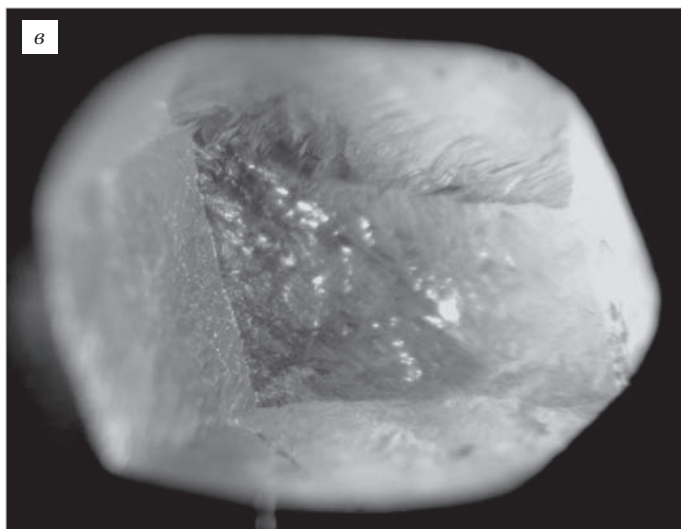


Рис. 4.14. Предельные случаи рефлекса
a и *в* – общий вид, *б* и *з* – гномограммы кристаллов Top-11
 Жерайс,



УИ на бразильских алмазах:
и MGD11/43 соответственно (бассейн р. Макаубас, штат Минас
Бразилия)

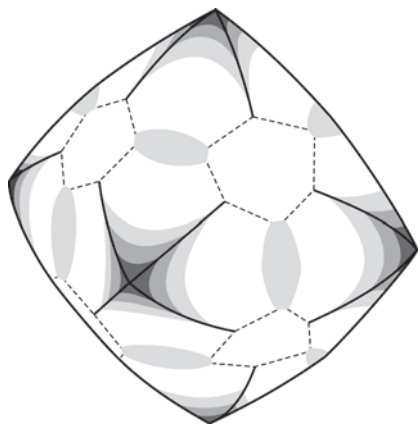


Рис. 4.15. Стационарная поверхность износа кристалла-додекаэдроида.
Пояснения см. в тексте

ся и обратное соотношение полуосей секущего эллипса (см. рис. 4.14, *з*). Но круговой конус с параметрами $a = b = 1,15c$, ориентированный осью симметрии по направлению $[025]$, встречается наиболее часто (см. рис. 4.14, *б*). Приведенные выше угловые параметры конусной поверхности могут рассматриваться в качестве критерия достижения стационарной и предельной формы хаотического износа алмаза.

Данная коническая поверхность обладает рядом важных для кристаллографии алмаза свойств. Поверхности выпуклой ромбической грани алмаза вдоль двух соседних ребер, пересекающихся в четверной вершине под острым углом, принадлежат одному конусу на том же основании симметрии, как в форме растворения (см. рис. 3.2) две смежные независимые фундаментальные области образованы единой поверхностью эллипсоида. Конус содержит плоскую сетку $\{021\}$ в качестве крайней кристаллографической плоскости, слагающей поверхность кристалла на месте соединения двух граней трехгранного фундаментального телесного угла в точке выхода оси четвертого порядка из кристалла. Неслучайно, что каждая плоская сетка октаэдра (111) принадлежит одновременно шести симметрично смежным коническим поверхностям с осями по $\langle 025 \rangle$ и углом образующей 49° .

Хорошо известно, что плоскости октаэдра в алмазе проявляют наибольшую стойкость к механическому воздействию, направленному по нормали к поверхности, но этот вывод не противоречит тому факту, что скалывающие усилия, направленные определенным образом вдоль грани октаэдра, могут эффективно отслаивать тонкие плоские пластинки с кристалла. Плоские сетки $\{021\}$ структуры алмаза не обладают какими-либо особыми аномальными кристаллофизическими свойствами (К-грани по теории ПЦС), но часто присутствуют на поверхностях растворения вблизи вершин четвертого порядка и оказываются статистически столь же «устойчивы» по отношению к случайным механическим ударам по кристаллу, как и грани октаэдра. Это обычно точки *С* треугольного рефлекса на рис. 1.4, 1.5, 1.8, по И.И. Шафрановскому (1948) и А.А. Кухаренко (1955) являющиеся вершинами криволинейного сегмента УИ. Ориентация участков поверхностей алмаза вблизи четверной оси практически не меняется и не зависит от размера кристалла, поэтому вершины четвертого порядка и ребра ромбододекаэдроида обладают максимальным эффектом «самосохранения»: изнашиваются, сохраняя строгую ориентацию в кристаллографическом пространстве, и определяют таким образом, стационарную форму износа (см. рис. 4.15).

Важно отметить, что при развитии процессе полировочного истирания округлого алмаза с выпуклой поверхностью широкая область на гномограмме вокруг четверной оси кристалла остается свободной от любых ре-

флексов (см. рис. 4.11, 4.14). В процессе же растворения и травления кристалла рефлекс эллиптического цилиндра, расположенный по линии тетрагонтриоктаэдров на гномонической проекции, затрагивает область, непосредственно приближенную к оси четвертого порядка (см. рис. 3.12).

Рефлекс УИ не связан с обликом кристалла, но от него может зависеть распределение освещенности на световом поле. Если начальной формой кристалла был идеальный додекаэдрон, то длительная механическая обработка поверхности приведет к трансформации треугольного рефлекса в размытый криволинейный сегмент с относительно равномерным распределением интенсивности света (см. рис. 4.14, г). Наиболее ярко на экране гониометра при этом будут светиться точки октаэдра и линия цилиндра.

Облик идеализированного кристалла-додекаэдрона уральского типа, трансформирующегося в стационарную предельную форму ударного истирания, обобщенно представлен на рис. 4.15. Темным цветом показаны области поверхности, создающие контур предельного рефлекса УИ на гномограмме и наиболее строго ориентированные в кристаллографической системе координат. Они формируются в первую очередь как области стационарного хаотического износа. Наибольшую ориентационную устойчивость демонстрируют участки поверхности алмаза на границах независимой области вблизи четверной оси (отмечены наиболее темным цветом). В затемненных областях вокруг выходов двойных осей симметрии формируется штриховка, параллельная ребрам октаэдра, дающая на гномограмме рефлекс цилиндра. Штриховой линией на рисунке показаны грани октаэдра $\{111\}$, возникающие на выходах осей третьего порядка. Их относительные поверхности в ходе механической деградации увеличиваются до некоторого предела, при котором облик кристалла остается округлым. Смыкание всех условно окрашенных на рис. 4.15 участков с гранью октаэдра приводит к формированию рефлекса УИ, встречающегося наиболее часто у бразильских россыпных алмазов. Сочетание протяженных поверхностей, с одного края близких к эллиптическому цилиндру, а с другой – к конусу, плавно смыкающихся друг с другом на гранях октаэдра и создающих единую гладкую криволинейную грань, не дает возможности описать ее одним уравнением второго порядка. Гладкая форма предельного ударного износа (см. рис. 4.15) является не более чем обобщением. Реальный кристалл алмаза при ударном износе покрывается шероховатой поверхностью (см., например, рис. 4.14, в), на которой обычно не просматриваются обсуждавшиеся выше детали.

Таким образом, додекаэдронный облик алмаза уральского типа при длительном ударном износе сохраняется достаточно хорошо, поэтому при визуально-морфологической оценке без учета полярных морфологических характеристик кристалла легко допустить ошибку и принять шероховатую форму предельного истирания за формы растворения или травления. Важный отличительный признак предельной формы ударного износа – отсутствие гранного шва на поверхности грани ромбододекаэдрона.

В процессе естественной хаотической механической обработки правильного додекаэдрона растворения алмаза стороны светового треугольника на гномонической проекции искривляются, площадь рефлекса

увеличивается, расширяясь наиболее существенно по направлению к точкам октаэдра. Соответственно кривизна грани в этом направлении растет. На кристалле появляется легко скалывающаяся плоскость октаэдра, также немного увеличивающаяся со временем, что создает ложный эффект регенерации. Поверхности эллиптического цилиндра, появляющиеся на месте гранного шва, также создают ложный эффект вторичного растворения.

При механическом износе кристалла комбинированной формы (см. рис. 3.26) рефлекс УИ развивается, наоборот, от точек октаэдра и линии эллиптического цилиндра по направлению к точке (021) на кристаллографической проекции. Ударный износ мелкошагренового и волосовидного рельефа поверхности алмаза приводит к другому виду рефлекса УИ почти предельного типа (см. рис. 4.14, в). Мелкие акцессории регенерации после хаотической механической обработки также могут демонстрировать яркие рефлексы цилиндра, как если бы алмаз после этапа регенерации испытал вторичное растворение. Но присутствие диффузных, равномерно освещенных сегментов предельного УИ указывает на механическое происхождение данных цилиндрических поверхностей.

Форма рефлекса на рис. 4.12 свидетельствует о кристалле-додекаэдронде с неизометричным уплощенным обликом, который подвергся хаотическому износу первичной поверхности растворения. Образование непрерывной гладкой поверхности, объединяющей точки октаэдра, линии эллиптического цилиндра и поля эллипсоида, указывает на достаточно развитый процесс механического износа поверхности. Можно допустить также небольшое влияние эффектов диффузионного травления. Симметричной картины рефлексов от неизометричного кристалла ожидать не приходится, однако некоторые участки поверхности демонстрируют сохраняющиеся элементы симметрии.

4.5. ОСОБЕННОСТИ ТРАНСФОРМАЦИИ РЕФЛЕКСОВ АЛМАЗА УРАЛЬСКОГО ТИПА В РЕЗУЛЬТАТЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ИЗНОСА ПОВЕРХНОСТИ

На поверхности 24-гранника додекаэдронда как формы растворения имеются: ребра 1.1, соединяющие смежные грани, примыкающие к одной вершине четвертого порядка; гранный шов 1.2, расположенный на короткой диагонали ромба; вершины двух типов – на выходах четверных и тройных осей. На поверхностях алмаза также часто присутствуют бугорки регенерации, содержащие ребра между гранями октаэдра и куба, а также вершины двух видов – трехгранной, сложенной двумя гранями октаэдра и одной гранью куба, и четырехгранной октаэдрической. Устойчивость к механическому разрушению всех перечисленных элементов поверхности алмаза, очевидно, будет разной в соответствии с прочностными свойствами структуры алмаза. Однако в результате естественной механической обработки кристалла алмаза возникают некоторые общие закономерности, проявляющиеся в картине световых рефлексов на экране параболического гониометра.

В развитии светового рефлекса при механическом истирании возможны и другие случаи трансформации кроме описанных выше. Часто световой рефлекс от поверхности додекаэдроида нельзя отнести ни к одному из двух описанных выше случаев – пластического течения и ударного износа. Кроме того, сложная история поверхности кристалла может демонстрировать этапы регенерации, травления и механического износа в различной последовательности.

Рассмотрим особенности механической обработки кристаллов уральского типа и характерные световые рефлексы поверхностей механической деградации.

4.5.1. Смешанные и переходные режимы износа поверхности кристалла

Если механическому воздействию подвергается октаэдрический кристалл алмаза, то свиговые деформации и отщепы в первую очередь приводят к образованию вдоль ребер октаэдра поверхностей эллиптического цилиндра за счет касательной составляющей вектора силы. На гномонической проекции появляется линия тригонтриоктаэдров. Естественно, что ее можно принять за форму растворения, если не учитывать возникающие в этом случае дополнительные морфологические признаки форм растворения (см. главу 3).

Два кристалла, гномограммы которых приведены на рис. 4.16 и 4.17, представляют собой додекаэдроиды с развитым вицинальным рельефом, но сложной историей.

В первом случае (см. рис. 4.16), судя по виду и огранке бугорков на поверхности алмаза MGD10/61, они образованы в результате грубого механического износа, но не регенерации. Затем последовал этап нестационарного диффузионного травления, создавший ярко выраженный гранный шов, и наконец произошла тонкая механическая полировка. Первый этап грубого механического износа кристалла не привел к предельной форме рефлекса УИ, но расширил треугольный рефлекс ABC , погасив освещенность в центре треугольника (как, например, на рис. 5.7, б). Одновременно сторона AB сместилась к линии тригонтриоктаэдров. Этап диффузионного травления уничтожил поверхности, дающие рефлекс в область точки C рефлекса растворения, но сформировал гранный шов, равный $2,5^\circ$. Диффузионный режим травления подчеркивается также отсутствием рефлексов октаэдра. Последний полирующий износ только сгладил получившиеся поверхности и создал предельно симметричный вид гномограммы.

Второй случай отличается тем, что бугорки на поверхности алмаза ZMP-02 наиболее вероятно связаны с процессами регенерации (см. рис. 4.17). Затем кристалл подвергся диффузионному травлению и окончательному тонкому хаотическому износу. В результате травления появились удлиненные гантелеобразные парные рефлексы, разделенные ребром гранного шва $3,5\text{--}4^\circ$. Уширение рефлексов в областях, прилегающих к точкам октаэдра, характерно для сателлитов нестационарного травления. Две небольшие грани октаэдра в исследуемом секторе могут быть образованы вследствие трех причин: регенерации, травления и последнего механического износа.

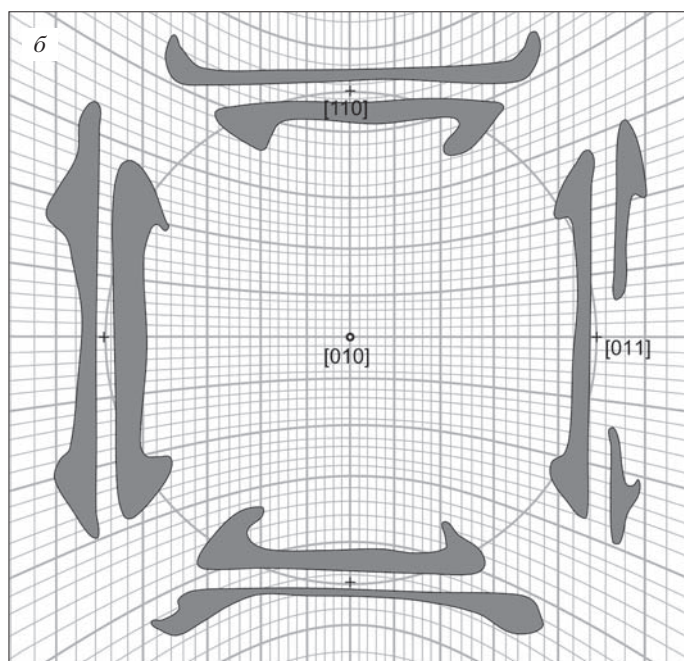
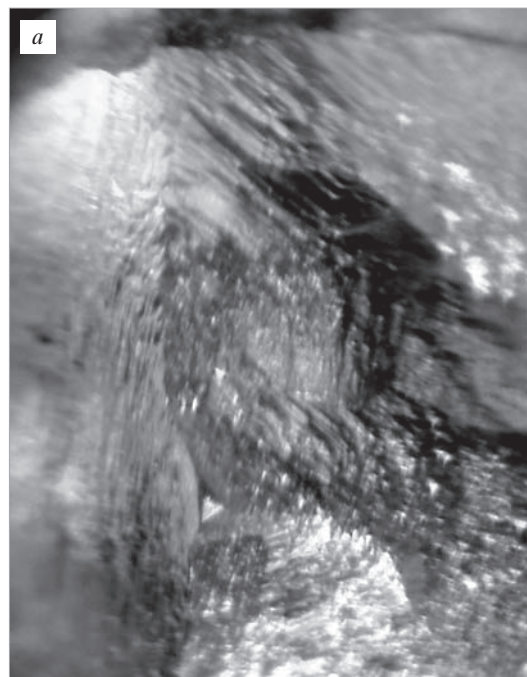


Рис. 4.16. Смешанный режим истирания додекаэдроида MGD10/61 из бразильской коллекции (бассейн р. Макаубас, штат Минас Жерайс) с признаками диффузионного травления:
a – фрагмент поверхности; *б* – гномограмма

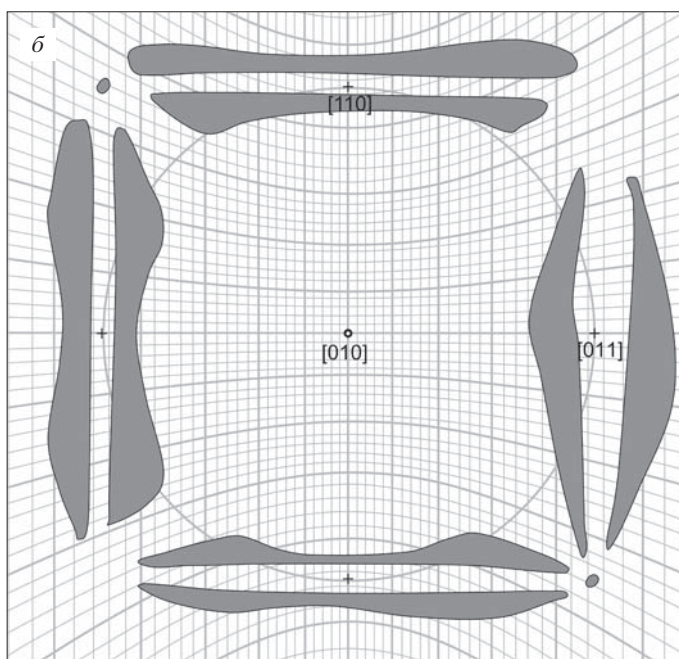
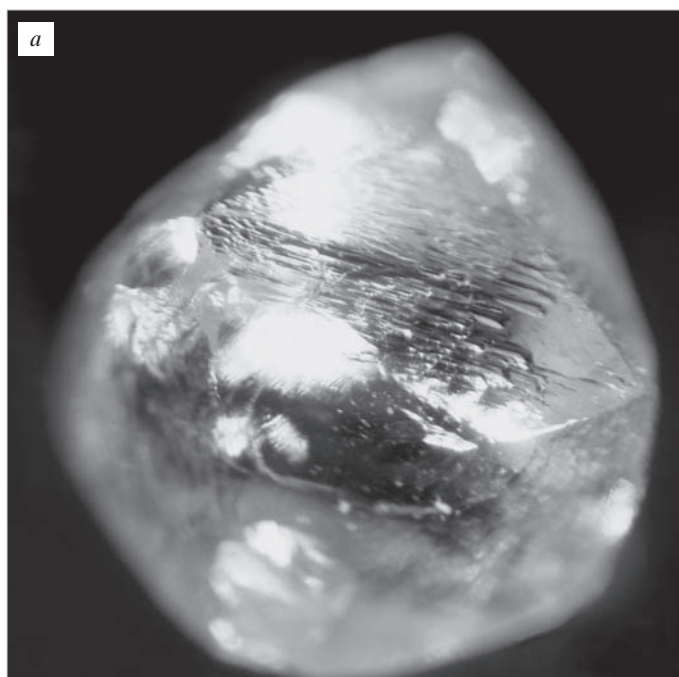


Рис. 4.17. Ударный износ додекаэдра ZMP-02 бразильской коллекции с элементами поверхностей регенерации и травления:
a – общий вид; *б* – гномограмма

В главе 6 описано множество переходных случаев между стадиями пластического течения структуры алмаза (рефлекс ПТ), УИ и разных типов травления в различной очередности. Однако общими для них являются два факта: 1) завершающий этап эволюции формы кристалла – это обычно тонкий полирующий механический износ кристалла; 2) пластическое течение кристалла относится к более ранним стадиям эволюции формы и происходит сразу после или во время этапа растворения кристалла. Но ударный износ и травление могут сменять друг друга в произвольном порядке.

Примером смены этапа пластического течения структуры кристалла алмаза этапом хаотического износа поверхности является вишерский кристалл ii-340 Северного Урала (рис. 4.18) – гладкий додекаэдрон с видимыми полосами пластической деформации. Гномограмма закономерно демонстрирует признаки УИ и ПТ, но штриховка на кристалле, обычная в случае пластических течений структуры, отсутствует. Однако нет основания считать, что естественная тонкая хаотическая механическая обработка кристалла в данном случае полностью уничтожила штриховку на всей поверхности, сохранив при этом ряд ступеней от выходов плоскостей пластических деформаций (рис. 4.18, *a*). Вероятно, пластические течения структуры данного алмаза происходили непосредственно в ходе растворения, а завершающий механический износ сгладил поверхность кристалла, понизив освещенность центральной части и округлив вершины треугольного рефлекса.

Иногда пластическое течение структуры алмаза осложняется эффектами понижения симметрии согласно принципу П. Кюри. Понижение симметрии световых рефлексов механического износа, очевидно, должно наблюдаться в первую очередь у неизометричных кристаллов (удлиненных, уплощенных), кристаллов-сростков и сдвойникованных кристаллов. Диссимметризация может происходить до самых низших групп симметрии (см. рис. 4.12). Понижение симметрии может реализовываться в условиях пластических течений, когда так же, как и для форм растворения, может быть применен принцип П. Кюри (см. главу 3). Например, при стационарном сжатии или растяжении кристалла в одном выделенном направлении, а также при вращении кристалла вокруг оси, близкой к направлению действия сил, исчезают все оси симметрии, кроме одной, параллельной деформирующей силе. Одновременно плоскости симметрии также исчезают, за исключением, возможно, одной, перпендикулярной выделенному вектору. Если же кристалл медленно вращается вокруг оси, перпендикулярной направлению нагрузки, аналогично сохраняются одна ось симметрии, совпадающая с направлением вращения, и плоскость симметрии, параллельная вектору силы.

Хаотический режим ударного износа, наоборот, чаще повышает внешнюю симметрию рефлексов, и даже от неизометричного кристалла может быть получена весьма совершенная картина рефлексов, поскольку рефлекс УИ, как было отмечено выше, не связан с обликом кристалла. Высокосимметричный рефлекс УИ встречается, как правило, даже у неизометричного кристалла.

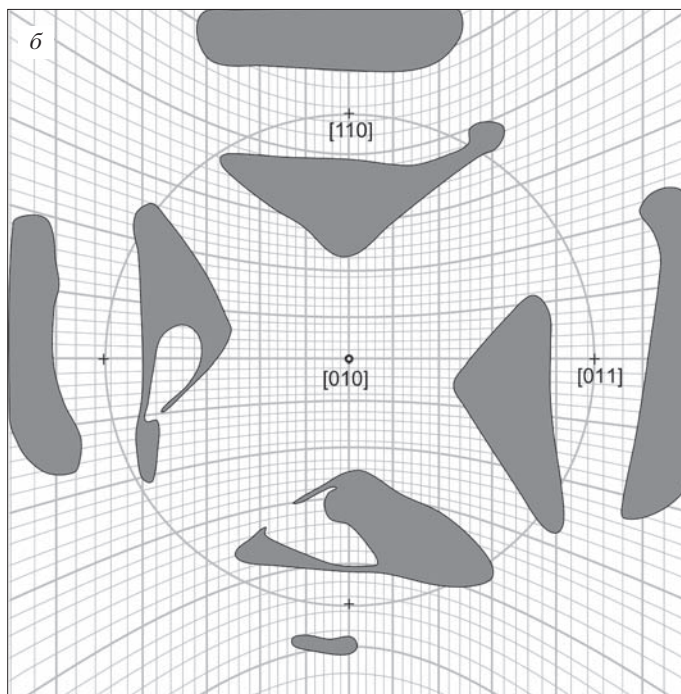
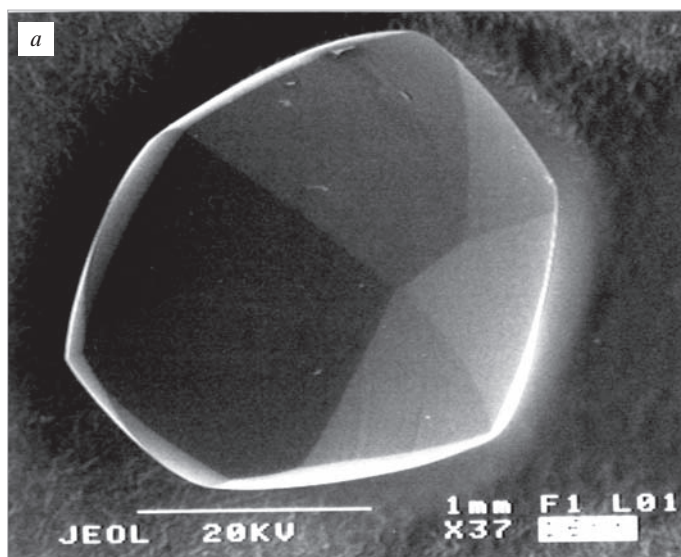


Рис. 4.18. Кристалл ii-340 с месторождений Северного Урала:
a – изображение РЭМ; *б* – гномограмма

4.5.2. Износ кристаллов с блочной структурой. Серповидный рефлекс

Световые рефлексы от кристаллов с блочной структурой (кристаллы V и VII разновидности по Ю.Л. Орлову) всегда сложно организованы. Рассмотрим особый тип рефлекса, часто встречающийся на гномограммах от таких кристаллов. Это обычно множественный рефлекс, он имеет характерный серповидный облик и располагается в запрещенной зоне для форм растворения, чаще вблизи точек октаэдра $\{111\}$ между линиями эллиптического цилиндра (рис. 4.19, а). К этому типу рефлекса можно причислить также полосы, располагающиеся на поле эллипсоида параллельно сторонам треугольника ABC и несущие признаки развития рефлекса УИ.

Кристалл, отражающий такой своеобразный рефлекс, всегда имеет весьма причудливую поверхность (рис. 4.19, б), на которой изометричные или удлинненные бугорки (блоки), сложенные гладкими криволинейными гранями и ребрами, перемежаются с ямками и криволинейными канавками неясного происхождения. Облик кристалла достаточно изометричный, но отнести его к додекаэдриту, кубиту или октаэдриту сложно. Ямки могут быть результатом растворения (травления) или областью сопряжения соседних поверхностей трех или более соседних бугорков или блоков. Сложный рельеф поверхности кристалла закономерно обуславливает комбинированную картину рефлексов. На световой проекции лучей, отраженных от поверхности кристалла, видны следующие рефлексы:

- 1) остаточные треугольные рефлексы эллипсоида растворения;
- 2) фрагменты рефлекса пластического течения;
- 3) понижение освещенности в центре треугольника растворения, что указывает на ударный износ кристалла;
- 4) рефлексы плоских сеток октаэдра, которые могли образоваться в результате регенерации, а также при механических сколах по плоскостям спайности алмаза или травлении;
- 5) линии поверхности эллиптического цилиндра, распадающиеся на серию штрихов с центрами «тяжести» в точках плоских сеток алмаза (155), (133), (122), (344), (788), которые могут свидетельствовать о прошедших регенерационных процессах или процессах кинетического травления;
- 6) линейные полосы, ориентированные параллельно сторонам расширенного треугольника;
- 7) серповидные рефлексы в областях сателлитных рефлексов травления у граней октаэдра;
- 8) криволинейные полосы, идущие по линии конической поверхности, свидетельствующие о форме предельного ударного износа.

Последние три вида световых рефлексов одновременно с расширяющимся треугольным рефлексом эллипсоида, который, вероятно, уже следует обозначать рефлексом типа УИ, свидетельствуют о наиболее значительном процессе механического износа поверхности кристалла.

Кристалл (см. рис. 4.19) был извлечен из вторичной кимберлитовой жилы, секущей сплошной кимберлит первой генерации трубки Интернациональная. Признаки хаотического механического износа как до этапа травления, так и после него получены при его транспортировке по системе жил.

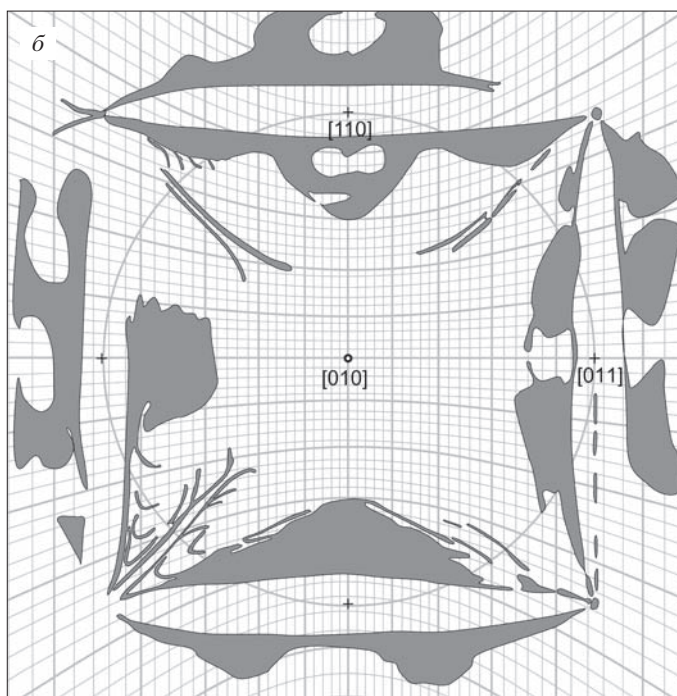
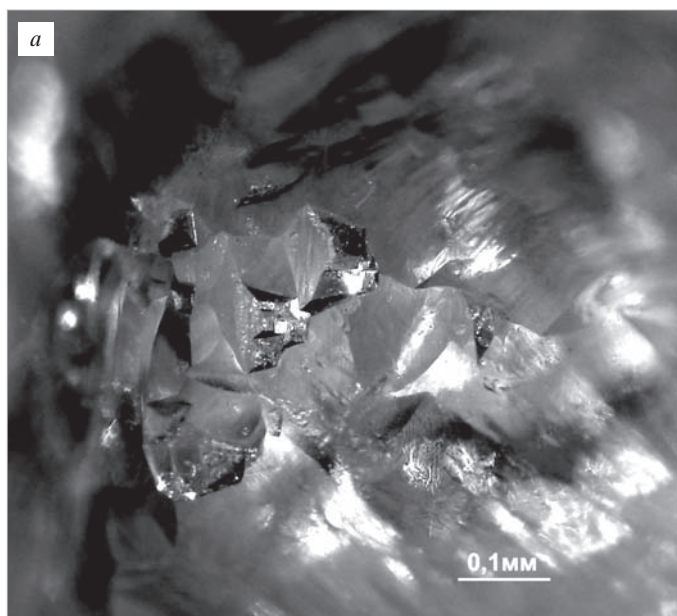


Рис. 4.19. Фрагмент поверхности кристалла вблизи выхода четверной оси (а) и гномоническая проекция рефлексов (б) от кристалла Ж-25 из кимберлитовой жилы трубки Интернациональная

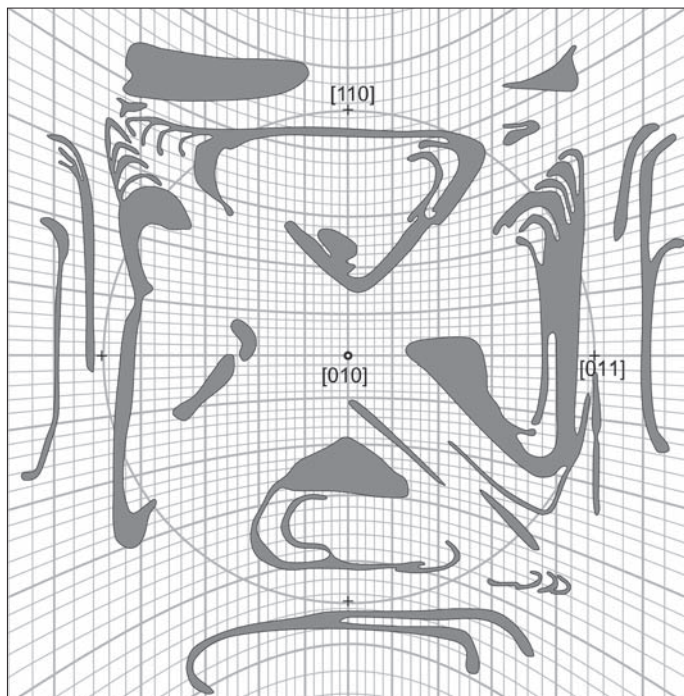


Рис. 4.20. Гномограмма кристалла № 17893.2-3 V разновидности по Ю.Л. Орлову (россыпь участка Булкур, Якутия)

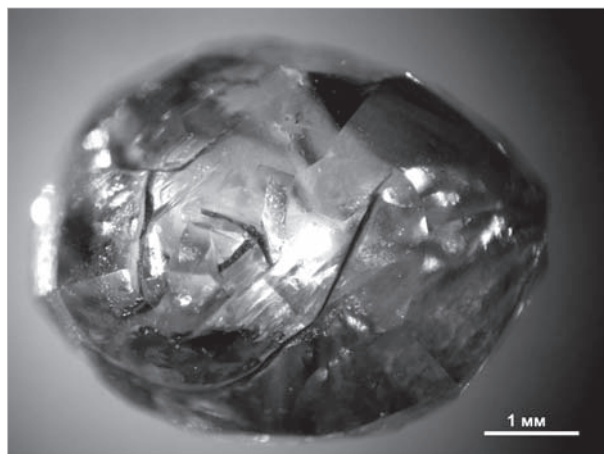
Этап кинетического нестационарного травления произошел между двумя стадиями механического износа.

Линии, параллельные сторонам треугольника, могут быть образованы канавками или царапинами поперек ребер додекаэдроида, совпадающими с полосами пластической деформации алмаза и легко наблюдаемыми визуально (см., например, рис. 4.13, а).

Остановимся на серповидных рефlekсах, располагающихся вблизи точек октаэдра. Темные, коричневые и почти черные кристаллы V разновидности по Ю.Л. Орлову, найденные в россыпях, всегда демонстрируют серповидные рефlekсы на гномограммах. Серповидные рефlekсы (см. рис. 4.19, б; 4.20) образуются в результате смешанного режима механического износа. Они наблюдаются на кристаллах с крупным выступающим рельефом (рис. 4.21) и всегда на кристаллах блочного строения. Каждый монокристаллический блок с малой угловой разориентацией отделен от соседнего блока желобом. Травление всегда помогает выявить блочность кристалла, растворяя межблочные дефектные области. Тем не менее кристалл может сохранить облик округлого поликристаллического зерна. На кристалле блочного строения достаточно просто разглядеть главные элементы симметрии монокристалла алмаза – зеркальные плоскости и оси третьего и четвертого порядка – и установить необходимым образом кристалл в гониометре.

При износе кристалла основные динамические механические нагрузки берут на себя ребра блоков. В зависимости от места расположения блока-субиндивида относительно осей симметрии кристалла износ его лицевой по-

Рис. 4.21. Уплощенный кристалл № 17893.1-10 V разновидности с коричневым нацветом (участок Булкур, Якутия)



верхности происходит по-разному, но в соответствии с общими кристаллофизическими закономерностями (см. рис. 4.4, 4.5). Каждый серповидный рефлекс отражает отдельную поверхность субиндивида, но не выходит за пределы характерной для хаотического механического износа области на гномограмме.

На гномограмме рис. 4.20 виден реликт поверхности растворения – треугольный рефлекс эллипсоида. Однако его размеры существенно больше обычного треугольника *ABC*, что связано с хаотическим механическим износом кристалла (УИ), о чем свидетельствует распределенная по периметру треугольника освещенность рефлекса. Одновременно к вершинам *A* и *B* треугольников примыкают секторы в форме серии последовательных серповидных рефлексов, направленные к ближайшим точкам граней октаэдра, что указывает на пластическое течение структуры кристалла, по крайней мере, в нескольких направлениях, результатом которого может быть блоковая структура кристалла. Если бы данный кристалл не обладал блочным строением, выявленным промежуточным травлением, то на его гномограмме не обнаружился бы гладкий рефлекс пластического течения, как у кристалла на рис. 4.9, *a*. Кроме того, на гномонической проекции присутствуют несколько небольших рефлексов, прямо указывающих на кинетическое травление. Однако фактор травления кристалла в данном случае незначителен по сравнению с механическим износом поверхности.

Смешанный режим механической деградации поверхности (рефлексы ПТ и УИ) отмечается и для кристалла, представленного на рис. 4.19. Только последствия ударного износа поверхности проявились на нем в большей степени. Параллельные световые полосы, идущие вдоль диагонали проекции (см. рис. 4.19, *a*, третья четверть), образовались, вероятно, на положительном рельефе и свидетельствуют о длительном хаотическом износе отдельных блоков на поверхности кристалла алмаза, и следовательно, относятся также к серповидным рефлексам. На это указывают дуги конических поверхностей, которые расходятся со световых полос способом, характерным для предельного рефлекса УИ.

Таким образом, серповидный рефлекс обусловлен механическим износом алмаза с блочным строением, часто выявленным в результате травления кристалла, но его нельзя считать особым типом рефлекса, характеризующим определенный или специфический режим износа поверхности алмаза.

4.5.3. Механический генезис поверхностей эллипсоида II типа

Поверхности, названные нами эллипсоидом II типа, которые наблюдаются на местах выхода осей четвертого порядка, могут формироваться по механизму образования серповидных рефлексов на участках поверхностей вблизи вершин октаэдра (рис. 4.22). Данный кристалл неправильной формы с коричневым оттенком, добытый из россыпи участка Булкур Приленской алмазоносной провинции Якутии, обладает блочным строением. На поверхности наблюдается тонкий шероховатый рельеф, но между субгранями отмечаются острые ребра положительного рельефа, как на кристалле на рис. 4.21. Гномограмма кристалла свидетельствует о его блочном строении (отдельные серповидные рефлексы) и ударном механическом износе кристалла. Хотя рефлекс пластического течения структуры алмаза отсутствует, наличие серповидных рефлексов косвенно указывает на пластические деформации, завуалированные последующими процессами, вероятно, травления и сильного механического износа.

Если вблизи выхода оси четвертого порядка из кристалла размещаются несколько блоков, то серповидные рефлексы, образовавшиеся в результате ударного износа блоков, будут выглядеть как рефлексы «эллипсоида II типа» (см. рис. 4.22). Отсутствие одного из четырех симметричных рефлек-

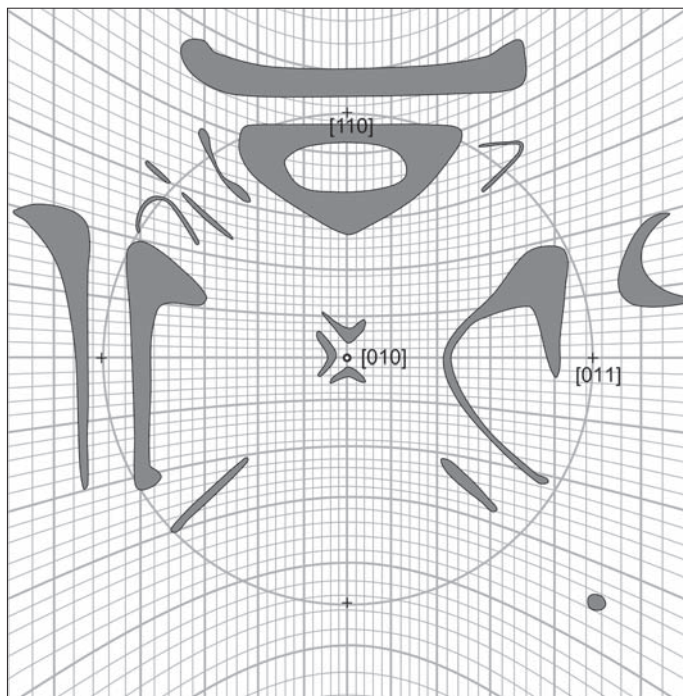


Рис. 4.22. Полярный комплекс поверхности кристалла алмаза № 17897-3 (участок Булкур, Якутия) в гномонической проекции

сов на гномограмме объясняется случайным расположением блоков в данной области поверхности алмаза и служит иллюстрацией «блочной» природы этих рефлексов. В областях поверхности, прилегающих к сетке куба, равновероятны все четыре направления сдвига 1, 2, 3 и 5 (см. рис. 4.4, 4.5), для которых значения критерия Шмида превышают 0,4. Таким образом, параллельный сдвиг структуры алмаза здесь должен происходить достаточно активно. Небольшое травление способно создать микроблочную поверхность, и механический износ, завершая развитие поверхности, производит рельеф, дающий серповидный рефлекс на экране гониометра, похожий на равнобедренный треугольник $A'B'C'$ (см. рис. 3.8, б). Наличие на гномограмме дополнительных свидетельств механической обработки позволяет с большей уверенностью относить обсуждаемые рефлексы к поверхностям механического износа алмаза, а не к формам растворения или травления.

4.5.4. Волосовидные рефлексы и спеклы

Кроме описанных особенностей световых рефлексов на экране параболического гониометра часто наблюдаются волосовидные обрамления рефлексов различной формы, обусловленные дифракционными явлениями на объектах размером не более 10–20 мкм (см. рис. 3.4). На эскизах гномограмм они обычно нами не отмечаются, но встречаются очень часто. Их в большинстве случаев нельзя считать результатом механической обработки поверхности додекаэдроида или следствием царапин на его ребрах. Направление волосовидных лучей на гномограмме ориентировано перпендикулярно ребру на поверхности кристалла, что свидетельствует о параллельности образующих их борозд и ребер. Объяснить волосовидное обрамление световых рефлексов можно наличием на поверхности шагренового рельефа с характерным размером менее 10–20 мкм. Долины между бугорками являются теми бороздами, которые дифракционно размывают световой рефлекс. Общая картина сложения когерентного света от множества бугорков дает эффект, подобный ряби на воде (см. рис. 3.4). Часть лучей в этом случае может оказаться за пределами треугольного рефлекса в запрещенной области. Подробное обсуждение дифракционных эффектов при отражении от граней кристаллов приведено в работе А.И. Глазова с соавторами (2000).

Иногда на экране гониометра наблюдается размытая, нечеткая, туманная картина рефлексов. Используя монохроматический источник света, можно убедиться, что это результат интерференции множества вторичных источников, называемый спеклами. Картина спеклов встречается не очень часто даже среди россыпных алмазов, но свидетельствует о хаотическом износе поверхности алмаза на заключительной стадии. Мелкая шероховатость механического происхождения создает эффект множества точечных когерентных источников света с линейными размерами менее 30 мкм, которые способны затмить или сгладить рефлексы от макроскопических относительно ровных участков поверхности алмаза. Чем больше степень размытости рефлексов, тем больший эффект оказал заключительный механический износ на поверхность алмаза. Однако количественная мера, отражающая степень заключительной стадии износа, пока не разработана.

**5.1. ТРАВЛЕНИЕ АЛМАЗА.
ЛИМИТИРУЮЩИЕ НЕРАВНОВЕСНЫЕ ПРОЦЕССЫ**

Травление, так же как и растворение кристалла, можно представить как последовательность нескольких процессов: поступление травящего агента (растворителя) к поверхности кристалла; топохимическая реакция отрыва атомов вещества от кристалла и образование устойчивого химического соединения с травящим агентом (в случае растворения – сольватного комплекса); отвод молекулы (комплекса) от поверхности кристалла (Хейман, 1979; Сангвал, 1990).

В работе Р.Б. Хеймана (1979) выделены три типа растворения при контакте твердого тела: а) с недосыщенной жидкой материнской фазой; б) со своим недосыщенным паром; в) с одной из реагирующих с ним жидкой или газообразной сред, в результате чего решетка твердого тела разрушается. В случае «а», по Р.Б. Хейману, происходит растворение, «б» – испарение, «в» – реакция с образованием компонентов, отвод которых от пограничного слоя в общем случае является этапом, определяющим скорость процесса. Два первых случая представляют собой обратимый процесс при изменении отношения концентраций, а последний случай необратимый. Тем не менее все эти разные случаи Р.Б. Хейман определяет общим термином «растворение», но вся работа посвящена в основном случаю «в» (Хейман, 1979).

Нам представляется рациональным закрепить за термином «растворение» только обратимые случаи химического разрушения структуры кристалла при взаимодействии с активной средой, а термин «травление» будет определять необратимые процессы химического разрушения кристалла. Таким образом, отличие травления от растворения заключается в первую очередь в том, что соединение молекул вещества с травящим агентом можно представить как отдельную самостоятельную химическую реакцию, в результате которой образуется весьма устойчивое в данных термодинамических условиях соединение, тогда как при растворении атомы кристалла (комплексы, строительные частицы) переходят в так называемое растворенное состояние, будучи окруженными легко разрушаемой сольватной оболочкой (в конденсированной среде). Надо отметить, что эффекты сольватации при травлении в конденсированных средах также имеют место и они обычно понижают скорость образования устойчивого химического соединения – продукта травления. В газовой фазе растворение (сублимация) кристалла также может активизироваться в присутствии специального агента, но соединение с ним частицы вещества кристалла не столь устойчиво, как с травителем. В поле устойчивости кристаллической структуры хи-

мическое соединение строительной частицы кристалла с «растворяющим» агентом при плавном изменении термодинамических переменных может стать нестабильным и будет легко достигнута точка равновесия, когда на поверхности кристалла скорость процесса отрыва частиц от кристалла и образования сольватного комплекса будет равна скорости разрушения комплекса и встраивания частицы в структуру кристалла.

В рамках таких представлений выделяется разновидность травления поверхности алмаза в условиях, когда соединение частицы с травящим агентом оказывается недостаточно устойчивым, но в процессе его разрушения частица при данных термодинамических условиях меняет свои химические свойства (электронную конфигурацию), что не позволяет частице обратно встраиваться в структуру исходного кристалла, но не запрещает существование другой аллотропной модификации данного вещества. Можно выделить отдельную разновидность травления – окисление (коррозию) алмаза, происходящее в окислительной обстановке, которая вообще не допускает существование какой-либо равновесной кристаллической структуры углерода (любой из аллотропных кристаллических модификаций углерода). Очевидно, что травление алмаза происходит в широких термодинамических условиях, в которых нестабильной (неравновесной) является только структура алмаза (sp^3 – электронная конфигурация атома углерода).

Известно, что если ограничивающими скорость всего процесса растворения или травления являются описанные транспортные стадии, то этот режим считается диффузионным (Хейман, 1979; Современная кристаллография, 1980; Сангвал, 1990). Если химическая реакция на поверхности лимитирует скорость травления, то данный режим называется кинетическим. Случай «в» травления кристалла Р.В. Хейман изначально считает ограниченной диффузией, тем не менее форма тела растворения, по его представлениям, полностью определяется структурой.

При растворении алмаза в квазиравновесных мантийных условиях, при высоких значениях термодинамических параметров значения свободной энергии в системе достаточны для преодоления энергии активации топохимических реакций растворения, но в условиях ограниченности свободного пространства именно перенос вещества лимитирует скорость процесса. Диффузионная модель растворения, предложенная нами (Ракин, 2011), объясняет, почему форма алмаза уральского типа так близка к поверхности второго порядка.

При травлении алмаза в поле стабильности структуры графита ситуация более сложная и возможны оба режима. В кинетическом режиме травление демонстрирует свойство яркой избирательности процесса и сильной зависимости от структуры кристалла. Скорость топохимических реакций травления при этом невелика и обусловлена множеством факторов. К главным из них можно отнести дефектность структуры в приповерхностных областях кристалла и ее анизотропию (Cabreza, 1960; Хейман, 1979; Сангвал, 1990). Но существует особый тип полирующего травления, когда топохимические реакции не обладают избирательностью. Именно этот случай характеризуется диффузионно-лимитированным режимом. Полирующее травление в чистом виде на кристаллах алмаза встречается так же часто, как и из-

бирательное, но иногда маскируется полирующим механическим износом. При этом смешанные режимы избирательного (кинетического) и полирующего (диффузионного) травления на одном кристалле алмаза также наблюдаются нередко.

Рассмотрим травление алмаза в области стабильности структуры графита, когда термодинамическое равновесие между алмазом и активной средой-травителем недостижимо (условия, близкие к нормальным). Разность энергий решеток алмаза и графита при нормальных условиях ($T = 273,15 \text{ К}$, $P = 760 \text{ мм рт.ст.}$) довольно значительна: $\Delta\epsilon = 1898,07 \text{ Дж/моль}$ ($0,0197 \text{ эВ/атом}$), она рассчитывается по закону Гесса из хорошо известных табличных энергий сгорания алмаза и графита. Но метастабильность структуры алмаза в низкопараметрических условиях обусловлена практически нулевой скоростью твердофазной трансформации структуры алмаза в структуру графита, поскольку потенциальный барьер при переходе между алмазом и графитом, по крайней мере, на порядок выше приведенной разности энергий решеток. При температурах примерно 600°С для микроалмазов и 1200°С для крупных кристаллов энергетический барьер оказывается легко преодолимым естественным образом и графитизация алмаза при атмосферном давлении происходит быстро и самопроизвольно. Иллюстрацией высоты такого энергетического барьера может служить энергия активации окисления поверхности алмаза: при атмосферном давлении и температуре до 1200°С энергия активации окисления алмаза кислородом воздуха составляет около 230 кДж/моль (для графита – около 180 кДж/моль) (Успенская и др., 1969).

Однако известно, что фазовый переход алмаз – графит легче осуществить посредством растворения (травления) и роста через активную среду кристаллизации, компоненты которой дополнительно могут служить катализаторами роста графита.

Как показано выше, движущая сила травления алмаза – разность химических потенциалов – довольно велика. Ее условно можно оценить как половину разности энергий решеток алмаза и графита – порядка 1 кДж/моль . Результатом травления, чаще всего в микроскопическом масштабе, является прихотливо изрезанная поверхность. Такая избирательность процесса травления может быть связана с кинетически лимитированным процессом (Cabrerá, 1960). Тем не менее иногда травление алмаза создает полярные признаки, указывающие на существование диффузионно-лимитированной стадии процесса травления.

Естественно предположить, что периодические цепи сильных связей в кристалле алмаза, лежащие в основе теории Хартмана–Пердока (1955а, б), будут проявляться и в ходе травления. Формирование устойчивых кристаллографических граней на поверхности кристалла (граней, на которых возникновение элементарной ступени требует преодоления определенного потенциального барьера) обусловлено термодинамическими параметрами.

Согласно принципу минимизации производства энтропии (Пригожин, Кондепуди, 2002), в открытой неравновесной системе при переходе на стационарный режим в макроскопическом масштабе наблюдения должны формироваться такие поверхности, для которых скорость растворения и массоперенос в окружающей среде достигают наименьших значений и соот-

ветственно производство энтропии становится минимальным. Скорость растворения уменьшается, если кристалл ограняется кристаллографически важными F- и S-гранями. Появление S-граней на поверхности кристалла алмаза при травлении можно расценивать как приближение к стационарным условиям травления поверхности. Одновременно это важный признак стабильности внешних условий травления алмаза. Важно учесть также и вторую сторону производства энтропии – диффузионные процессы в среде вокруг кристалла. Поле диффузии максимально сглаживается, исчезают большие градиенты концентрации и проявляются предельные элементы симметрии среды – оси бесконечного порядка. Только при сбалансированных, оптимизированных соотношениях скоростей травления кристалла и массопереноса в окружающей среде со временем естественным образом достигается минимум производства энтропии при фиксированном отклонении от равновесия.

5.2. ПОВЕРХНОСТИ ТРАВЛЕНИЯ АЛМАЗА УРАЛЬСКОГО ТИПА

Ранее формы тетрагонтриоктаэдров отмечались в треугольных ямках травления алмаза параллельной ориентации (Афанасьев и др., 2000; Khokhryakov, Pal'yanov, 2010) и их связывали с определенными окислительными условиями среды, которые считаются важнейшим фактором образования и растворения алмаза (Fefortchouk, Canil, 2009). Однако это только один, термодинамический, фактор, хотя и важнейший для процесса травления. Другие, химические, факторы (кинетика адсорбции ингибирующих примесей, комплексообразование на поверхности кристалла алмаза, кинетическая неустойчивость скорости движения элементарных ступеней и другие, а также диффузия веществ от поверхности кристалла и к ней) трудно поддаются контролю и анализу, поэтому часто даже не обсуждаются в литературе. Вероятно, совокупное действие причин разного порядка приводит в одних случаях к яркой «избирательности» травления, а в других – к полирующим эффектам.

Рассмотрим ряд кристаллов с особыми поверхностями, отличающимися от поверхностей роста, растворения (согласно диффузионной модели) и механического износа.

Кристалл № 564 из россыпи ближнего сноса Заря (источник – трубка Мир) (рис. 5.1) обладает рефlekсами, расположенными главным образом вокруг точек октаэдра и на линиях тригонтриоктаэдров и тетрагонтриоктаэдров. Наряду с F-гранью октаэдра среди плоских сеток, выходящих на поверхность данного кристалла, отмечается серия S-граней тригонтриоктаэдра {455}, {344}, {233}, {355}, {477}, {122} и тетрагонтриоктаэдра {343}, {232}. На гномограмме (см. рис. 5.1, б) черными точками показано положение этих рефлексов в фундаментальной области кристаллографической проекции. Указанные формы отмечаются в разных симметричных областях гномонической проекции кристалла. Фрагменты цилиндрических поверхностей соединяют эти S-границы воедино. Отмечаются отдельные изолированные рефлексы от K-граней (765), (12.9.11) и (12.11.10) (см. рис. 5.1, б, индексы на гномограмме не показаны). Важное отличие форм травления от

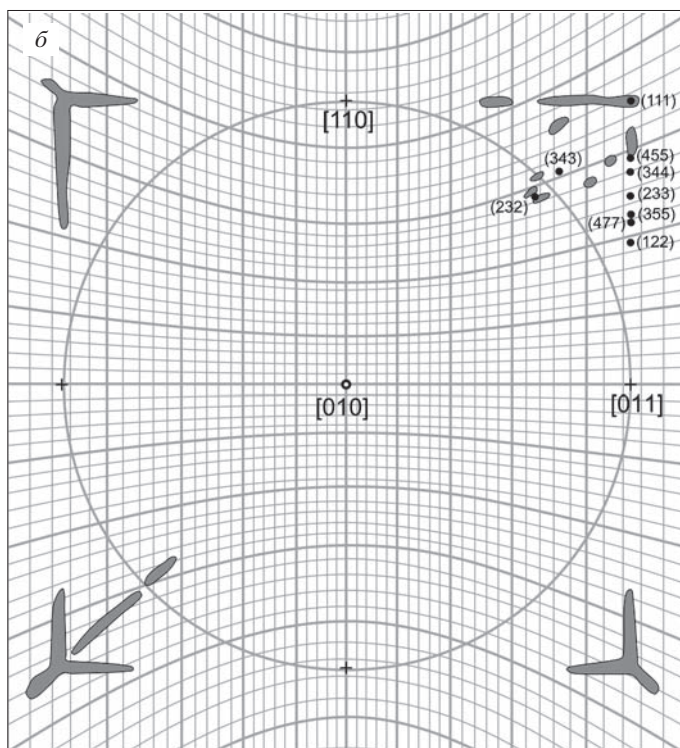
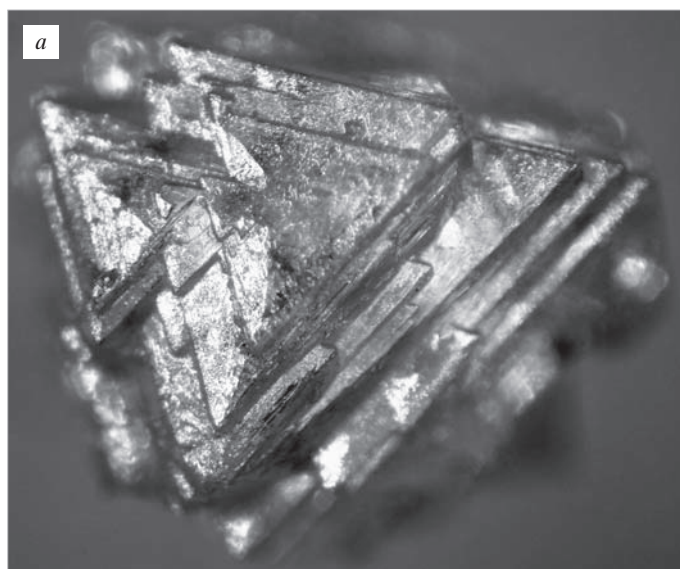


Рис. 5.1. Поверхность кристалла № 564 из россыпи Заря (источник – трубка Мир) (а) и его гномограмма (б)

цилиндра растворения заключается в том, что все рефлексы здесь тесно связаны с точкой октаэдра.

Кристалл № 715 октаэдрического облика, также из россыпи Заря, демонстрирует так называемое полицентрическое строение граней и кроме всех возможных 13 S-граней тригонтриоктаэдра алмаза и грани ромбододекаэдра {011}, объединенных общей цилиндрической поверхностью, дает рефлексы только одной S-грани тетрагонтриоктаэдра {232} (рис. 5.2). Но отличие его от кристалла № 564 заключается не только в этом. На кристалле представлены особые криволинейные поверхности, не имеющие аналогов среди поверхностей растворения или механического истирания. На гномонической проекции эти выпуклые криволинейные грани представлены относительно крупными полями, располагающимися на гномонической проекции за пределами главного круга сетки Хилтона (нормали к поверхностям отклоняются на угол более 45° относительно четверных осей алмаза) (см. рис. 5.2, б). Эти поверхности ориентационно близки к плоскостям октаэдра. Такие рефлексы можно назвать сателлитными, поскольку они окружают точку октаэдра. Подобные поверхности были замечены А.Е. Ферсманом при искусственном травлении алмаза в расплаве селитры и соды (Ферсман, 1955) и К.В. Фомичевой-Митрофановой при травлении алмаза в щелочи (Шафрановский, 1957).

Наибольшая кривизна поверхности кристалла № 715 наблюдается по линии тригонтриоктаэдров. При этом линия тетрагонтриоктаэдров представлена одной формой {232} (два рефлекса). Сателлитный рефлекс от криволинейной поверхности, на экране гониометра напоминающий козынку, можно отнести к нестационарным поверхностям травления. На нестационарных поверхностях травления особенно ярко реализуется избирательное по отношению к структуре кристалла свойство корродирующей среды. Серповидные рефлексы, располагающиеся в этой же области (см. рис. 5.2, б), свидетельствуют о блочной структуре кристалла и в данном случае связаны с последним этапом механической обработки уже протравленного алмаза.

Ранее плоские S-грани тригонтриоктаэдра и тетрагонтриоктаэдра на искусственных кристаллах иллюстрировали стационарный «квазиравновесный» рост алмаза (см. главу 2). Но теоретически нет запрета для появления этих граней в процессе стационарного растворения или травления. Решающее влияние высокого значения энергии активации элементарной ступени на S-гранях кристалла на скорость процесса проявляется в первом случае при росте кристалла, а во втором – при травлении – в кинетическом режиме растворения. Свидетельством кинетического режима травления можно считать также возникновение криволинейных граней, дающих сателлитные рефлексы одновременно с плоскими S-гранями на кристалле алмаза (см. рис. 5.2, б).

Избирательность травления наблюдается также на кристалле № 685 россыпи Заря (рис. 5.3, а, б) и кристалле У-4 (рис. 5.3, в). Темным цветом на гномограмме (см. рис. 5.3, б) искусственно выделены сателлитные рефлексы, а светлым – особые поверхности «конуса травления». Ранее нами было высказано утверждение, что переходной формой диффузионно-лимитиро-

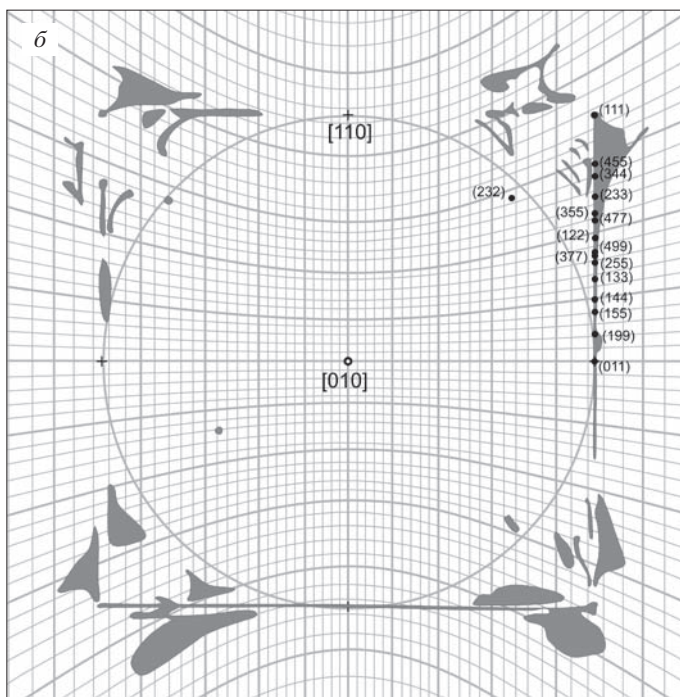
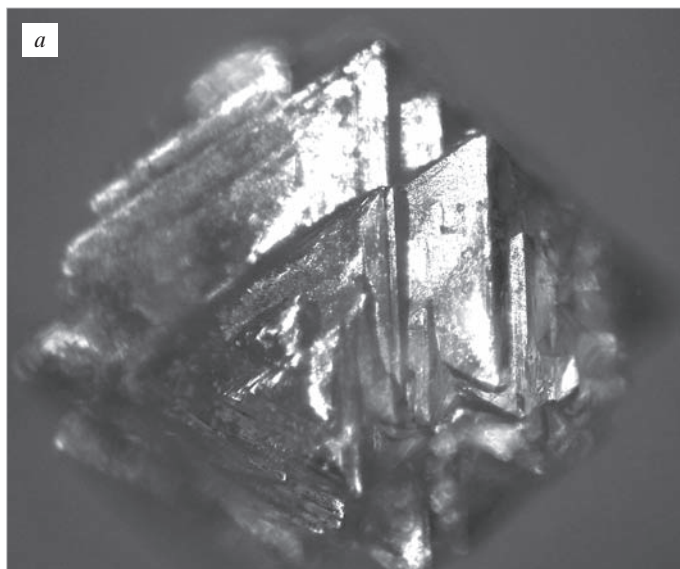


Рис. 5.2. Кристалл № 715 из россыпи Заря (*a*) и его гномограмма (*б*)

ванного растворения от цилиндра к эллипсоиду должна быть короткоживущая гладкая поверхность, близкая к конусу. Эта форма растворения в чистом виде нам ни разу не встречалась. Но конус, образованный поверхностью алмаза с интенсивной штриховкой, состоящей из множества узких выпуклых полос, и обнаруживаемый интегрально только на экране гониометра, причем одновременно с поверхностями травления, дающими сателлитный рефлекс, встречается гораздо чаще. С учетом статистически наблюдаемых фактов поверхности конуса на кристаллах алмаза уральского типа в большинстве случаев связаны именно травлением. В частности, рефлекс конуса, изображенный на рис. 3.10, б, вероятно, являются формами травления. Следует заметить, что конусовидные поверхности встречаются в некоторых случаях также и при хаотическом износе кристалла, но если конус сочетается с явными многочисленными признаками травления, то его следует относить в первую очередь к формам травления.

Для кристалла № 685 наличие ребра (гранного шва) на поверхности и, как следствие, промежутка между двумя ближайшими рефлексам светлого тона на рис. 5.3, б позволяет исключить фактор существенного механического износа кристалла. Тем не менее небольшая заключительная механическая обработка кристалла имела место.

Возникновение и сохранение гранного шва практически по всему допустимому интервалу равных 70° углов между точками смежных граней октаэдра по линии тригонтриоктаэдров являются достаточно надежным свидетельством диффузионно-лимитированного режима как для «истинного» растворения при переходе от формы эллиптического цилиндра к эллипсоиду, так и при травлении. Причем, если кинетически лимитированный режим травления поверхности алмаза реализуется чаще вблизи выходов осей симметрии третьего порядка – у точек октаэдра, самых устойчивых F-граней алмаза, то на удалении от них, вокруг точек ромбододекаэдра $\{110\}$ (S-граней), но не по линии тригонтриоктаэдров и в области эллипсоида растворения (K-граней), рефлекс травления возникают только в случае диффузионно-лимитированного процесса.

Различие между диффузионным и кинетическим режимами травления может быть объяснено на молекулярно-кинетическом уровне (Современная кристаллография, 1980). Поверхностная реакция травления кристалла представляет собой последовательность элементарных актов отрыва частиц от кристалла, происходящую на краю элементарных ступеней. Частота этих событий определяет скорость реакции. Поступление молекул травителя к кристаллу и удаление химически устойчивых молекул от реакционной зоны – края ступени – осуществляются по диффузионному закону. Известно, что для диффузионного пограничного слоя можно установить определенный линейный размер (Современная кристаллография, 1980; Ракин, 1990). Это касается диффузии как травителя в поверхность кристалла, так и продуктов реакции в объем среды. Надо учитывать, что скорость поступления молекул вещества травителя к поверхности, поверхностной реакции отрыва и диффузионного переноса вещества от края ступени в глубь среды всегда строго сбалансированы. Если расстояние между элементарными ступенями – активными точками поверхностной реакции – становится меньше

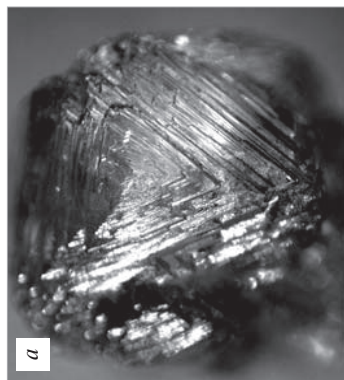
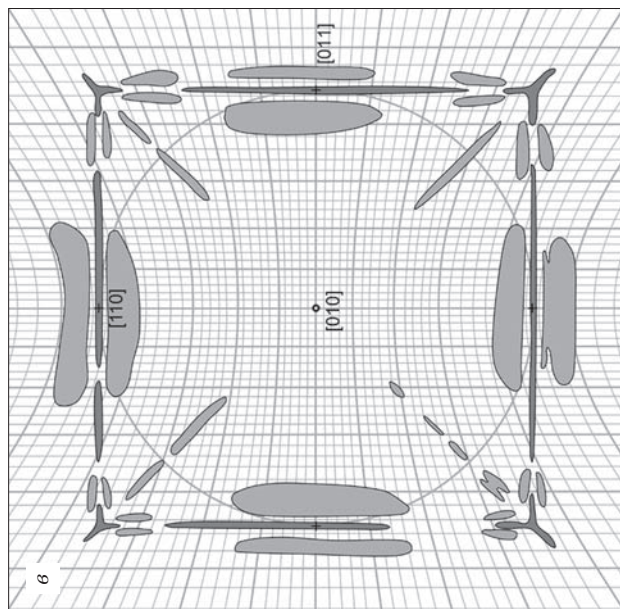
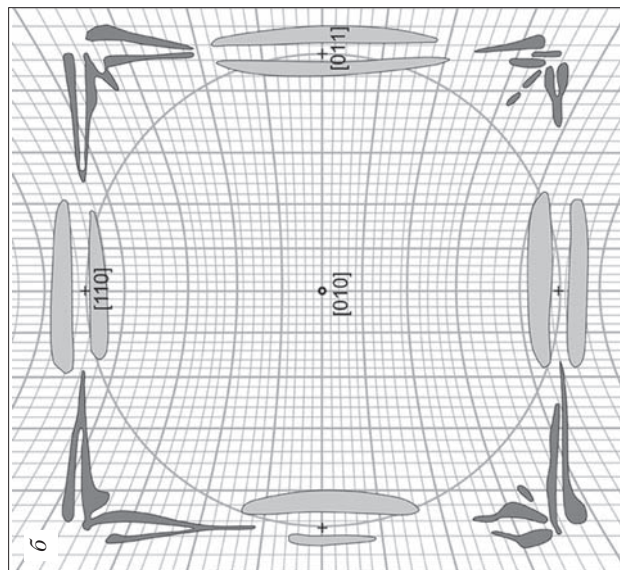


Рис. 5.3. Поверхность кристалла № 685 из россыпи Заря (а) и его гномограмма (б), гномограмма алмаза У-4 из трубки Удчная (в)



толщины диффузионного слоя (одного из диффузионных слоев), зоны диффузии перекрываются, то диффузия происходит не столь эффективно, как могла бы, и скорости всех процессов, включая отрыв частиц с поверхности кристалла, замедляются, ограничиваясь скоростью диффузии. Так реализуется диффузионный режим травления. Если активные точки – края элементарных ступеней – на поверхности кристалла расположены редко, то зоны диффузии не перекрываются и скорость травления может определяться кинетикой актов отрыва частиц от кристалла.

Существование макроскопических плоских граней октаэдра на алмазе в ходе травления полностью согласуется с кинетическим режимом травления. Вокруг них часто наблюдаются относительно ровные площадки, на которых локально происходят наиболее медленные топохимические реакции травления. У выхода тройной оси часто появляются прихотливо изогнутые сателлитные рефлекс, обусловленные вариациями скорости реакции послойного растворения алмаза (см. рис. 5.3). Здесь также в полной мере реализуется кинетический режим травления. На поверхности алмаза У-4 происходит смешанный режим травления: на одних участках – кинетический, на других – диффузионный (рис. 5.3, в). Причем весьма симметричная картина отражения указывает на сильное влияние структуры алмаза на процесс травления. Важно заметить, что для обоих режимов характерна сильная зависимость формы травления от структуры.

Кристалл № 587 из россыпи Заря (рис. 5.4) имеет облик додекаэдроид, образованного в результате первичного растворения алмаза. Небольшие явления регенерации привнесли штриховку на поверхность кристалла и явно выраженные плоские участки граней октаэдра. Дальнейшая история алмаза связана с нестационарным травлением поверхности главным образом в диффузионно-лимитированном режиме, в результате чего первичный рефлекс от формы растворения, который исходно имел форму треугольника *ABC*, радикально трансформировался при регенерации, но затем превратился в причудливо изогнутую полосу света на гномограмме параллельно линии тригонтриоктаэдров. Гранный шов сохранился на всем протяжении между смежными точками октаэдра. Наиболее яркие сателлитные рефлекс за пределами главного круга сетки Хилтона (отмечены более темным цветом) отвечают за участки поверхности, прилегающие к выходам осей третьего порядка и новообразованным граням октаэдра. Травление здесь демонстрирует переходный режим от диффузионного к кинетическому, и S-границы тригонтриоктаэдров не появляются. Уширение полосы светового рефлекса свидетельствует также и о незначительной хаотической шлифовке поверхности кристалла, которая происходила уже в ходе выветривания кимберлита трубки Мир и формировании элювиальной россыпи Заря, что полностью соответствует закономерностям механической деградации поверхности алмаза. Надо отметить, что механическая обработка протравленной поверхности кристалла № 587 оказалась более значительной, чем у алмаза № 685 из той же россыпи.

Рассмотрим особенности полирующего диффузионного травления на примере кристалла MGD11/7 (рис. 5.5). Алмаз-додекаэдроид, обладающий достаточно гладкими гранями, местами покрыт пятнами с матовой поверх-

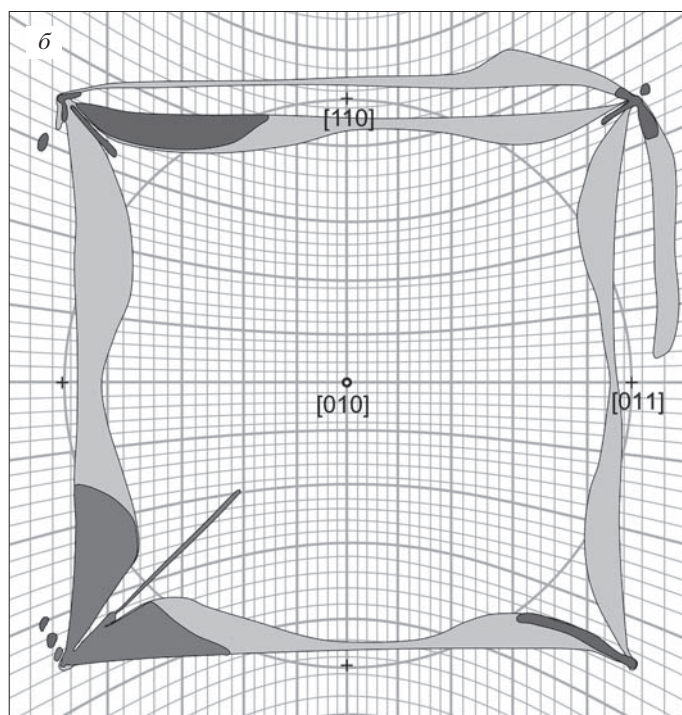


Рис. 5.4. Додекаэдройд № 587 из россыпи Заря (а) и его гномограмма (б)

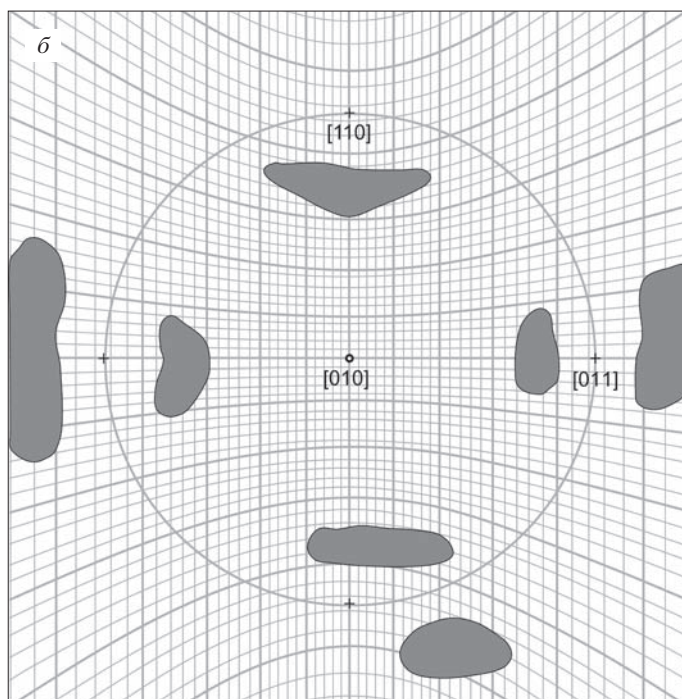
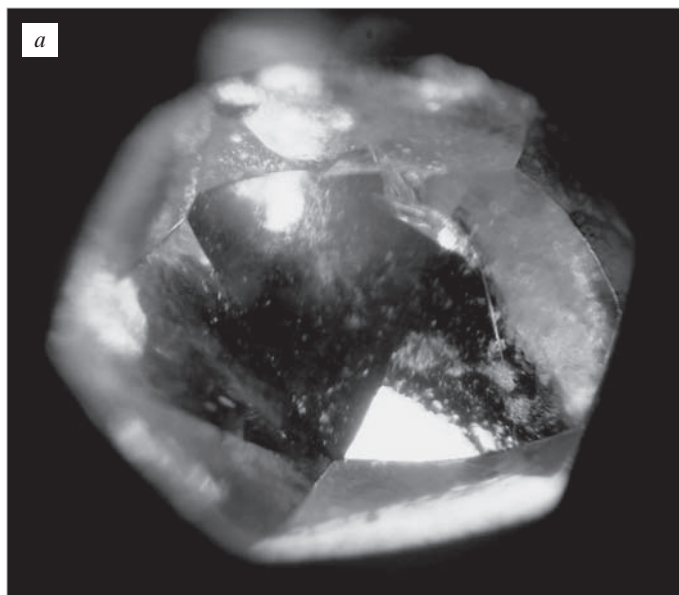


Рис. 5.5. Кристалл MGD11/7 (из бассейна р. Макаубас, штат Минас Жерайс, Бразилия) (*a*) и его гномограмма (*б*)

ностью, напоминающей поверхность стекла, неравномерно обработанную абразивной струей песка. Остальная гладкая поверхность внешне не отличается от зеркальной выпуклой поверхности лучших образцов алмазов уральского типа. Однако на экране параболического гониометра не обнаруживаются ожидаемые треугольные рефлексы *ABC* эллипсоида растворения (см. рис. 5.5, б). На их месте наблюдаются существенно меньшие по размеру и овальные по форме пятна. Только один из четырех рефлексов сохраняет близкую к треугольнику форму, и на нем заметно влияние пластических течений структуры алмаза. Объяснение такой формы рефлексов возможно в рамках полирующего травления, которое не обладает избирательностью в силу влияния диффузии как лимитирующей стадии процесса. При полирующем травлении алмаза уральского типа гладкая поверхность сохранится, но ее ориентация будет незначительно варьироваться, что сразу скажется на форме рефлекса. Это наблюдается на кристалле MGD11/7 (см. рис. 5.5). Важно отметить, что угловые размеры рефлекса при полирующем травлении значительно сокращаются, форма перестает описываться уравнением второго порядка. Только поэтому контуры рефлекса на экране гониометра причудливо и непредсказуемо искривляются, хотя ребра кристалла сохраняют исключительную остроту.

Как при кинетическом, так и диффузионном режиме травления можно выделить стационарные и нестационарные формы поверхности. К нестационарным формам травления в диффузионном режиме можно отнести конусовидные поверхности, дающие протяженный рефлекс (см. рис. 5.3, б), в пределах соединяющий ближайшие точки октаэдра (рис. 5.6). Но при этом на гномограмме обычно присутствуют дополнительные признаки травления – утолщения рефлексов вблизи точек октаэдра (см. рис. 5.6, б) или косынки (см. рис. 5.3, б). Ребро на криволинейной поверхности алмаза, названное А.А. Кухаренко гранным швом, всегда появляется при нестационарном травлении в диффузионном режиме (см. рис. 5.3, б; 5.4, б; 5.6, б). Это свойство – главный индикатор диффузионного режима. В соответствии с экстремальными принципами неравновесной термодинамики можно предсказать, что стационарная форма диффузионного режима травления при достаточно длительном процессе ничем не должна отличаться от квазиравновесного растворения и на экране гониометра рано или поздно должны появляться треугольные рефлексы эллипсоида. Однако такой случай стационарного травления на практике не встречается. Вероятно, причина этого заключается в том, что диффузионный режим травления алмаза не сохраняется достаточно долго из-за сильнонеравновесных условий в макросистеме кристалл–среда и быстро сменяется кинетическим или вовсе прекращается. Очевидно, что нестабильность условий характерна для травления алмаза в приповерхностных слоях Земли в отличие от истинного растворения, реализующегося на больших глубинах в квазиравновесном состоянии.

Нестационарное травление в кинетическом режиме продемонстрируем на кристалле № 715 (см. рис. 5.2). Отсутствие гранного шва и причудливая форма сателлитных рефлексов вокруг точек октаэдра являются главными признаками такого процесса. В эксперименте, проведенном А.Е. Ферсманом, при травлении плоского спайного осколка алмаза в расплаве селитры

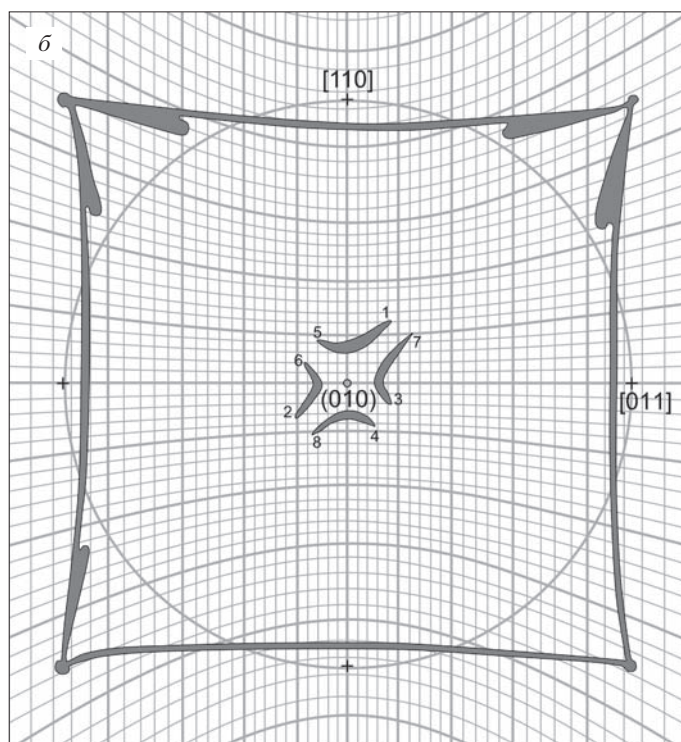
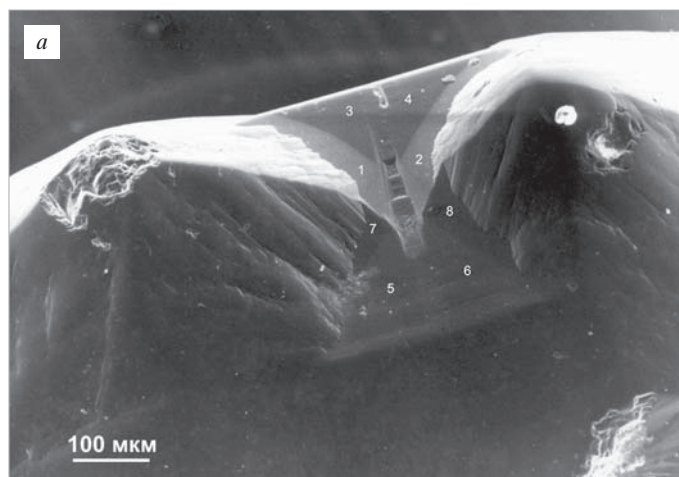


Рис. 5.6. Фрагмент параллельного сростка алмаза-октаэдроида D5 (а) из бразильской коллекции (бассейн р. Макаубас, штат Минас Жерайс, Бразилия) и гномоническая проекция его полярного комплекса (б).

Пояснения см. в тексте

при температуре около 900 °С в течение 45 мин наблюдались концентрические множественные рефлексы, располагающиеся вокруг точки октаэдра на гномонической проекции (Ферсман, 1955). Эти рефлексы находятся в пределах области сателлитных рефлексов, характерной для форм травления природных алмазов: отклонение нормалей от оси третьего порядка не превышает 10° (см. рис. 5.2, б; рис. 5.3, б; рис. 5.4, б). Все поверхности положительного рельефа травления проецируются в основном за пределы главного круга сетки Хилтона при правильной кристаллографической установке алмаза.

При переходе к стационарному травлению в кинетическом режиме наиболее отчетливо проявляются свойства структуры кристалла: S-границ алмаза, располагающиеся по линиям трионтриоктаэдра и тетрагонтриоктаэдра, и в первую очередь грани, максимально приближенные к октаэдру (см. рис. 5.1). Остальные нестационарные рефлексы травления при этом исчезают. В стационарном процессе травления на положительном рельефе должны проявляться прежде всего наиболее устойчивые F-грань октаэдра, S-границ тригонтриоктаэдров {455}, {344}, {233} и, возможно, ряд других, S-грань тетрагонтриоктаэдра {343} (см. табл. 1.1). Остальные четыре S-границ тетрагонтриоктаэдров, оказывающиеся внутри главного круга сетки Хилтона, формируются часто на поверхностях отрицательного рельефа (впадинах, бороздах, ямках травления и др.). Другие S-границ тригонтриоктаэдров, располагающиеся ближе к ромбододекаэдру {110}, проявляются при стационарном процессе травления в кинетическом режиме гораздо реже, поскольку обычно эта область поверхности служит полигоном для других процессов, например хаотического износа.

Смешанный вариант травления с переходами между стационарным и нестационарным типами и между диффузионным и кинетическим режимами демонстрирует кристалл У-5 из кимберлитовых жил второй генерации трубки Удачная (рис. 5.7). Такие случаи бывают нередко, и их можно называть комбинированной формой травления. На кристалле У-5, кроме того, наблюдаются признаки хаотического износа первичных форм растворения (на рис. 5.7, б показаны более светлым цветом). Но последовательность всех перечисленных процессов достоверно установить не удается.

Поверхность куба при стандартной установке алмаза обычно не наблюдается, но иногда вокруг них регистрируется особая группа сателлитных рефлексов. Рассмотрим область гномонической проекции нормалей вблизи полюса [010], где иногда локализуются серповидные рефлексы, связанные с отрицательным рельефом алмаза на выходах осей четвертого порядка (см. рис. 5.6) или положительным рельефом при механическом износе (см. рис. 4.22). Местоположение и форма рефлексов близки также к положению и форме сигнала от так называемого эллипсоида II типа (см. рис. 3.8, б). Напомним, что кристалл-кубоид, изображенный на рис. 3.8, а, имеет поверхность, на которой присутствуют «правильный» рефлекс, принадлежащий эллипсоиду I типа (ABC), а также рефлексы от граней крупной ямки растворения на выходе четверной оси (MNK) и рефлекс $A'B'C'$, отнесенный нами условно к выпуклой поверхности эллипсоида II типа. Все эти поверхности были ранее причислены нами к формам растворения. Однако в совокупности с другими рефлексами, расположенными за пределами главного

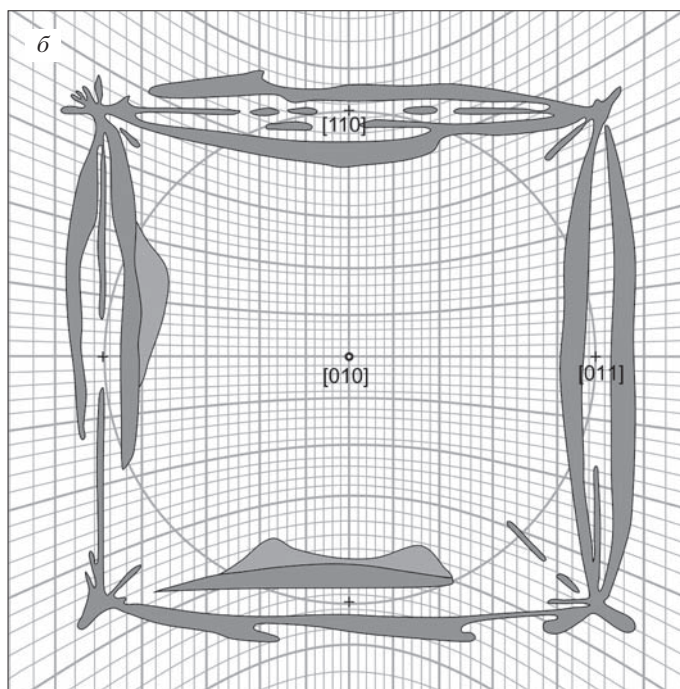


Рис. 5.7. Кристалл У-5 из трубки Удачная (Якутия) (а) и его гномограмма (б).
Более светлые рефлексы – реликты поверхностей первичного растворения, проявившиеся в результате травления

круга сетки Хилтона и обладающими признаками травления, серповидные рефлексy на рис. 5.6, б можно уверенно отнести к формам травления.

Описываемый кристалл (см. рис. 5.6, а) отличается тем, что его выпуклая поверхность существенно более гладкая и демонстрирует на гномограмме исключительно нестационарные формы травления – протяженные рефлексy конуса и сателлитные утолщения на них в областях, прилегающих к точкам октаэдра (см. рис. 5.6, б). На самом кристалле обнаруживается шов шириной до 20 мкм между субиндивидами, возникший еще на стадии зародышеобразования при параллельном срастании кристаллов. В области шва отмечаются плоские грани и прямоугольные ямки травления. Морфологический анализ ямок травления показал, что они не обладают осью симметрии четвертого порядка, но для них характерна, по крайней мере, одна плоскость симметрии. Можно предположить, что шов представляет собой слой лонсдейлитовой структуры между двумя субиндивидами алмаза (см. главу 2), а плоская грань, параллельная грани (100) алмаза, наиболее вероятно может быть S-гранью лонсдейлита ($30\bar{3}4$), содержащей одну цепь сильных связей, направленную по вектору $[1\bar{2}10]$ вдоль линии шва (см. рис. 5.6, а), и совпадающей с осью второго порядка структуры лонсдейлита. Ямка травления на этой грани лонсдейлита должна иметь форму прямоугольника и обладать только одной плоскостью симметрии, ориентированной перпендикулярно линии шва.

Вокруг шва на субиндивидах алмаза сформировались гладкие выпуклые окружающие грани, образующие своеобразную ложбину отрицательного рельефа. В результате детального анализа рефлексов данного кристалла составлена карта микрограней и соответствующих им участков рефлексов на гномограмме (см. рис. 5.6). Четыре серповидных рефлексy на экране гониометра образованы восемью фрагментами поверхностей, что соответствует планаксиальному классу симметрии кубической сингонии алмаза. В этих условиях элементарный фрагмент гладкой поверхности можно вполне успешно аппроксимировать поверхностью эллипсоида II типа. Однако параметры эллипсоида установить не удастся. Форма ложбинки накладывает отпечаток на форму рефлексy, и наблюдается обычный серповидный сигнал на экране гониометра. Небольшая дисимметризация рефлексов связана с ориентацией шва срастания на кристалле, помещенном в гониометре. На кристалле хорошо заметны неровные отрицательные ребра, образующие входящий угол, между гранями конусовидной поверхности и гладкими гранями, окружающими шов. Эти ребра разделяют поверхности граней разных морфологических типов, и именно они свидетельствуют о едином процессе травления, в ходе которого сформировались все наблюдаемые на кристалле криволинейные и плоские поверхности. Таким образом, если основная конусовидная поверхность кристалла алмаза возникла в ходе диффузионного травления, на что также указывают наплывы световых рефлексов вблизи точек октаэдра на дуге конуса (сателлитные рефлексy), то гладкие поверхности ложбины (серповидные рефлексy 1–8 на рис. 5.6, б) тоже должны быть отнесены к травлению. Присутствие грани ($30\bar{3}4$) лонсдейлита как стационарной формы кинетического режима травления (S-грани лонсдейлита) в этом случае легко находит объяснение в рамках теории ПЦС.

Рассмотрим основную поверхность алмаза D5 из коллекции бассейна р. Макаубас (Бразилия) (см. рис. 5.6). Согласно гномограмме, это фрагменты поверхности конуса. Угол между осью конуса и ребром $\langle 011 \rangle$ составляет около 14° , а угол образующей – около 11° . Для конусов травления с малым параметром образующей, незначительно отклоняющихся от цилиндрической поверхности, ориентированной осью по $\langle 011 \rangle$, можно использовать относительно простые формулы расчета, полученные при решении стереометрической задачи с небольшими упрощениями:

$$\operatorname{tg} \rho = \frac{\sin \beta \cos \alpha}{1 - \cos \alpha}, \quad \varphi = \rho + \beta, \quad (5.1)$$

где ρ – угол образующей конуса, φ – угол между осью конуса и ребром $[011]$, $\alpha = 35^\circ 16'$ угол между направлениями $[011]$ и $[111]$ в кристалле, β – угловое расстояние между точкой (011) на гномограмме и ближайшей дугой конуса. По четырём линиям конусов на гномограмме алмаза D5 можно установить среднее угловое расстояние β , оно составляет $2,6^\circ$ (см. рис. 5.6, б). По формулам (5.1) $\varphi = 14^\circ 00'$, $\rho = 11^\circ 23'$. Направление оси конуса в данном случае совпадает с вектором $[053]$. Если отсчитывать угол отклонения оси конуса от ближайшей четверной оси алмаза, то надо вычислить разность $45^\circ - \varphi = 31^\circ$.

Замечено, что конус диффузионного травления на алмазах развивается от параметров $\varphi = 0$, $\rho = 0$ до некоторых предельных значений. Вывод о существовании предельного конуса травления следует из всего эмпирического материала, изученного нами. На кристалле У-21 трубки Удачная диффузионный режим травления развивался по формам механического износа додекаэдроидов (рис. 5.8). Первичная поверхность растворения модифицировалась сначала хаотическим истиранием алмаза. Затем достаточно эффективное диффузионное травление привело к формированию волнистой поверхности, в результате чего на экране гониометра были зарегистрированы дуги конусов травления с параметрами $\varphi = 26^\circ 10'$, $\rho = 21^\circ 10'$. Можно предположить, что поверхность кристалла, формирующая на гномограмме дуги конусов, образована в результате развития волновых процессов реакции травления, распространяющихся по элементарной поверхности додекаэдроидов к точке выхода тройной оси. Такое движение реакции травления соответствует ориентации элементарных ступеней на выпуклой поверхности механически обработанного додекаэдроидов алмаза. Существование кинематических поверхностных волн не противоречит диффузионно-лимитированному режиму травления и может быть объяснено нелинейной динамикой реакций. Однако условия и причины возникновения кинематических волн травления неизвестны. Наблюдалось, что рефлекс конуса возникает от правильных, относительно гладких, додекаэдроидов алмаза, хотя и модифицированных в результате механической дегградации. При этом пластические течения структуры, вероятно, стимулируют образование кинематических волн травления (см. рис. 2.6, 4.8, 4.9).

У кристалла У-21 ось конуса близка к вектору $[093]$ (см. рис. 5.8). Поверхности конусов с необходимостью включают в себя участки плоских секторов октаэдра. Полученные значения угла $\varphi = 26^\circ$ (угол отклонения оси конуса относительно четверной оси составит 19°), образующей $\rho = 21^\circ$ близки

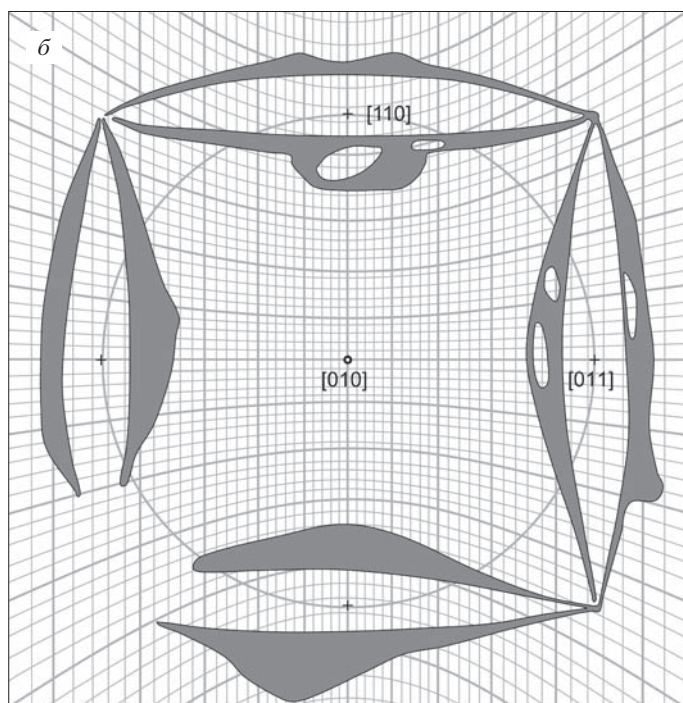
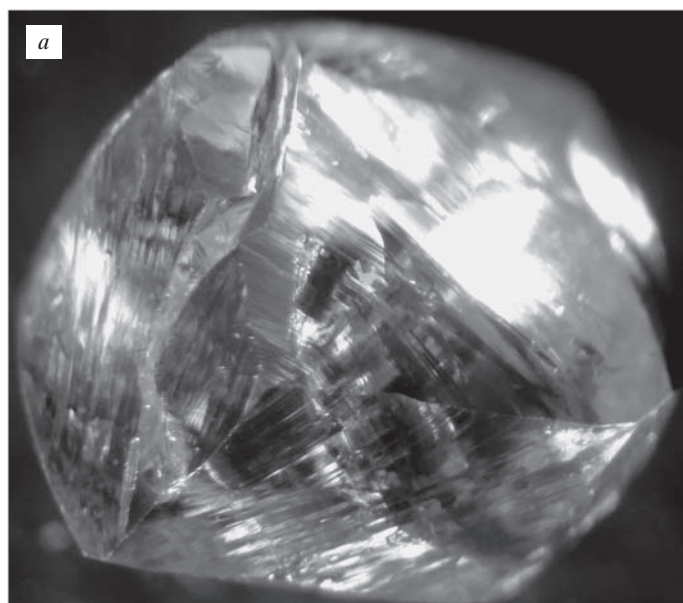


Рис. 5.8. Кристалл У-21 трубки Удачная (Якутия) (а) и его полярный комплекс (б)

к предельным параметрам конусов травления и могут быть приняты за характеристики предельной формы травления в диффузионном режиме с образованием кинематических волн.

Вернемся к кристаллу-кубоиду, обсуждавшемуся в главе 3 (см. рис. 3.8). Можно сделать допущение, что кроме этапа растворения он испытал этап травления (коррозии), который несильно отразился на форме основного треугольного рефлекса, но образовал поверхности $A'B'C'$, характерные для участков травления отрицательной поверхности алмаза на выходах четверных осей. Однако другие рефлексы травления, располагающиеся за пределами большого круга на гномонической проекции, на данном кристалле не обнаружены, что может быть объяснено кубическим обликом кристалла и отсутствием граней октаэдра.

В то же время серповидные рефлексы на рис. 5.6 и треугольник $A'B'C'$ (рис. 3.8, б) можно рассматривать как конвергентный признак общего растворения отрицательного рельефа алмаза, разделенного нами условно на диффузионно-лимитированное квазиравновесное растворение и неравновесное травление.

Эволюция формы алмаза часто завершается естественной заключительной хаотической механической обработкой поверхности. Этот процесс, проходящий по стационарным формам кинетического травления, проявляется, например, в виде линии цилиндра, ориентированного по зонам $\langle 110 \rangle$, что допускает возможность ошибочно принимать их за начальные формы растворения или только формы механической обработки.

Примером сложной эволюции формы алмаза может служить «комбинированная» форма кристалла MtGrDn-3 из бразильской коллекции (штат Мату Гроссу), имеющего облик додекаэдроида. На поверхности кристалла алмаза в виде фрагментов плоских сеток присутствуют все кристаллографически значимые грани, кроме куба (рис. 5.9). Ромбододекаэдр, полный набор 13 S-граней тригонтриоктаэдров, октаэдр и 5 S-граней тетрагонтриоктаэдров объединены в линию цилиндра. F-грани октаэдра окружены ореолом рефлексов от округлых поверхностей, образованных кинетическим травлением и заключительным небольшим механическим износом, среди которых выделяются линии K-граней тригонтриоктаэдров и тетрагонтриоктаэдров. Важно отметить, что тетрагонтриоктаэдры (диагональные рефлексы) размещаются на отрицательном рельефе поверхности – стыках соседних аксессуаров, располагающихся на четверных осях кристалла. Травление кристалла происходило особым образом. После этапа квазиравновесного длительного растворения алмаза, когда он приобрел облик додекаэдроида, наступил этап механического износа, достигший почти предельной стадии. Затем начался этап травления. На гномограмме отсутствуют сателлитные рефлексы травления вокруг точек октаэдра, характерные для нестационарного травления в кинетическом режиме, но ярко представлены небольшие лучи вокруг точек октаэдра по линиям тригонтриоктаэдров и тетрагонтриоктаэдров, которые свидетельствуют о стадии стационарного травления участков поверхности у выходов тройных осей симметрии. Линии цилиндрических поверхностей с отмеченными на них положениями S-граней алмаза связаны заключительным механическим износом стацио-

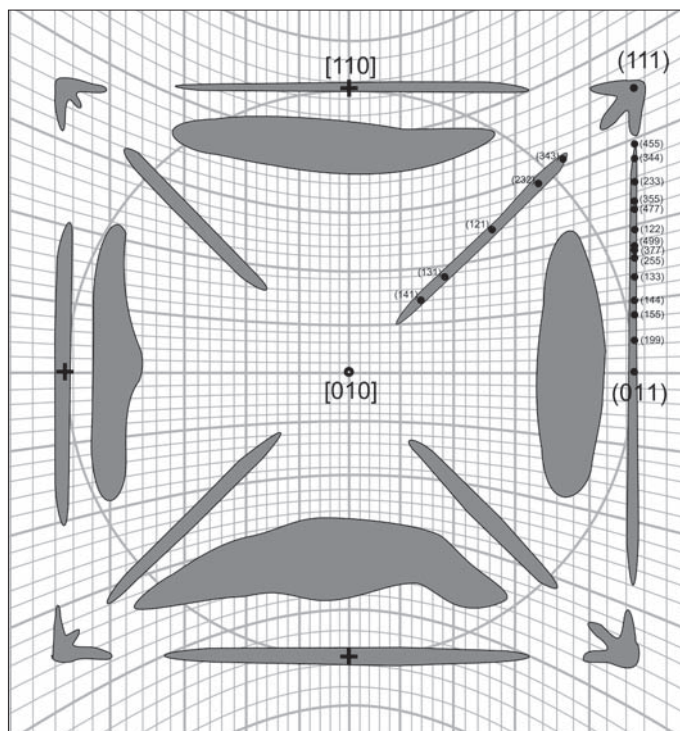


Рис. 5.9. Гномограмма кристалла MtGrDn-3 из бразильской коллекции (штат Мату Гроссу). Точками в фундаментальной области проекции показаны кристаллографически значимые, согласно теории ПЦС, грани алмаза

нарных поверхностей травления. Видоизмененные рефлексы ударного износа на поле рефлексов додекаэдроида достаточно широки, но отделены от линии эллиптического цилиндра – линии тригонтриоктаэдров – ребрами, что свидетельствует о нестационарном травлении в диффузионном режиме основной части поверхности кристалла. На завершающей стадии эволюции алмаз опять подвергался небольшому ударному износу полирующего типа, приведшему к расширению всех линий рефлексов, сглаживанию ребер между S-гранями и созданию интерференционной зернистой структуры «спеклов» всех рефлексов на экране гониометра.

Рассмотрим форму кристалла Top-5 бразильской коллекции (рис. 5.10). Кристалл обладает особым микроблочным рельефом поверхности. Удлиненные по форме блоки-ступени ориентированы вокруг октаэдрических граней с признаками травления. На экране гониометра отмечается диффузно рассеянный рефлекс сложной формы, отображающий цилиндрические и криволинейные поверхности. Сопоставление физиографических морфологических признаков кристалла с полярными позволяет предположить, что сначала октаэдрический кристалл алмаза при растворении приобрел округлый облик додекаэдроида. Следующим этапом был значительный хаотический механический износ предельного типа, когда весь приповерхностный слой кристаллического вещества стал дефектным за счет трещин и краевых дислокаций. Затем этап травления проявил несовершенную структуру приповерхностной области кристалла. Здесь важно обратить внимание, что прилегающие к выходам осей третьего порядка области поверхности алмаза

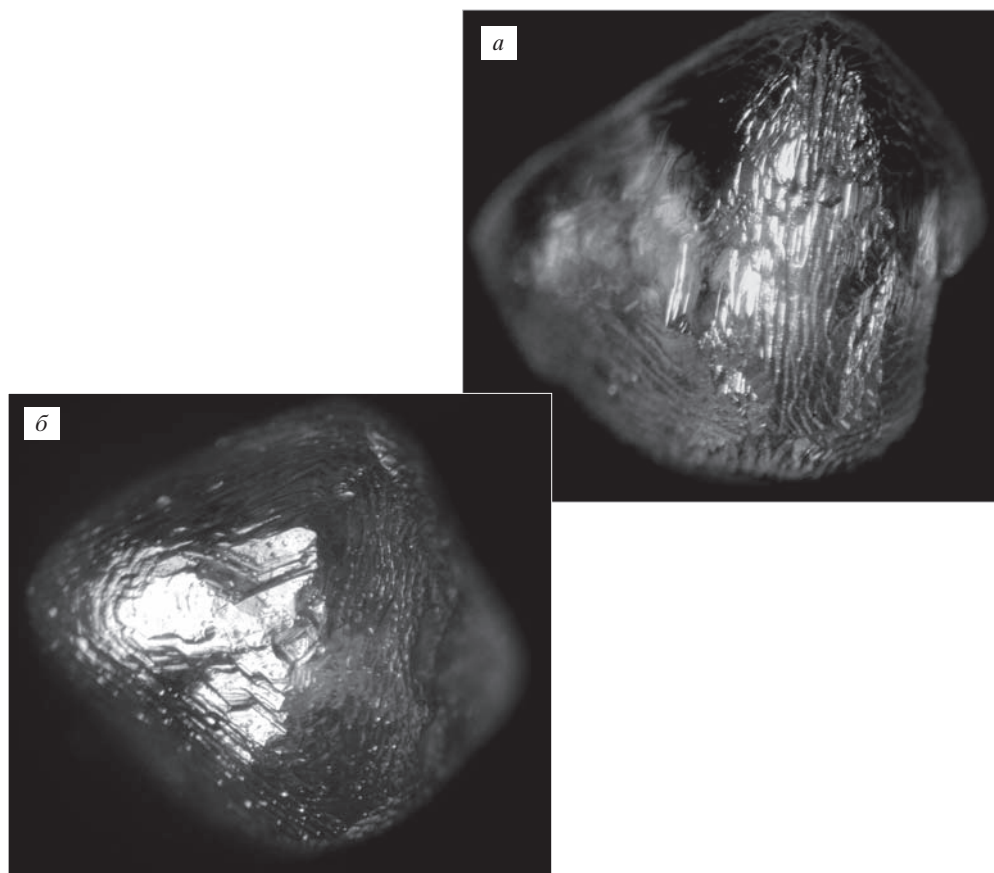
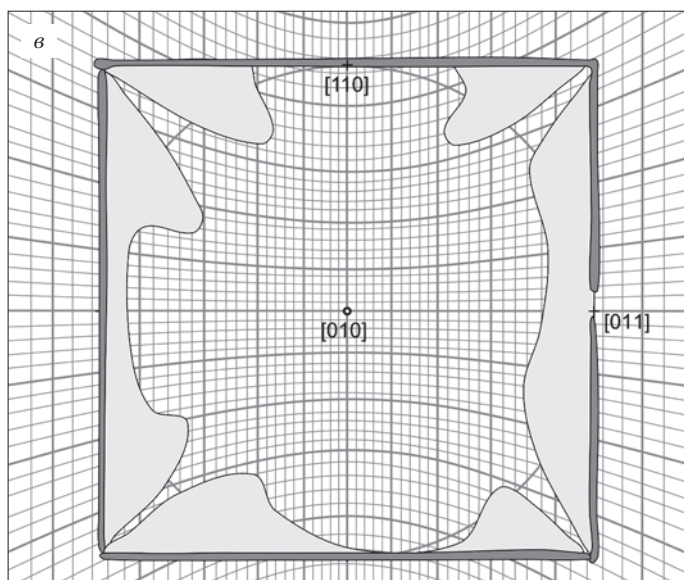


Рис. 5.10. Кристалл Топ-5
из бразильской коллек-
ции:

a, б – фото участков поверхно-
сти; *в* – гномограмма



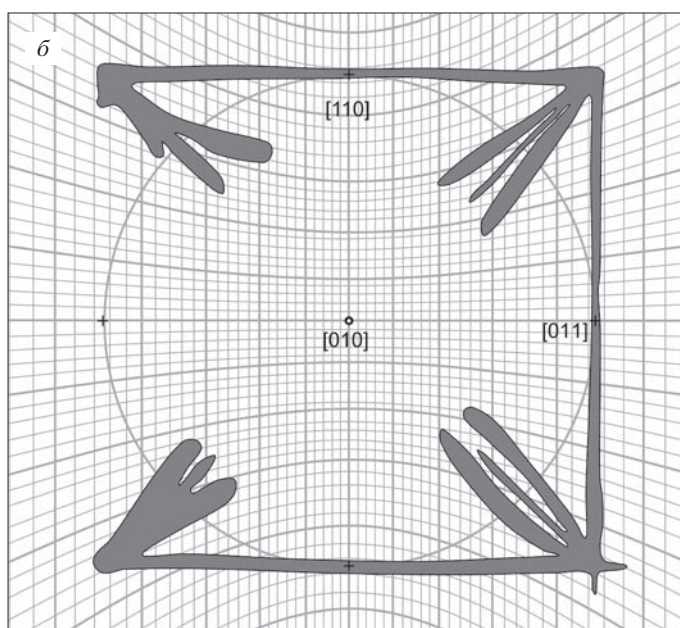
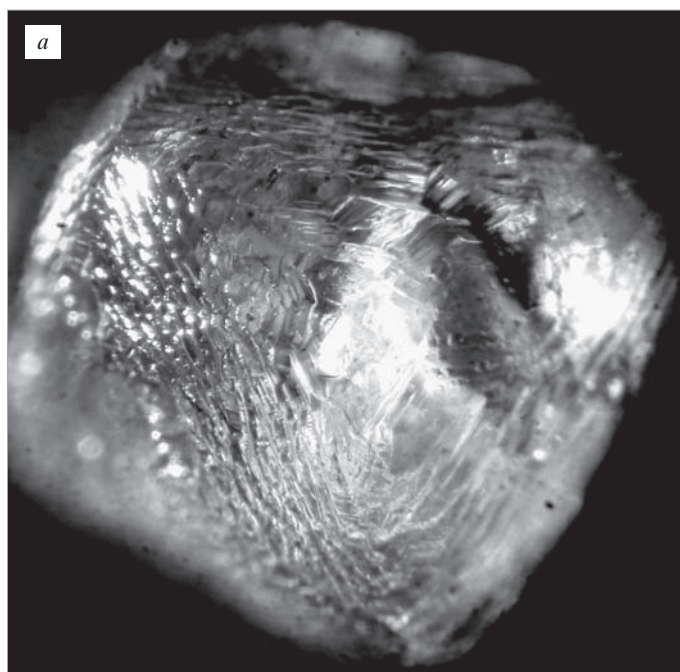


Рис. 5.11. Кристалл MGD19/6-4 (р. Макаубас, штат Минас Жерайс Бразилия) (а) и его полярный комплекс (б)

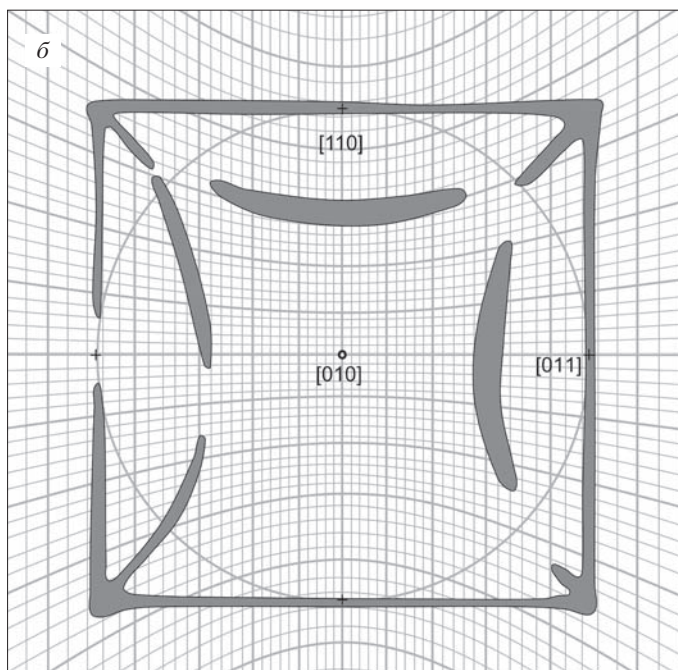
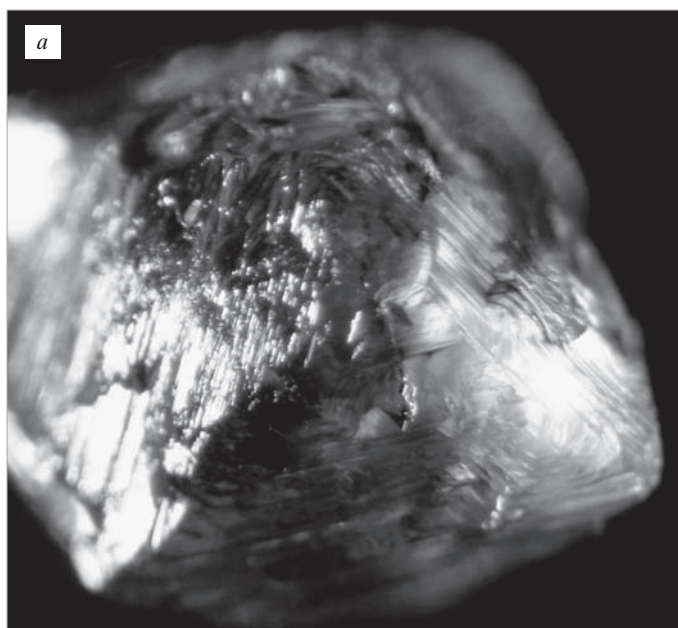


Рис. 5.12. Кристалл MGD19/6-2 (р. Макаубас, штат Минас Жерайс, Бразилия) (а) и его гномограмма (б)

механически наиболее износоустойчивы, обладают наименьшей концентрацией краевых дислокаций и поэтому демонстрируют наиболее гладкую поверхность (см. рис. 5.10, б). Судя по форме рефлекса (см. рис. 5.10, в), травление в данном случае носило смешанный характер – избирательный кинетический режим на тройных осях и «ребрах» гранных швов и полирующий диффузионный режим на остальной поверхности. Заключительный небольшой механический износ создал диффузную картину отражения, но не проявился самостоятельно ни среди физиографических, ни среди полярных признаков. Аналогичные кристаллы замечены нами практически во всех коллекциях Урала, Якутии и Бразилии.

Рассмотрим кристалл MGD19/6-4, который также обладает микроблочным строением поверхности, но на гномограмме проявляет более ярко выраженные признаки смешанного травления (рис. 5.11). На экране гониометра был замечен на пределе обнаружения диффузно рассеянный рефлекс с нечеткими краями, свидетельствующий о предельном хаотическом износе поверхности, предшествовавшем этапу травления. Форма рефлексов травления свидетельствует о смешанном режиме процесса. Прямолинейные участки, располагающиеся по линиям тригонтриоктаэдров и тетрагонтриоктаэдров, указывают на кинетический режим травления, а расщепления световых лучей, напоминающие контурную линию сегмента предельного ударного износа, – на диффузионный режим травления. Кристалл MGD19/6-2 (рис. 5.12), найденный в аллювии р. Макаубас рядом с кристаллом MGD19/6-4, претерпел те же стадии эволюции формы, но уже в явном виде демонстрирует контурную линию предельного ударного износа (см. рис. 5.12, б). Линия конуса точно соответствует следующим параметрам: 22° – угол отклонения оси конуса от ближайшей четверной оси кристалла, 49° – угол образующей (см. главу 4). На поле сегмента ударного износа регистрируется слабый диффузный рассеянный свет. Расширенные линейные рефлексы на гномограммах обоих кристаллов связаны с небольшим завершающим хаотическим износом.

5.3. МОДЕЛЬ ФОРМЫ КИНЕТИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ АЛМАЗА

Обобщая наблюдения за формами травления, отметим, что выпуклая поверхность кинетически контролируемого стационарного и нестационарного травления алмаза (кинетического травления) на гномонической кристаллографической проекции в основном локализуется за пределами главного круга сетки Хилтона, т. е. между дугами условных, ограничивающих конусов, с осями, совпадающими с четверными осями алмаза, и образующей, расположенной под углом 45° к оси конуса (рис. 5.13). Отрицательный рельеф травления в области выхода четверных осей сложен гладкими, но также выпуклыми поверхностями, которые можно аппроксимировать поверхностью эллипсоида II типа. Обобщенная гладкая выпуклая форма кинетического травления алмаза представляет собой поверхность сферы, ограниченной шестью условными конусами, последовательно соприкасающимися друг с другом в точках выхода осей второго порядка. Иначе говоря, модель поверхности травления алмаза в кинетическом режиме представляет собой

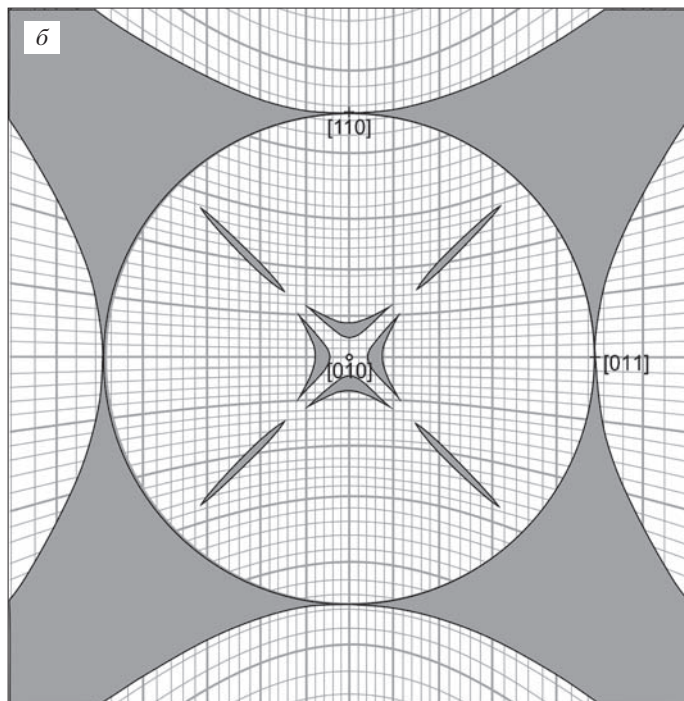
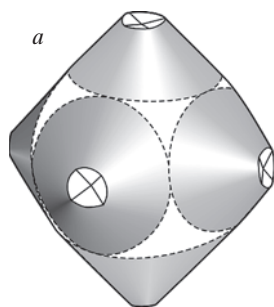


Рис. 5.13. Модельная форма травления кристалла алмаза в кинетическом режиме (а) и гномоническая кристаллографическая проекция ее полярного комплекса (б)

сферу и шесть круговых ограничивающих конусов, вписанных в реберный каркас октаэдра. На вершинах этих конусов размещены пологие пирамиды отрицательного рельефа, грани которых сложены эллипсоидом II типа. Кроме того, поверхность травления алмаза должна включать дополнительно ямки травления, сложенные поверхностями эллиптического цилиндра, ориентированными по линиям тетрагонтриоктаэдра и располагающимися в любой области на поверхности кристалла. Например, на гранях октаэдра это так называемые обратно ориентированные треугольные ямки травления (см. рис. 3.15), на выходах четверных осей – четырехгранные ямки травления другой ориентации, чем представленные на рис. 5.13, а, а на остальной поверхности они проявляются в форме штриховки, ориентированной по направлениям $\langle 110 \rangle$ структуры алмаза. Они не указаны на рис. 5.13, а, но их рефлексы приведены на обобщенной гномограмме рис. 5.13, б диагональными линиями.

На данной модели не показаны поверхности диффузионно-лимитированного травления (диффузионного травления), включая поверхности полирующего травления и поверхности конуса. Поверхности полирующего травления попадают в основном в область главного круга сетки Хилтона, не пересекаются с приведенными на рис. 5.13, б рефлексами и повторяют приближенно форму рефлекса той поверхности, по которой развивается диффузионное травление. Полирующее травление незначительно меняет ориентацию исходной поверхности, часто «подстраиваясь» под нее (см. рис. 5.5, б; 5.9). Поэтому для него нельзя представить характерную форму

поверхности в системе координат структуры алмаза (см. рис. 5.6, б; 5.7, б). Поверхности конуса травления были подробно рассмотрены нами выше, и на гномонической проекции они локализуются достаточно компактно, субпараллельно линиям тригонтриоктаэдра (см. рис. 5.6, б; 5.8, б).

Окрашенные в серый цвет поверхности ограничивающих конусов на рис. 5.13, а завершаются пунктирными линиями, которые указывают на области сопряжения поверхностей, но не являются ребрами. Поверхность одного ограничивающего конуса без излома переходит в другой конус в точках касания либо в поверхность сферы (выделена белым цветом). Стоит обратить внимание на то, что симметрия данного тела строго соответствует симметрии алмаза $m\bar{3}m$, а все три поверхности – ограничивающий конус, сфера и эллипсоид – относятся к поверхностям второго порядка. Сфера представляет собой эллипсоид с тремя равными полуосями. Условный конус служит только для ограничения диапазона углов светового рефлекса. Его поверхность не появляется в формах травления, поскольку рефлекс по линии большого круга сетки Хилтона ни разу не наблюдался. Области поверхности кристалла, занятые на модели (см. рис. 5.13, а) серыми условными конусами, замещаются аксессуориями, сложенными фрагментами поверхностей, «субпараллельных» разрешенным участкам сферы (нормали к граням которых ориентированы в разрешенную область), а также поверхностями эллипсоида II типа и эллиптического цилиндра. Такая поверхность может выглядеть, например, как на рис. 5.3, а. Внешний облик кристалла при этом может быть любым: от классического октаэдроида до додекаэдроида.

Важно отметить, что кинетически протравленный алмаз визуально имеет обычно прихотливо изрезанную поверхность, но при этом, как свидетельствуют гониометрические исследования, обязательно обнаруживается симметрия структуры алмаза. Напомним, что проявление симметрии структуры алмаза в форме поверхности травления (в кинетическом режиме) отмечено А.Е. Ферсманом (1955) при обсуждении результатов исследования алмазных пластинок, протравленных в расплавленной селитре и соде. Им приводятся кристаллографические гномонические проекции рефлексов нескольких протравленных кристаллов, на которых отчетливо видно, что рефлексы группируются только вокруг граней октаэдра в описанной нами «разрешенной» области проекции. Чтобы лучше отобразить их на гномонической проекции, А.Е. Ферсман применяет другую установку кристалла – по оси третьего порядка. При этом сектор вокруг направления L_4 алмаза, в котором редки световые рефлексы от поверхностей кинетического травления алмаза, не упоминается А.Е. Ферсманом отчасти потому, что для изучения травления были использованы спайные пластинки алмаза по $\{111\}$.

Итак, рефлексы от макроскопических участков поверхности кинетического травления всегда попадают в разрешенную область сферы, но, будучи отраженными не от единой гладкой, а от фрагментированной поверхности, они не обладают на гномограмме какой-либо строго определенной формой. Тем не менее симметрия структуры алмаза в них проявляется отчетливо.

В рамках знаний о макроскопическом тензоре устойчивости химических связей на поверхности кристалла обобщенной (предельной) поверхностью

травления с точностью до локальных флуктуаций скорости травления можно считать фрагменты сферы, которая представляет собой характеристическую поверхность тензора устойчивости с тремя равными друг другу компонентами:

$$T_{ij} = \begin{vmatrix} T_1 & 0 & 0 \\ 0 & T_1 & 0 \\ 0 & 0 & T_1 \end{vmatrix}. \quad (5.2)$$

Введенный нами в главе 3 тензор устойчивости является структурной характеристикой поверхности кристалла в диффузионных условиях неравновесного процесса роста или растворения. В случае кинетического режима неравновесного травления тензор (5.2) может рассматриваться как усредненная макроскопическая характеристика поверхности кристалла.

Ориентацию главной системы координат тензора (5.2) относительно кристаллической системы координат установить нельзя. Поэтому пусть системы координат совпадают. Тензор (5.2) обладает избыточной для структуры алмаза симметрией. Естественное понижение симметрии тензора устойчивости происходит с появлением запрещенной области вокруг осей четвертого порядка (поле большого круга на сетке Хилтона).

С учетом приведенного ограничения уравнение характеристической поверхности тензора принимает вид

$$x^2 + y^2 + z^2 = A^2 \text{ при условии, что } |x| \leq A\sqrt{2}, \quad |y| \leq A\sqrt{2}, \quad |z| \leq A\sqrt{2}, \quad (5.3)$$

где $A = 1/\sqrt{T_1}$. Участок сферы (5.3) с указанными ограничениями, взятый в пределах фундаментальной области структуры алмаза, будучи размноженным элементами симметрии группы $m\bar{3}m$ на 48 симметричных фрагментов, создаст сферическую поверхность, выделенную белым цветом на модели рис. 5.13, а. Поверхность (5.3) главным образом сосредоточена вокруг направлений $\langle 111 \rangle$, подходит к точкам выхода векторов $\langle 110 \rangle$ и отсутствует в виде широких сегментов по направлениям $\langle 100 \rangle$. Площадь такой поверхности составляет около 12% от всей площади сферы.

Если бы не существовало ограничения, выраженного неравенствами в (5.3), то симметрия характеристической поверхности тензора была бы наивысшей – предельной ∞/m , а рефлекс непрерывно занимал бы все поле гномонической проекции. Однако этого не наблюдается и, в соответствии с принципом Неймана, симметрия формы алмаза $m\bar{3}m$ не превышает симметрию его физического свойства – симметрию тензора устойчивости поверхности в процессе травления.

Особенностями симметрии грани октаэдра легко объясняется форма рефлексов от выпуклых граней травления, расположенных вокруг октаэдра (см. рис. 5.3, б; 5.4, б). При установке кристалла по тройной оси окружающие грань октаэдра рефлекс располагаются соответствующим образом, демонстрируя симметрию оси третьего порядка.

Аналогичная ситуация теоретически должна реализоваться вокруг F-границ куба. При травлении она проявляется очень редко и преимущественно только на отрицательном рельефе алмаза (см. рис. 5.5). Возможно, что поверхность куба {100} обычно не обнаруживалась нами на формах травления по техническим причинам: настройка гониометра производится по четверной оси кристалла и грань куба ориентируется в слепую зону прибора. Но гексаэдр (куб), а также прилегающую к нему линию тетрагонтриоктаэдров, следуя логике теории периодических цепей сильных связей и отдельным наблюдаемым фактам, необходимо отнести к стационарным формам травления.

Однако поверхность кинетического травления нельзя отождествлять с поверхностью обобщенной сферы. Форма поверхности травления зависит от локальных флуктуаций скорости травления и поэтому может иметь сложный по форме рефлекс на экране гониометра. Важно, что комплекс нормалей к поверхностям травления всегда локализован в ограниченной области телесных углов в разрешенной области сферы, и только на основании этого за обобщенную поверхность травления – предельную форму – можно условно принять сферу как поверхность второго порядка с приведенными угловыми ограничениями (5.3), отражающими влияние структуры алмаза.

Так, сфера травления (5.3) и несколько стационарных плоскогранных простых форм (13 разновидностей S-граней тригонтриоктаэдров, 5 S-граней тетрагонтриоктаэдров, октаэдр, ромбододекаэдр и куб) в совокупности составляют предельные формы травления алмаза в кинетическом режиме, которые дополняют формы растворения алмаза. Формы поверхности, характерные для диффузионно-лимитированного режима травления, нельзя выделить однозначно на гномонической проекции полярного комплекса алмаза, но они главным образом находятся в области, запрещенной для кинетического режима травления и совпадают по месторасположению с формами растворения и механического износа.

Представляется очевидным, что поверхность кристалла в ходе кинетического травления принципиально не может быть гладкой и только выпуклой (положительной), поскольку должна быть ограниченной в основном участками поверхности (5.3). При данном геометрическом ограничении на кристалле при активном травлении неизбежно должны появиться элементы отрицательного рельефа – ямки, бугорки, желобы и другие образования с входящими углами, субграниц которых тем не менее могут быть образованы фрагментами той же поверхности (5.3), линиями цилиндра, включающими плоские S-границ тетрагонтриоктаэдра, гранями куба и «эллипсоида II типа».

Заметим, что формы гексоктаэдроида растворения часто находятся в разрешенной для форм травления области гномонической проекции (см. рис. 3.7). Однако они отличаются строгой формой рефлексов (удлиненная трапеция) на экране гониометра и наличием обязательного ребра между гранями гексоктаэдроида и октаэдра. В отличие от гексоктаэдроида поверхности травления обычно непрерывно смыкаются с гранью октаэдра без образования между ними ребра. Важно отметить также, что округлые

границы гексоктаэдроиды являются переходной формой растворения, встречающейся только при сохранении реликтовых граней октаэдра. Главное, что предельные эллипсоид растворения и сфера травления обычно не пересекаются на гномонической проекции. Естественно, это происходит, если кристалл не подвергается заключительному механическому полирующему износу.

В ходе стационарного процесса кинетического травления для каждой из 19 S-граней алмаза тензор устойчивости в собственной системе координат описывается видом (3.13), но различие между ними будет проявляться при переходе в кристаллографическую систему координат, в которой тензоры будут описываться в виде (3.16), угол α – принимать значения от 0° (для формы $\{110\}$) до $70^\circ 31'$ (форма $\{141\}$). Эти плоскости описываются разными уравнениями, но, исключая формы $\{141\}$, $\{131\}$, $\{121\}$, $\{232\}$, характерные для отрицательного рельефа, все они, имея полярное расстояние, равное A , будут касательными к поверхности (5.3).

Таким образом, травление в кинетическом режиме как разновидность растворения в принципиально неравновесных условиях также можно описать феноменологической теорией тензора устойчивости, принимая за его характеристическую поверхность усредненную поверхность, проявляющуюся при травлении в макроскопическом масштабе наблюдений.

В данной и последующих главах представлены результаты практических исследований природных алмазов, ограниченные только макроскопической кристалломорфологией. Специфика такого подхода обусловлена, с одной стороны, попыткой представить новый экспрессный и относительно дешевый метод анализа формы реальных кристаллов, а с другой – намерением соблюсти права соавторов по серии совместных публикаций и собственников алмазов, предоставивших фактический материал для изучения. В данном исследовании была поставлена цель на примере алмазов конкретных рудопроявлений, месторождений и провинций показать возможности нового кристаллофизического подхода к описанию морфологии неплюскогранных кристаллов и провести сравнительный морфологический анализ алмазов ряда россыпных и коренных месторождений и проявлений, не вдаваясь в их геологические и минералогические особенности.

В предыдущих главах было показано, что основным инструментом для исследования неплюскогранных, округлых и других непростых по форме кристаллов алмазов является параболический гониометр. В теоретическую основу нового метода морфологического анализа кристаллов алмазов положены: оригинальная теория тензора устойчивости химических связей на неравновесной поверхности кристалла; классическая теория прочности кристаллов, примененная к структуре алмаза; кристаллохимическая теория периодических цепей сильных связей, термодинамические и кинетические представления о неравновесных стационарных и нестационарных топохимических реакциях травления поверхности алмаза. В результате стало возможным достаточно полно охарактеризовать последние в истории кристалла алмаза процессы растворения, травления и механической деградации, отразившиеся в его морфологии, проанализировать отдельно степень их воздействия, а также провести статистический анализ параметров поверхностей растворения, отражающих глубинные условия трансформации алмаза.

Важно отметить, что плоскогранные природные кристаллы алмаза – формы роста – претерпевают те же этапы эволюции, но степень воздействия вторичных процессов на форму кристалла обычно незначительна. Тем не менее они также содержат элементы округлых поверхностей и инструментальная морфометрия для них совсем не лишняя.

Естественно, для адекватного минералогического описания кристаллов изучаемого месторождения необходимо иметь представительную выборку, она должна насчитывать достаточное количество кристаллов для проведения всех статистических расчетов (проверки статистических гипотез) как по отдельным морфологическим признакам, так и по их группам, включая ста-

тистический анализ параметров округлых поверхностей. Достаточно полное описание алмазов изучаемого месторождения по комплексу признаков растворения, травления и механического износа, по нашему мнению, возможно при выборке, насчитывающей более сотни кристаллов. Однако чаще выборка бывает исходно ограниченной по причине небольшого количества кристаллов, предоставленных для исследования.

Важным фактором, влияющим на результаты исследования, является предварительный отбор кристаллов, проведенный с учетом разных соображений. Например, удаление из выборки самых крупных, совершенных и высококачественных кристаллов по экономическим мотивам или отбраковка осколков и обломков алмазов как негодных для исследования из-за отсутствия достаточного количества естественных поверхностей способны влиять на среднестатистические характеристики. Отбор происходит и по естественным причинам. Хорошо известно, что россыпные алмазы претерпевают естественный отбор по индивидуальным прочностным свойствам. При этом большую роль играет форма алмаза. Округлые цельные монокристаллы в водных потоках ведут себя иначе, чем осколки и обломки. Существуют также технические ограничения для проведения инструментального анализа формы алмаза. С одной стороны, кристалл должен помещаться в прибор, а с другой, должен быть достаточно крупным для его ориентированного размещения на площадке юстируемого кристаллодержателя. С учетом технических возможностей используемого нами гониометра диапазон диаметра кристаллов от 0,5 до 8 мм. Кроме того, иногда проявляется субъективный фактор, связанный с индивидуальными предпочтениями исследователя.

Описание формы кристалла алмаза традиционно в минералогической практике начинается с визуального определения облика, габитуса, наличия двойников, внешней характеристики поверхностей граней, наличия сколов трещин, борозд, штриховки и др. Производится фотографирование поверхности кристалла под световым микроскопом в одном-двух ракурсах. Иногда для более детального исследования участков поверхности используется сканирующий электронный микроскоп.

Вершиной визуально-морфологического анализа кристалла алмаза традиционно считается отнесение данного кристалла к тому или иному типу алмаза по классификации Ю.Л. Орлова (1963, 1973). Однако в ходе проведенных нами исследований преимущества данной системы классификации не проявились, поскольку часто случалось, что кристаллы разных типов демонстрируют поверхность, модифицированную в сходных физико-химических условиях, и относятся к одному морфологическому классу. Заметим, что задача описания морфологии алмаза и истории последних этапов эволюции его формы, поставленная нами в данной работе, не столь всеобъемлющая, как в системе Ю.Л. Орлова, учитывающей также и анатомию кристаллов. Инструментальный морфологический анализ полярного комплекса нормалей к поверхности кристалла, используемый нами, позволяет получить информацию особого порядка, недоступную при визуально-морфологическом изучении. Поэтому, за редким исключением, мы практически не пользовались классификацией Ю.Л. Орлова.

Исследование полярного комплекса формы кристалла производится путем съемки на параболическом гониометре от одной до шести гномограмм и построения соответствующих гномонических проекций поверхности кристалла. Для полного полярного анализа необходима съемка всех шести проекций, но, как правило, можно ограничиться одной, реже двумя установками кристалла в гониометре и соответственно анализом одной-двух гномограмм. Методика съемки гномограмм на параболическом гониометре описана в главе 2.

В итоге вся морфологическая информация сводится в систему таблиц, с помощью которых можно проводить дальнейшие статистические расчеты.

6.1. ПЕРВАЯ КОЛЛЕКЦИЯ АЛМАЗОВ ВИШЕРСКОГО ТИПА

Первая коллекция изученных нами кристаллов алмаза так называемого вишерского типа (Силаев и др., 2008) из россыпей Вишерского района Пермского края насчитывала 23 кристалла (табл. 6.1). Для всех кристаллов, кроме одного (i-272), получены гномограммы в стандартной кристаллографической установке. На поверхности кристалла-осколка i-272 не были обнаружены внешние элементы симметрии, поэтому его не удалось установить по оси L_4 в гониометре и получить гномограмму. Диаметр кристаллов составляет от 1 до 4,5 мм, поэтому на фото общего вида кристаллов, приведенных ниже, отсутствует масштабная линейка, но в тексте иногда приводятся точные размеры кристалла.

В табл. 6.1 и 6.2 приведены описание алмазов, физиографические и полярные характеристики морфологии кристаллов изученной коллекции. Здесь и далее обломками названы кристаллы, сохранившие, по визуальной оценке, в результате естественного или техногенного механического разрушения более 50% массы, а к осколкам отнесены кристаллы, составляющие менее 50% от первоначальной массы.

К полярным характеристикам кристаллов (см. табл. 6.2), полученным с помощью инструментальных гониометрических исследований, относятся:

- параметры эллипсоида растворения (a_2 , a_3 , α), рассчитываемые по угловым размерам треугольного рефлекса ABC с помощью формул (3.23);
- количество треугольных рефлексов, запечатленных на гномограммах кристалла (колонка 5 табл. 6.2);
- наличие рефлексов от цилиндрической поверхности (колонка 6) и плоских сеток октаэдра (колонка 7) на гномограмме;
- факт совместного сосуществования трех типов рефлексов эллипсоида, цилиндра и октаэдра означает присутствие на кристалле комбинированной формы (колонка 8);
- индексы ударного износа (УИ), пластического течения (ПТ) кристалла и серповидных рефлексов (колонки 9, 10 и 11 соответственно); последний показатель свидетельствует в основном об ударном износе кристаллов, обладающих блочным строением поверхности; наличие хотя бы одного из трех перечисленных признаков указывает на механическую деградацию поверхности алмаза (колонка 12);
- совместное существование граней октаэдра, поверхности цилиндра на алмазе или пирамид регенерации и механической деградации поверхности

Кристаллы первой уральской коллекции

Кристалл	Описание
i-9	Осколок додекаэдроид. Гладкие грани с участками небольшой шероховатости
i-29	Осколок октаэдроид с графитовым (?) и газовым включениями. На поверхности кристалла отмечается графитизация
i-40	Крупный серый додекаэдроид. Похож на кристаллы V разновидности. Серповидный рефлекс
i-41	Крупный додекаэдроид с каверной (место срастания с зерном другого минерала). На поверхности отмечается пленка, а на ребрах она стерта. Наблюдаются ППД
i-49	Осколок неправильной формы. Поверхности регенерации и графитизации. ППД
i-130	Осколок уплощенного додекаэдроид. Приповерхностная графитизация
i-132	Окатанный осколок неправильной формы черного цвета, возможно двойник, но на гномограмме не обнаружен
i-181	Обломок додекаэдроид темного цвета. Гладкие грани
i-191	Осколок алмаза неправильной формы, уплощенный с одной криволинейной гранью. Двойник
i-262	Додекаэдроид с бороздами. Одна сторона протравлена
i-265	Обломок додекаэдроид с регенерированными поверхностями скола
i-272	Осколок неправильной формы желтой окраски. Одна криволинейная грань. Нет элементов симметрии
i-303	Обломок додекаэдроид с регенерированной поверхностью скола и протравленной. Две грани вогнуты
i-324	Осколок серого кристалла с гранулированной шагреневой поверхностью
i-333	Регенерированный октаэдрический обломок
i-343	Осколок додекаэдроид. Штриховка на поверхности раковистого излома
ii-17	Обломок додекаэдроид с присыпкой
ii-64	Обломок двойника додекаэдроид со штриховкой и мелкой шагренью у оси L_4 . «Двуликий Янус»
ii-77	Обломок додекаэдроид с пленками на поверхности и нарушением их целостности
ii-285	Додекаэдроид с белой присыпкой. Двойник
ii-292	«Двуликий Янус», додекаэдроид + октаэдроид с крупными включениями
ii-293	Правильный додекаэдроид со штриховкой и шагренью. Двойник
ii-340	Правильный додекаэдроид с включением ППД

любого типа объективно ограничивает возможности расшифровки генезиса рефлексов октаэдра, поэтому данное сочетание индексов названо нами полигенезом, что означает множественность причин происхождения признака (колонка 13), чем большее значение принимает индекс «полигенеза» для данной совокупности кристаллов, тем более сложную историю имеет поверхность алмазов данной выборки;

Таблица 6.2

Морфологические характеристики алмазов первой уральской коллекции

Кристалл	Эллипсоид				Цилиндр	Октаэдр	Комб. рефл.	УИ	ПТ	Серп. рефл.	Мех. износ	Полигенез	Конус	Травление	Двойник	Шагрь	Штриховка	Регенерация	Сколы	Индукл. грани
	a_2	a_3	α , град	Кол-во рефл-лексов																
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
i-9	1,42	1,81	5,25	2	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0
i-29	–	–	–	–	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0
i-40	–	–	–	–	1	1	0	1	0	1	1	1	0	2	0	0	1	0	0	0
i-41	1,44	1,62	5,88	4	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
i-49	–	–	–	–	1	1	0	1	1	0	1	1	0	2	0	0	1	1	1	1
i-130	–	–	–	–	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0
i-132	–	–	–	–	1	0	0	2	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0
i-181	1,26	1,63	4,50	3	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
i-191	–	–	–	–	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0
i-262	–	–	–	–	1	1	0	2	0	0	1	1	0	2	0	0	0	0	0	1
i-265	1,24	1,85	3,75	2	1	1	1	1	1	0	1	1	0	2	0	0	1	1	1	1
i-272	–	–	–	–	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
i-303	–	–	–	–	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0
i-324	–	–	–	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
i-333	–	–	–	–	1	1	0	2	0	0	1	1	0	2	0	1	0	1	1	0
i-343	–	–	–	–	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0
ii-17	1,46	1,97	5,50	2	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0
ii-64 (2)	–	–	–	–	0	0	0	2	2	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0
ii-77	1,35	1,63	4,88	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
ii-285	1,31	1,86	4,75	2	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0
ii-292	1,22	1,64	5,50	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
ii-293	1,25	1,56	3,88	4	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
ii-340	1,34	1,70	4,88	4	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
В сумме	1,40	1,79	5,45		14	14	3	17	13	2	20	16	2	15	5	8	13	5	16	5
23 кристалла	(0,10)	(0,12)	(0,72)																	
Статистика, %	$k = 0,07$	$k = 0,08$	$k = 0,15$		61	61	13	74	57	9	91	70	9	65	22	35	57	22	70	22

Примечание. Здесь и в подобных таблицах полужирным и фоном выделены особо обсуждаемые данные. Пояснения см. в тексте.

– поверхность конуса, которая может свидетельствовать о травлении кристалла, хаотическом механическом износе алмаза и кратковременной стадии растворения (колонка 14); установление причины формирования конуса зависит от комплекса многих полярных показателей;

– индекс травления алмаза, предполагающий наличие одновременно не менее двух отличительных свойств травления, подробно изложенных в главе 4.

Во многих колонках табл. 6.2, кроме колонок 2–5, 9, 10 и 15, использована двоичная система оценки: нет признака – 0, присутствие признака – 1. При описании механического износа кристалла и травления применяется несимметричная троичная система: нет признака – 0, слабое воздействие (наличие признака) – 1, сильное воздействие – 2.

Физиографические характеристики алмазов устанавливаются по внешнему виду кристаллов, фотографиям и изображениям, полученным с помощью сканирующего электронного микроскопа. К ним относятся:

- наличие мелкой бугорчатой поверхности – шагрени и штриховки (колонки 17 и 18);
- макроскопические проявления регенерационных процессов – занозистый рельеф и наличие граней куба на ограненных аксессуарах (колонка 19);
- наличие поверхностей скола по плоскостям спайности или раковистого излома (20);
- признаки индукционных поверхностей, свидетельствующих о совместном росте нескольких субиндивидов алмаза или контактом воздействию зерна другого минерала (21).

Для физиографических характеристик использована только двоичная система: нет признака – 0, есть признак – 1.

Важной характеристикой для описания морфологии алмаза является его двойникование (колонка 16). Как было показано в главе 2, участки поверхности вблизи двойникового шва на алмазе могут демонстрировать грани лонсдейлита и таким образом вносить дополнительные рефлексy, усложняющие морфологический анализ кристалла. Факт двойникования может быть установлен визуально-морфологически или по гномограмме, если двойниковый шов оказывается в пределах наблюдаемой в гониометре области поверхности алмаза.

Интерпретация генезиса конических поверхностей зависит от наличия других признаков травления, растворения или механического износа. Например, возникновение конуса при развитом травлении алмаза (индекс 2) указывает на единственную общую причину – травление. Отсутствие признаков травления, но появление рефлекса конуса одновременно с рефлексами ударного механического износа позволяют говорить об их общем механическом происхождении. И, наконец, полное отсутствие признаков механического износа и травления, но наличие только граней октаэдра и конуса может быть интерпретировано как результат растворения алмаза – наиболее редкий случай.

Образование ППД алмаза, выходящих на поверхность, однозначно свидетельствует о том, что кристалл подвергался пластическому течению, следовательно, на гномограмме должен наблюдаться рефлекс ПТ. Но это происходит не всегда. Иногда пластическая деформация не приводит к появлению видимых на кристалле плоскостей скольжения структуры. Кроме того, заключительная стадия хаотического механического износа может уничтожить полярные признаки рефлекса ПТ. В некоторых случаях в исследуемую на гониометре область не попадает пластически деформированный участок поверхности кристалла. Таким образом, корреляция данных характеристик не бывает максимальной. Однако полярный признак искажения

треугольного рефлекса, связываемый с результатом пластического течения структуры, отмечается в 2–3 раза чаще, чем наблюдение плоскостей пластической деформации, что вполне закономерно, учитывая чувствительность инструментального гониометрического метода.

Наличие показателя полигенеза (колонка 13) не позволяет однозначно связывать возникновение цилиндрической поверхности и граней октаэдра на алмазе с процессами регенерации, первичного и вторичного растворения или механического износа. В таких случаях возможны разные варианты интерпретации генезиса этих поверхностей. Чаще всего происходит совместное воздействие многих факторов и неопределенность сохраняется.

Приведенные в предпоследней строке табл. 6.2 колонках 2–4 статистические характеристики поверхностей эллипсоида алмазов – это математическое ожидание и в скобках среднеквадратичное отклонение – получены на основании модели логнормального распределения (см. главу 3). В данном случае среднестатистическая форма получена по десяти алмазам, что составляет 43% изученной выборки. В последней строке таблицы указана общая статистика физиографических и полярных характеристик выборки.

Рассмотрим особенности морфологии отдельных кристаллов первой коллекции алмазов Урала.

Кристалл i-40 демонстрирует плоскости октаэдра и поверхности цилиндра (рис. 6.1). Крупные световые рефлексы в положении эллипсоида имеют неправильную форму, что связано с блоковым строением приповерхностных слоев кристалла. На блочность кристалла указывают серповидные рефлексы. Понижение освещенности в центральной части поля эллипсоида и серповидные рефлексы связаны с небольшим механическим хаотическим износом поверхности данного кристалла алмаза. На прошедший интенсивный процесс травления указывают уширения рефлекса у точек октаэдра, дополнительные сателлитные рефлексы вокруг них и диагональные рефлексы цилиндра, связанные с наличием ограненных ямок травления, расположенных на выходах осей четвертого порядка. Как следствие на кристалле отмечается легкая штриховка.

Кристалл i-49. Штриховка на кристалле-осколке связана с индукционными поверхностями, регенерационными процессами и механическими деформациями сжатия, о чем свидетельствуют плоскости пластических деформаций, хотя на световом рефлексе в данном ракурсе кристалла ввиду отсутствия треугольного рефлекса не наблюдаются явные признаки механических деформаций ПТ (рис. 6.2). Расширенные световые рефлексы в положениях граней октаэдра, окружающие их сателлитные рефлексы, сильно искаженная форма рефлексов от граней додекаэдроида, ямки травления по осям L_4 , ограненные поверхностями цилиндра, простирающиеся до плоских сеток $\{232\}$, позволяют квалифицировать процессы травления как развитые и присвоить им индекс 2. Графитизация также, очевидно, связана с преобразованием поверхности алмаза, которое можно квалифицировать как разновидность необратимого процесса растворения – травления. Одновременно регистрируется понижение интенсивности рефлекса в области, приходящейся на центральную часть классического треугольника ABC . Как

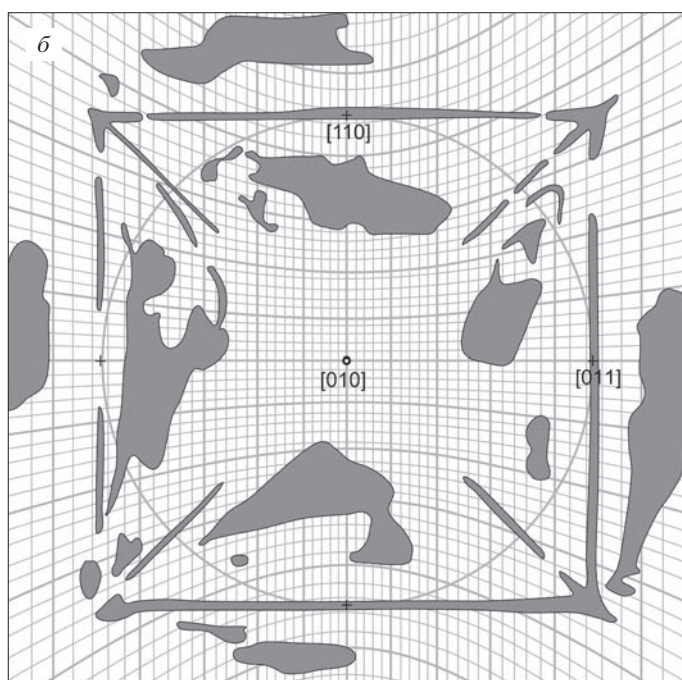
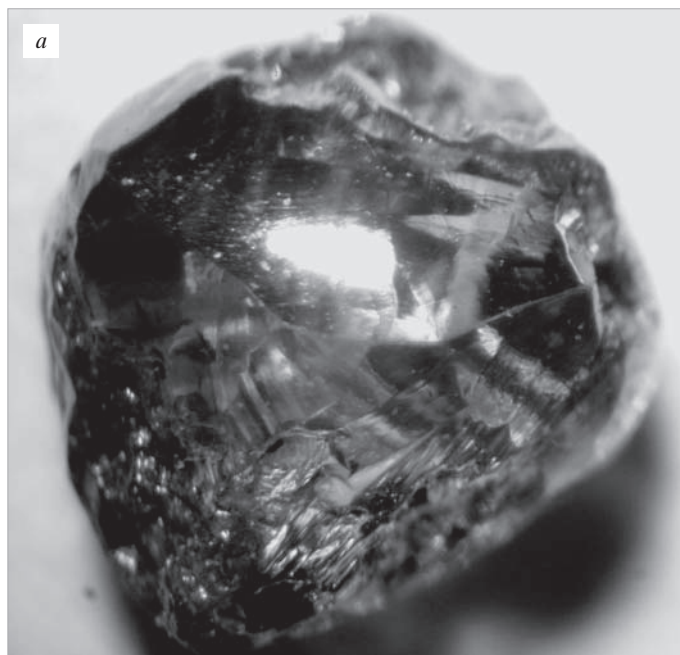


Рис. 6.1. Кристалл i-40 из первой уральской выборки (а) и его гномограмма (б)

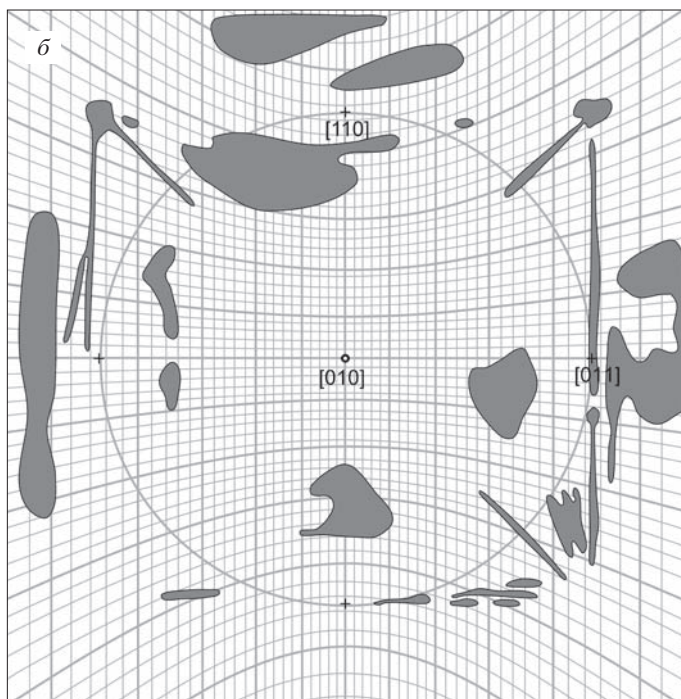


Рис. 6.2. Кристалл i-49 (а) и его полярный комплекс (б)

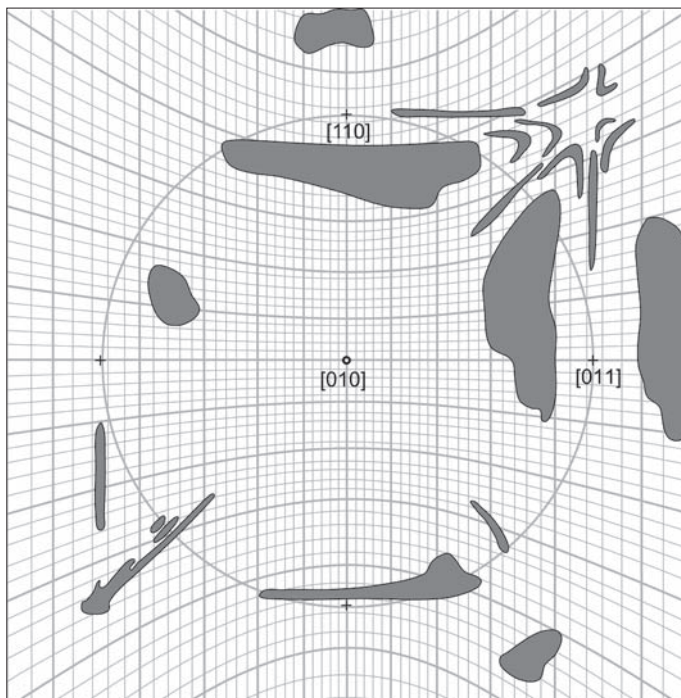


Рис. 6.3. Гномограмма кристалла i-130

было отмечено в главе 4, начало хаотического износа кристалла-додекаэдроид алмаза вызывает расширение треугольного рефлекса эллипсоида и, самое главное, понижение интенсивности света в центральной его части. Последний признак является решающим для вывода о начальной степени ударного износа данного кристалла.

Кристалл i-130 представляет собой осколок с двумя неполными фрагментами относительно гладких граней додекаэдроид. Остальные поверхности обладают неправильной формой. Гномограмма (рис. 6.3) демонстрирует множественные серповидные рефлексы, локализованные вокруг одной из осей L_3 , что указывает на наличие макроступеней на поверхности кристалла, связанных с раковистым изломом на месте выхода данной оси – $[111]$, и небольшом их хаотическом износе (УИ). В данном случае не блоковое строение приповерхностных частей кристалла в целом, а нетехногенный раковистый излом кристалла привел к образованию серповидных рефлексов после заключительного небольшого хаотического ударного износа. На выходе другой оси, L_3 , отмечается расширенный рефлекс октаэдра, который обусловлен травлением. О травлении свидетельствует также физиографический признак графитизации поверхности алмаза. Черные пятна примазок графита размещены случайно по всей поверхности кристалла, но они не дают световых рефлексов в гониометре.

Кристалл i-262. Додекаэдроид с крупными глубокими бороздами, обладает, вероятно, блочным строением, поскольку происхождение борозд свя-

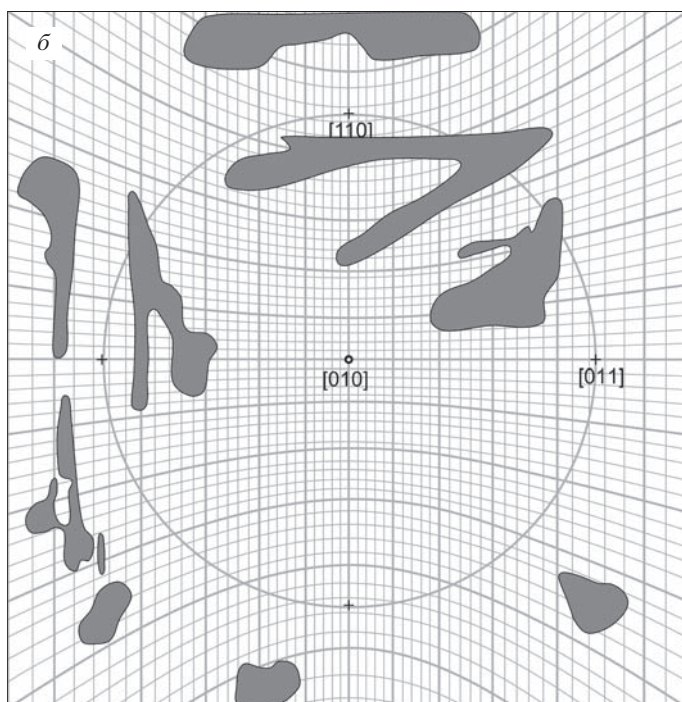


Рис. 6.4. Блочный кристалл алмаза i-262 (а) и его гномограмма (б)

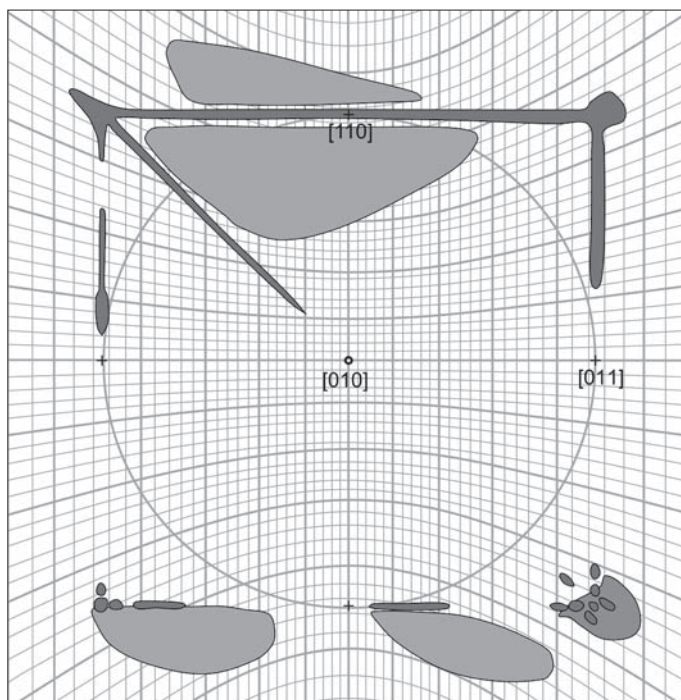


Рис. 6.5. Гномограмма кристалла i-333

зано с процессами травления по границам блоков (рис. 6.4). Тем не менее отчетливых серповидных рефлексов на гномограмме не наблюдается, что связано с крупными размерами блоков и развитым длительным хаотическим износом. На длительность износа указывают заглаженные края борозд на фото кристалла и характерная форма рефлекса ударного износа на гномограмме. Неполный треугольный рефлекс *ABC* связан с несовершенной формой кристалла, его крупными размерами, превышающими область равномерной интенсивности падающего на кристалл луча, и блоковым строением. Полное отсутствие света в центральной части треугольного рефлекса однозначно свидетельствует о длительном хаотическом износе алмаза. Следует отметить, что относительно большие размеры кристалла (диаметр 3,5 мм) и блоковое строение не позволили достичь предельной стадии хаотического износа (см. главу 5). На интенсивные процессы травления, предшествующие хаотическому износу, но не уничтоженные им, указывают кроме глубоких борозд расширенные рефлексы октаэдра и сателлитные рефлексы вблизи одной из граней.

Кристалл i-333 – обломок октаэдровидной формы. На нем замечены пирамиды и бугорки регенерации, округленные в результате ударного износа, а также борозды травления, свидетельствующие о блочном строении кристалла. Гномограмма (рис. 6.5) демонстрирует признаки травления и длительный ударный износ (крупные диффузно рассеивающие свет рефлексы, располагающиеся в поле предельного сегментного рефлекса). Наиболее яркие рефлексы на гномограмме отмечены большей насыщенностью тона и

являются результатом травления. Формы регенерации (октаэдр) замаскированы развитыми поверхностями травления. Поверхности травления, в свою очередь, модифицированы завершающим полирующим хаотическим износом, поэтому стационарные формы травления не встречаются. Однако они ожидаемы с учетом развитого процесса травления.

Кристалл ii-64 обладает необычной морфологией (рис. 6.6). С одной стороны вблизи двойникового шва он демонстрирует развитый хаотический ударный износ (см. рис. 6.6, б), а с противоположной стороны – пластическую деформацию и рефлекс ПТ (рис. 6.6, в). При этом на изображении кристалла вблизи двойникового шва хорошо видны выходы плоскостей пластической деформации и развитые на них пирамиды регенерации (см. рис. 6.6, а, верхняя часть кристалла). По-видимому, шагрень и штриховка на поверхности кристалла связаны с деградацией пирамид регенерации в ходе полирующего износа поверхности.

Кристалл ii-77. Обломок кристалла демонстрирует кажущиеся фигуры травления на одном из участков поверхности додекаэдроида (рис. 6.7), однако на гномограмме оказались запечатленными только правильные треугольные рефлексы эллипсоида *ABC* со слегка сглаженными вершинами. В данном случае «фигуры травления» обусловлены разрушением неорганических пленок на поверхности алмаза толщиной менее 20 мкм. Состав пленок нам неизвестен, но отмечается их высокая механическая прочность. Небольшие признаки травления на гномограмме тем не менее не допускают признания наличия травления для этого алмаза.

Кристалл ii-340. Гладкий додекаэдроид с видимыми полосами пластической деформации (рис. 6.8). Гномограмма закономерно демонстрирует признаки УИ и ПТ, но штриховка на кристалле, часто встречающаяся в случае пластических течений структуры, отсутствует. Однако нет основания считать, что естественная хаотическая механическая обработка кристалла в данном случае полностью уничтожила штриховку на всей поверхности, сохранив при этом ряд ступеней ППД. Возможно, пластические течения структуры алмаза происходили во время растворения, а завершающий механический износ слегка модифицировал поверхность кристалла.

Рассмотрим отдельно формы растворения алмазов данной совокупности. Группа из десяти кристаллов, демонстрирующих хорошо сформированные грани конечной формы растворения – эллипсоида, проанализирована статистически. Параметры обобщенного эллипсоида для данной выборки, согласно логнормальной модели, описываются числами, приведенными в предпоследней строке колонок 2–4 табл. 6.2. В среднем на каждом кристалле использовалось для расчета параметров эллипсоида по 2–3 рефлекса. Поверхности эллипсоида девяти кристаллов, исключая ii-77, модифицированы в небольшой степени механическим износом. Если ударный износ кристалла должен понижать значения параметров a_2 и a_3 обобщенного эллипсоида, то пластическое течение структуры уменьшает эффективно только параметр a_2 , сохраняя другие неизменными.

Тем не менее, сравнивая средние показатели по совокупности с параметрами поверхности кристалла i-77, наиболее полно сохранившего форму растворения, можно сделать вывод о присутствующем, но пренебрежимо

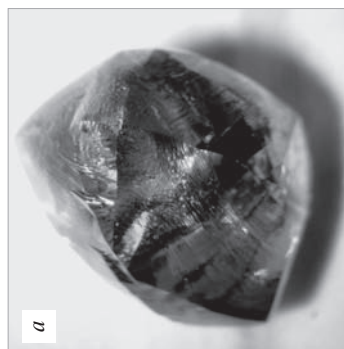
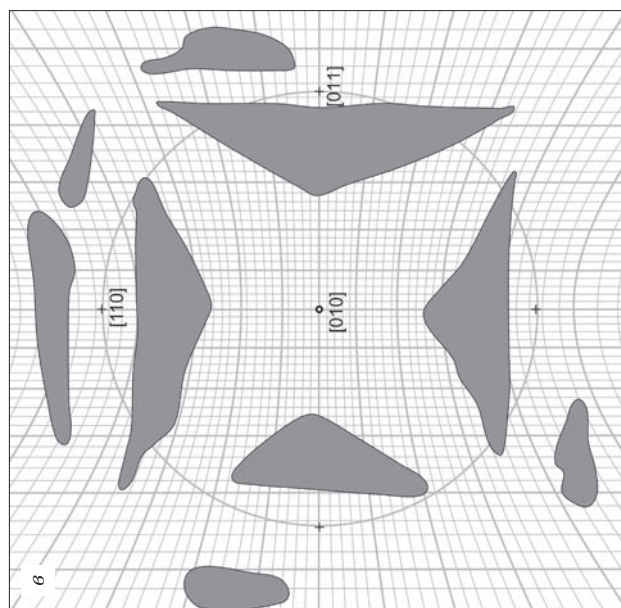
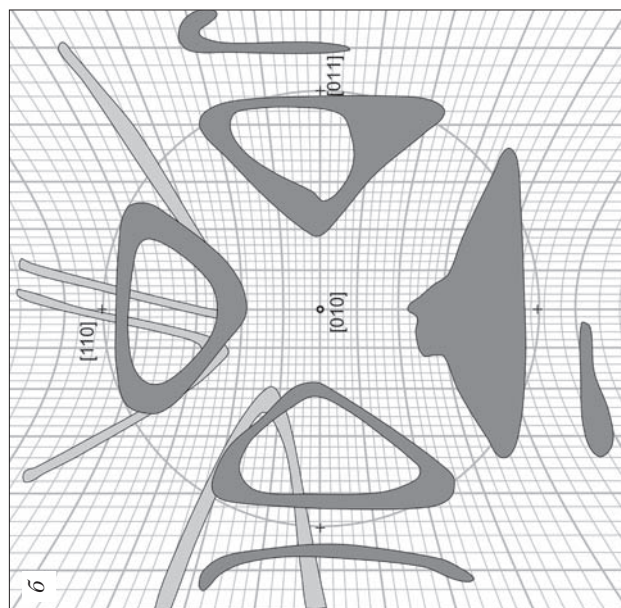


Рис. 6.6. Кристалл-двойник i-64 (а) и две гномограммы (б, в), полученные по разным осям четвертого порядка. На гномограмме б более светлым цветом показаны рефлексы суоциндрида, находящегося в двойниковом положении по отношению к главному субиндивиду, по которому произведена установка кристалла в гониометре



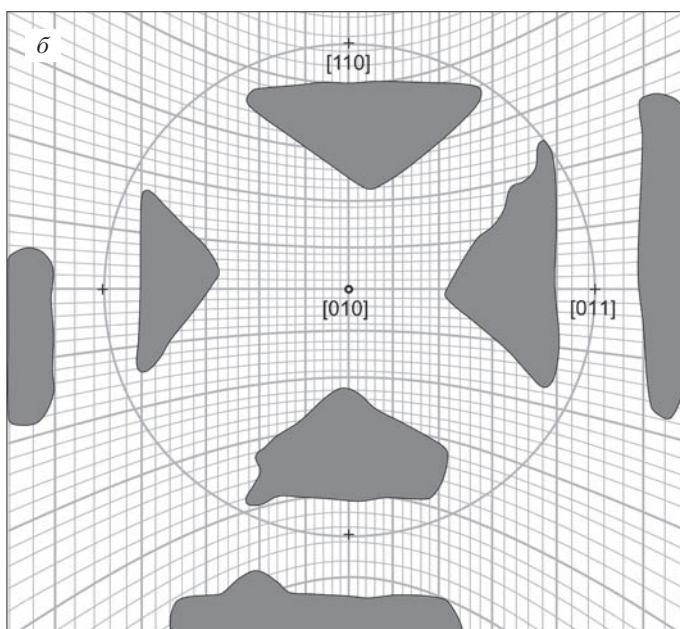
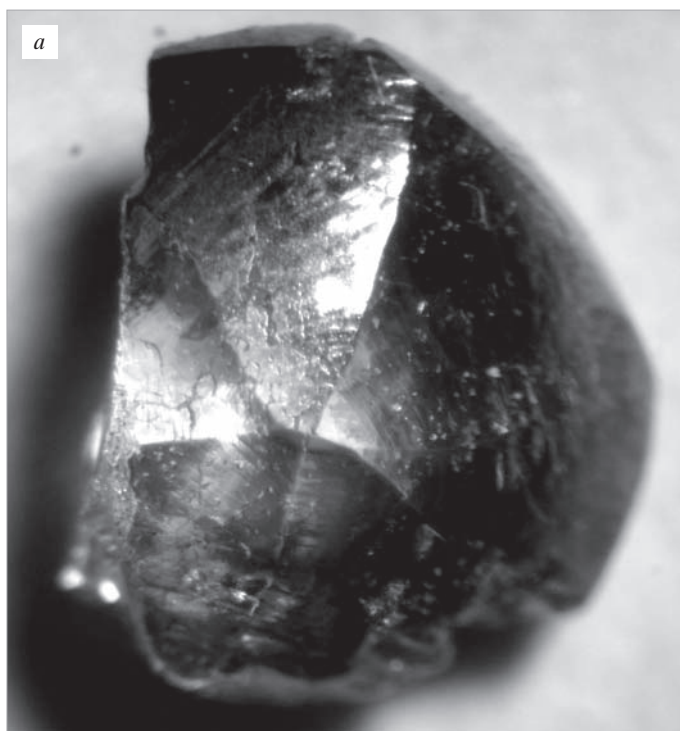


Рис. 6.7. Обломок алмаза-додикаэдрида ii-77 с пленками на поверхности

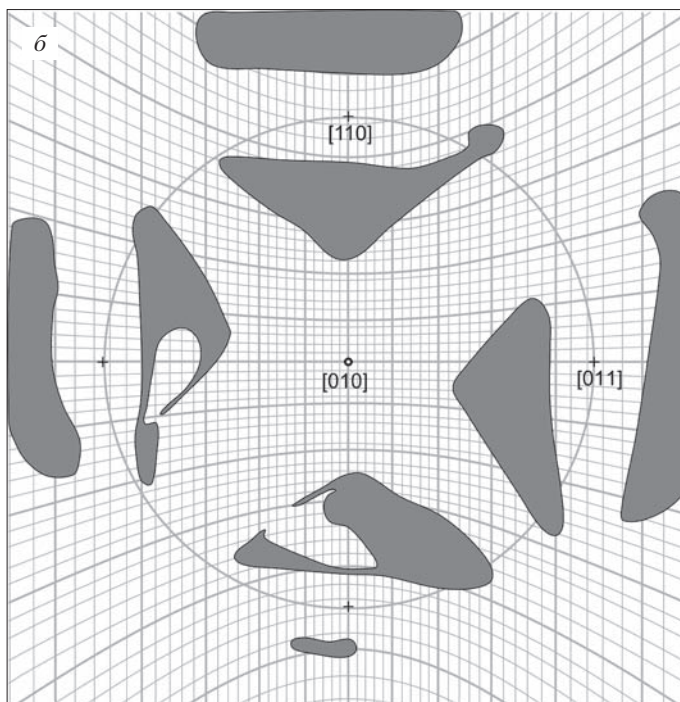
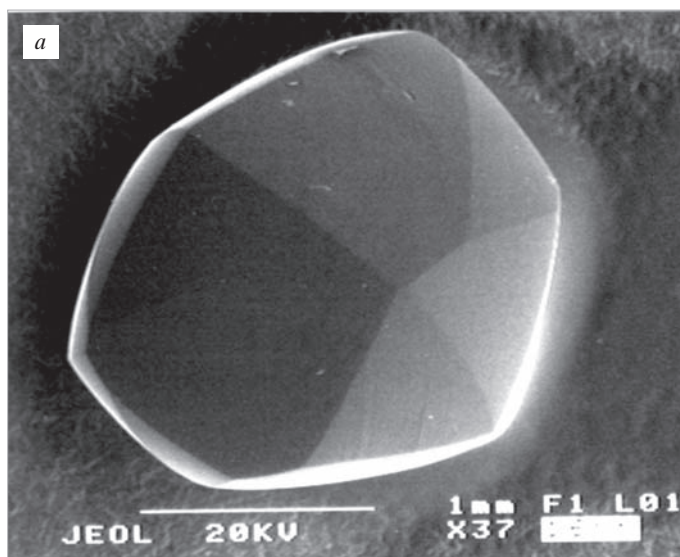


Рис. 6.8. Кристалл ii-340 (*a*) и его гномограмма (*б*)

малом влиянии механического износа на параметры форм растворения отобранных десяти алмазов первой уральской выборки.

В целом первая коллекция уральских алмазов характеризуется практически тотальным, но слабоинтенсивным механическим износом (91%), при этом катастрофические механические разрушения кристаллов (скалывание) наблюдаются в 70% случаев. Хаотический износ (74%) преобладает над пластическими деформациями кристаллов (57%), и он может быть связан не столько с переносом кристаллов, главным образом водными потоками в аллювии, сколько с выносом из области зарождения и роста алмаза на поверхность Земли. Немногим более половины алмазов (65%) несут признаки травления, а 17% кристаллов – интенсивного. Этот важный показатель свидетельствует о нахождении кристаллов определенное время в геологических средах, в которых активно протекали тектонические процессы в присутствии агрессивных для алмаза флюидов, а также, возможно, метаморфические и метасоматические процессы. Малая доля регенерированных кристаллов (22%) свидетельствует о редких случаях возникновения в окружающей алмаз среде восстановительной обстановки после общего этапа квазиравновесного растворения. Природные механические сколы алмазов, в большинстве изученных случаев предшествующих завершающему хаотическому износу, также указывают на активные тектонические процессы. Хотя раскалывание кристаллов в естественных условиях или при добыче также относится к механическим процессам, но техногенные сколы легко определяются визуально и не представляют больших проблем в диагностике. В отличие от них явления квазистатического сжатия, приводящие к пластическому течению кристалла, служат признаком глубинности. В представительной естественной выборке россыпных кристаллов доля блочных, напряженных кристаллов и доля сколов должны, очевидно, находиться в тесной отрицательной корреляции, что обусловлено процессами природной селекции. В данном случае высокий процент сколов свидетельствует о прошедшем естественном отборе кристаллов по показателю дефектности в ходе сложных геологических процессов при формировании месторождений Вишерского района Пермского края.

6.2. ВТОРАЯ КОЛЛЕКЦИЯ АЛМАЗОВ ВИШЕРСКОГО ТИПА

Вторая коллекция уральских алмазов насчитывала 280 кристаллов также из месторождений и проявлений Вишерского района Пермского края.

Описание кристаллов приводится в табл. 6.3, в ней также указана масса алмазов в каратах. В табл. 6.4 сведены морфологические характеристики алмазов данной коллекции. В отличие от первой коллекции во второй хорошо выраженные поверхности растворения – треугольные рефлексy эллипсоида – демонстрируют лишь 27 кристаллов (10%). По ним произведены расчеты среднестатистической формы растворения. В табл. 6.5 отдельно указаны параметры поверхностей этих кристаллов и среднестатистические данные, приближенные логнормальной моделью.

Кристаллы алмазов второй коллекции Урала

Номер кристалла	Масса, кар	Описание
20694	0,08	Комб. форма О+Р. Желоба по ребрам октаэдра. Глубокие ямки травления по L_4
20687	0,04	Сросток, осколок. Гномограммы нет. На одном субиндивиде фрагмент додекаэдроид, у выхода L_3 . Охристые примазки
20681	0,035	Комб. форма О+Р, деформационная штриховка. Неглубокие ямки травления обратнопараллельной ориентации октаэдру
20675	0,14	Неправильный кристалл с индукционными поверхностями
20670	0,11	Неправильный обломок с фрагментами додекаэдроид. Примазки охры, блоковая структура, черные включения
20666	0,39	Крупный миндалевидный додекаэдроид. Блоки, трещины по (111), мелкая шагреня
20665	0,18	Обломок, черные перья включений, блоковая текстура, примазки охры
20664	0,19	Неправильный обломок. Один фрагмент грани додекаэдроид, блоки, примазки
20653	0,06	Правильный додекаэдроид со штриховкой. ППД. Индукционная поверхность
20646	0,17	Додекаэдроид с мелкой шагренью. Следы травления
20632	0,16	Неправильная форма, травление, сколы. Неpravильная установка кристалла
20623	0,015	Осколок додекаэдроид. Коричневатый нацвет
20617	0,02	Коричневый осколок, черные включения. Неpravильная установка
20613	0,03	Осколок додекаэдроид, ППД
20609	0,1	Обломок неpravильный, две грани додекаэдроид, черные включения
20608	0,14	Обломок додекаэдроид, белые примазки по канавам травления, черные включения
20601	0,04	Осколок додекаэдроид, ППД
20599	0,24	Обломок додекаэдроид, ППД, каверны, белые примазки, индукционный контакт
20587	0,04	Плоская чечевица. Примазки графита (?)
20343	0,64	Крупный октаэдроид с желобами по ребрам. Травление по октаэдру
20340	0,755	Крупный треугольной формы чистый алмаз, двойник
20338	0,03	Плоский осколок, выколка по октаэдру, ППД
20336	0,56	Додекаэдроид, борозды, блоки. Охристые примазки. Индукционные поверхности
20332	0,06	Неправильный монокристалл с поверхностями индукции
20330	0,08	Удлиненный додекаэдроид, гладкие грани, сколы, ямки травления
20329	0,07	Уплощенный додекаэдроид, сколы и ямки травления в них
20326	0,02	Октаэдрическая выколка
20325	0,02	Осколок додекаэдроид, индукционные поверхности
20323	0,13	Осколок додекаэдроид, индукционные поверхности, канавки с охристыми примазками
20322	0,19	Осколок с фрагментами двух вогнутых граней, ямка травления по L_4 с плоским дном
20319	0,11	Осколок гладкого додекаэдроид

Номер кристалла	Масса, кар	Описание
20301	0,06	Уплотненный додекаэдрон с индукционными гранями и ямками травления на них
20300	0,05	Осколок с двумя участками граней додекаэдрона
20299	0,49	Правильный додекаэдрон с черными включениями в центре, ППД
20297	0,07	Осколок коричневого додекаэдрона
20296	0,08	Спайный осколок октаэдрической формы. Одна грань додекаэдрона
20295	0,04	Осколок спайный додекаэдрона, гладкие грани, мелкая шероховатость островками
20294	0,11	Осколок с двумя участками гладких граней додекаэдрона
20293	0,17	Правильный додекаэдрон, ямки с охристыми примазками
20292	0,11	Удлиненный додекаэдрон, серый, шагрен, черные перьевидные включения
20291	0,22	Желтоватый додекаэдрон, ППД, мелкая шагрен
20290	0,12	Плоский додекаэдрон, небольшая шагрен с одной стороны и ламинарный рельеф с другой стороны
20266	0,03	Осколок додекаэдрона, ламинарные грани
20265	0,13	Уплотненный додекаэдрон, ППД, мелкая шагрен
20264	0,15	Плоский додекаэдрон с ямками индукционного контакта
20263	0,08	Обломок додекаэдрона с шагреню
20261	0,12	Уплотненный додекаэдрон, ППД, мелкая шагрен
20260	0,09	Плоский гладкий осколок – зуб, сколы
20259	0,06	Осколок додекаэдрона, зеленое пятно пигментации, гномограммы нет, но треугольник эллипсоида намечается с признаками КС
20258	0,03	Плоский додекаэдрон обломок
20257	0,08	Удлиненный додекаэдрон, шагрен, присыпка графита (?)
20256	0,03	Пирамидоподобный додекаэдрон, каверна на поверхности
20255	0,04	Осколок с двумя фрагментами граней додекаэдрона. Гномограммы нет
20254	0,04	Обломок додекаэдрона со штриховкой на гранях, черные перьевидные включения
20253	0,025	Треугольная пластина с ямками травления и штриховкой по грани октаэдра
20252	0,075	Додекаэдрон со штриховкой, три включения
20251	0,05	Уплотненный додекаэдрон-обломок
20250	0,21	Додекаэдрон слегка уплотненный, с гладкими гранями, обломок
20249	0,22	Правильный додекаэдрон со штриховкой, ППД
20538	0,07	Удлиненный коричневый додекаэдрон с шагреню, обломок, ППД
20515	0,09	Коричневый обломок неправильной формы с неровной поверхностью. В центре перьевидные черные включения, гномограммы нет, видны цилиндр и октаэдр, спеклы
20465	0,02	Осколок октаэдрической формы с поверхностями скола
20555	0,05	Уплотненный обломок додекаэдрона коричневого оттенка, ППД, мелкая шероховатость, шагрен
20385	0,07	Обломок коричневого додекаэдрона, ППД, ламели
20359	0,1	Чистой воды додекаэдрон, удлиненный, идеальные грани
20370	0,05	Удлиненный додекаэдрон с ламинарной поверхностью и островками шагрен

Номер кристалла	Масса, кар	Описание
20371	0,09	Додекаэдронд, волнообразная поверхность, штриховка
20372	0,1	Регенерированный обломок додекаэдронда, коричневатый, ППД
20373	0,16	Удлиненный додекаэдронд, каплевидные ламели, диски. Есть включения
20374	0,04	Неспайный осколок додекаэдронда. Гномограммы нет, но есть признаки КС
20378	0,11	Обломок додекаэдронда с мелкими удлиненными ламелями, ППД
20379	0,04	Протравленный и окатанный обломок додекаэдронда с пятном зеленой пигментации
20380	0,17	Уплотненный додекаэдронд, ППД, штриховка и мелкая шагреня
20381	0,08	Гладкий додекаэдронд с уплотненными округлыми бугорками, ППД
20382	0,92	Большой уплотненный додекаэдронд с фигурами травления
20383	0,34	Обломок блокового додекаэдронда, ламели
20384	0,11	Додекаэдронд протравленный с индукционными ямками от мелких кристаллов
20386	0,04	Осколок неправильной формы, ямки травления, ППД. Нет гномограммы
20387	0,11	Осколок, двойник, штриховка
20388	0,025	Плоская выколка из додекаэдронда. Гномограммы нет – рефлексy октаэдра
20389	0,04	Обломок, похожий на октаэдронд, есть «грань» тригонтриоктаэдра
20390	0,06	Додекаэдронд гладкий, легкая шагреня на ряде граней и ППД
20391	0,07	Обломок додекаэдронда с тремя гладкими гранями
20392	0,06	Плоский додекаэдронд с шагренью
20393	0,28	Октаэдрическая выколка, двойник
20394	0,08	Уплотненная чечевица с индукционными поверхностями. Черное включение
20395	0,09	Обломок додекаэдронда, легкая шагреня, грани неполные
20396	0,08	Неправильная форма, регенерация по ППД, коррозия по индукционным поверхностям
20397	0,12	Обломок с индукционными поверхностями. Двойник
20398	0,07	Комб. форма О+Р с кавернами индукционного срастания и ямками травления
20399	0,08	Чистый додекаэдронд с выщербинкой, легкая штриховка
20400	0,13	Додекаэдронд неправильной формы – зуб, каверны, шагреня
20401	1,03	Крупный правильный додекаэдронд с выщербиной и черным включением
20402	0,05	Кристалл, состоящий из индукционных поверхностей, гномограммы нет, черные примазки
20403	0,21	Желтоватый обломок додекаэдронда (половина)
20433	5,15	Крупный гладкий додекаэдронд, слегка удлиненный. Гранные швы – дуги. Множество ударных серповидных трещин у поверхности и трещин по спайности на ребрах
20434	0,03	Осколок додекаэдронда с охристыми примазками
20435	0,03	Осколок додекаэдронда, охристые примазки и свежий скол
20436	0,04	Идеальный додекаэдронд, уплотненный, каверны, черные перьевидные включения
20437	0,04	Удлиненный додекаэдронд с индукционными поверхностями, черные включения, охристые примазки
20438	0,05	Ромбоэдрическая выколка

Номер кристалла	Масса, кар	Описание
20439	0,06	Неправильной формы двойник, индукционные поверхности, охристые примазки
20440	0,05	Осколок клиновидного додекаэдроид с примазками оксидов железа
20441	0,03	Осколок додекаэдроид с примазками и кавернами травления
20442	0,07	Неправильная форма, блоки, примазки, матовая поверхность одной грани
20443	0,09	Уплотненный додекаэдроид, штриховка, травление по индукционной поверхности
20444	0,21	Уплотненный протравленный додекаэдроид
20445	0,05	Осколок додекаэдроид сложной формы, ПДД
20446	0,15	Плоский додекаэдроид, шагренё, ППД, два индукционных контакта с ямками травления
20447	0,08	Уплотненный додекаэдроид с глубоким индукционным контактом с одной стороны и примазками охры в нем, признаки травления
20448	0,14	Додекаэдроид с шагренё, ППД, индукционный контакт, включения черные нитевидные и светлые
20449	0,25	Плоский линзовидный обломок с одной каплевидной бугорчатой поверхностью, додекаэдроид, с другой стороны – индукционная поверхность, ямки травления, шагренё
20450	0,16	Тетрагональный осколок с одним фрагментом поверхности додекаэдроид, гномограммы нет, невысокие каплевидные бугорки, один скол с признаками травления
20451	0,1	Плоский протравленный старый обломок додекаэдроид, рефлексы от субграней ямок травления в необычном месте на гномограмме
20452	0,15	Чистый додекаэдроид с легкой шагренё, штриховка
20453	0,055	Плоский додекаэдроид с большой индукционной впадиной на боку, охристые примазки
20454	0,025	Додекаэдроид с волнисто-ламелярной поверхностью
20455	0,09	Удлиненный додекаэдроид, шагренё, два бугорка регенерации
20456	0,07	Гладкий додекаэдроид, глубокие борозды, охристые присыпки, возможно двойник
20457	0,05	Тетраэдрическая выколка с одной гранью додекаэдроид, нет гномограммы
20458	0,04	Сросток, индивид с волнистой поверхностью, ПДД
20459	0,06	Осколок додекаэдроид с большой ямкой травления по L_4
20461	0,11	Удлиненный додекаэдроид с тонкой штриховкой, ППД
20462	0,05	Додекаэдроид с индукционными поверхностями или ямами травления неправильной формы
20463	0,07	Уплотненный додекаэдроид с шагренё, черные включения, трещины по спайности, ППД
20464	0,035	Осколок неправильной формы, нет гномограммы
20466	0,03	Осколок с октаэдроидным обликом, двойник (?)
20467	0,04	Обломок октаэдроид
20468	0,05	Осколок додекаэдроид с ППД, ламели, двойник
20469	0,03	Треугольный протравленный древний осколок – октаэдроид
20470	0,04	Осколок октаэдроид. Нет гномограммы
20471	0,06	Плоский додекаэдроид, ППД

Номер кристалла	Масса, кар	Описание
20472	0,065	Плоский осколок с канавами и примазками
20474	0,05	Неправильной формы обломок, штриховка
20475	0,02	Протравленный и растворенный осколок додекаэдроиды удлиненной формы
20476	0,13	Плоский осколок додекаэдроиды
20477	0,08	Плоский осколок со старыми и свежими поверхностями скола, черное включение
20478	0,16	Додекаэдроид со штриховкой, ППД, сколы
20479	0,11	Правильный додекаэдроид, небольшая шагреня и ППД
20480	0,13	Правильный додекаэдроид с шагренью, ППД и индукционной каверной
20481	0,095	Уплотненный двойник со штриховкой и плоскими бугорками
20482	0,07	Протравленный обломок, плоский, ламели, индукционная поверхность
со20483	0,26	Додекаэдроид-обломок, ППД, сколы с примазками
20484	0,24	Коричневатый додекаэдроид, обломок, ППД, обломок, мелкая шагреня, штриховка
20485	0,05	Плоский додекаэдроид с мелкой шагренью и ППД
20486	0,2	Додекаэдроид, мелкая шагреня, ППД
20487	0,27	Обломок неправильной формы, травление
20488	0,07	Коричневатый додекаэдроид с ППД, сколы, мелкая шагреня
20490	0,09	Додекаэдроид с кавернами, шагреня
20491	0,55	Октаэдроид с ямками травления
20492	0,16	Додекаэдроид, штриховка, каверны и индукционные поверхности
20493	0,1	Додекаэдроид с ламелями
20494	0,1	Неправильная форма, крупные ламели и пятна травления с матовой поверхностью
20495	0,19	Плоский додекаэдроид-обломок, ППД, на некоторых гранях шагреня
20496	0,12	Додекаэдроид, блоки, штриховка, каверна заполнена примазкой с зерном кварца
20497	0,12	Додекаэдроид-обломок, шагреня, штриховка
20498	0,1	Обломок неправильной формы, виноградная гроздь (сросток?), нет гномограммы
20499	0,08	Плоский додекаэдроид, грани гладкие, зеленое пигментное пятно
20500	0,04	Неспайный обломок додекаэдроиды со штриховкой на некоторых гранях
20501	0,04	Коричневатый додекаэдроид, ППД, штриховка
20502	0,05	Уплотненный октаэдроид с ямками травления
20503	0,04	Похож на кубоид. Гномограммы нет. Видны только точки октаэдра и линии цилиндра
20504	0,06	Правильный додекаэдроид с легкой шагренью и ППД
20505	0,07	Додекаэдроид с крупным черным включением, ППД, отдельные бугорки регенерации
20506	0,07	Обломок с поверхностями травления
20507	0,05	Плоский таблитчатый октаэдроид с одной естественной поверхностью и другой спайной выколкой
20508	0,03	Коричневатый додекаэдроид с шагренью и ламелями, одна система ППД!
20509	0,13	Уплотненный додекаэдроид с бугорками регенерации, ППД, каверны

Номер кристалла	Масса, кар	Описание
20510	0,11	Плоский обломок додекаэдроид с зональной штриховкой и ППД, легкая шагрень
20511	0,07	Неправильная форма, индукционные грани, нет ни одной свободной поверхности
20512	0,14	Додекаэдроид с крупной каверной, заполненной зернами минералов
20514	0,19	Коричневатый додекаэдроид с ППД и мелкой шероховатостью
20516	0,03	Додекаэдроид с налетом (пленка или травление?)
20517	0,09	Гладкая окатанная неправильная форма
20518	0,15	Неправильная форма, сколы, двойник?
20519	0,11	Обломок додекаэдроид, штриховка
20520	0,09	Обломок додекаэдроид с крупной индукционной поверхностью, штриховка
20522	0,03	Тетраэдрическая выколка с одной естественной поверхностью додекаэдроид
20523	0,03	Осколок додекаэдроид с ламелями
20525	0,04	Осколок, раковистый излом, шагрень
20527	0,04	Осколок, штриховка
20529	0,48	Додекаэдроид с глубокими канавами, ППД, буграми регенерации по половсам ПД
20530	0,24	Додекаэдроид с ламелями
20531	0,19	Плоский гладкий додекаэдроид?
20532	0,11	Обломок неправильной формы, есть грани додекаэдроид, перьевидные включения, выходящие на поверхность, травление
20533	0,09	Уплотненный додекаэдроид с ямкой травления по L_4 , износ, травление (?)
20534	0,06	Осколок додекаэдроид с поверхностями травления
20536	0,04	Осколок додекаэдроид, два фрагмента граней, гномограммы нет
20537	0,06	Плоский додекаэдроид, ППД, шагрень
20539	0,05	Плоский осколок с поверхностью куба! Штриховка
20540	0,06	Уплотненный додекаэдроид, на поверхностях скола ямки травления
20541	0,04	Осколок додекаэдроид, спайная выколка
20542	0,07	Осколок с неправильной поверхностью
20543	0,035	Обломок додекаэдроид с блоковой структурой поверхности
20544	0,035	Регенерированный осколок с черными включениями и примазками на поверхности
20545	0,04	Додекаэдроид со штриховкой и индукционной поверхностью. Двойник
20546	0,1	Осколок протравленного додекаэдроид
20547	0,07	Октаэдроид с грубой штриховкой по ребрам
20548	0,55	Обломок додекаэдроид с шагренью
20549	0,17	Блоковый додекаэдроид с неровными поверхности, ямами травления и присыпкой
20550	0,11	Неправильная форма, индукционная поверхность и шагрень
20551	0,21	Додекаэдроид со штриховкой, ППД и травлением
20552	0,19	Блочный додекаэдроид, обломок, травление
20553	0,06	Неправильной формы, протравленный, темный кристалл с присыпкой
20554	0,06	Октаэдроид, обломок, травление. «Двуликий Янус»
20556	0,03	Осколок додекаэдроид с поверхностями травления

Номер кристалла	Масса, кар	Описание
20557	0,08	Октаэдроксид протравленный
20558	0,08	Обломок додекаэдроидов, ламели, дугообразная штриховка на них, индукционные поверхности и приповерхностные включения
20559	0,07	Осколок додекаэдроидов, штриховка, ППД
20560	0,12	Додекаэдроксид, ППД, легкая шагреня
20562	0,1	Додекаэдроксид, обломок с присыпкой, шагреня
20565	0,03	Осколок додекаэдроидов со штриховкой и травлением
20567	0,16	Додекаэдроксид с каверной, ППД, блоки и шагреня
20568	0,13	Обломок додекаэдроидов с ППД и штриховкой
20569	0,04	Осколок додекаэдроидов с шагренью
20570	0,07	Обломок додекаэдроидов, ППД, округлые бугорки регенерации местами
20572	0,21	Обломок алмаза с фигурами травления на всех поверхностях
20581	0,14	Осколок додекаэдроидов, блоки и штриховка, травление
20582	0,06	Осколок додекаэдроидов с бугорками регенерации и ППД
20584	0,11	Обломок неправильной формы с несколькими гранями додекаэдроидов, штриховка, травление
20586	0,02	Удлиненный додекаэдроксид с зональностью и бугорками регенерации
20589	0,06	Уплотненный по L_3 додекаэдроксид с шагреневым рельефом
20590	0,08	Грушевидный алмаз (V разновидность), ламели, ямы травления и присыпка
20591	0,04	Уплотненный додекаэдроксид, ППД
20592	0,04	Обломок неправильной формы
20595	0,06	Удлиненный додекаэдроксид, борозды, ламели, штриховка, шагреня, травление
20596	0,03	Осколок додекаэдроидов с ламелярной поверхностью
20597	0,05	Осколок додекаэдроидов с шагренью
20598	0,07	Уплотненный додекаэдроксид с ППД и штриховкой
20600	0,15	Ромбоэдрическая выколка с фигурами травления
20602	0,02	Осколок додекаэдроидов с шагренью, ППД и фигурами травления
20603	0,22	Обломок додекаэдроидов с фигурами травления, матовой поверхностью на сколе
20604	0,14	«Двуликий Янус», блочный О+Д, на додекаэдроксиде штриховка, на октаэдроксиде ямки травления
20606	0,025	Осколок додекаэдроидов с ППД и шагренью
20611	0,05	Осколок додекаэдроидов, ППД, ламели
20612	0,04	Обломок с ямками травления
20614	0,02	Осколок додекаэдроидов, ламели, редкие бугорки на гладкой поверхности
20615	0,03	Коричневатый осколок додекаэдроидов, ППД, шагреня
20616	0,03	Осколок октаэдроидов с индукционными поверхностями и ямками травления
20619	0,05	Осколок серого цвета, одна поверхность додекаэдроидов. Гномограммы нет
20621	0,03	Октаэдрическая выколка, нет ни одной естественной грани. Гномограммы нет
20622	0,05	Осколок, две грани додекаэдроидов, бугорки регенерации, шагреня. Гномограммы нет
20626	0,06	Осколок додекаэдроидов, шагреня
20630	0,11	Обломок додекаэдроидов с ламелярной поверхностью. Редкая шероховатость, не на всех гранях признаки травления

Номер кристалла	Масса, кар	Описание
20633	0,14	Додекаэдройд, включение алмаз в алмазе, аксессуары регенерации
20635	0,07	Додекаэдройд с грубой шагренью и большим черным включением
20636	0,03	Неправильный додекаэдройд с гладкими ламеллярными гранями, двойник?
20638	0,06	Уплотненный додекаэдройд, сеть мелких трещин. Травление
20639	0,03	Осколок додекаэдроида желтый, шагрень, штриховка
20640	0,08	Уплотненный обломок с вогнутыми поверхностями! Крупные ламели
20641	0,19	Уплотненный додекаэдройд с канавкой, штриховкой, аксессуарами регенерации
20643	0,095	Неправильная форма, штриховка, ламели, ямки травления
20644	0,14	Неправильная форма, обломок с индукционными гранями, ламели
20647	0,05	Тетраэдрический осколок, одна естественная грань, ямки травления, нет гномограммы
20649	0,08	Уплотненный додекаэдройд с бугорками регенерации, черное включение, ППД
20650	0,17	Обломок додекаэдроида, множество черных включений, штриховка, регенерация
20652	0,13	Обломок уплотненного додекаэдроида, индукционная поверхность, травление, ППД
20654	0,07	Уплотненный додекаэдройд, канавки, ламели, штриховка
20658	0,11	Осколок с протравленной поверхностью скола, двойник
20660	0,09	Ламеллярный додекаэдройд с канавками и протравленными индукционными поверхностями
20661	0,11	Удлиненный додекаэдройд-зуб с ППД, штриховкой и шагренью. Обломок, трещины в теле кристалла
20662	0,1	Желтый обломок додекаэдроида с ППД и шагренью по линиям ППД, канавки, черные включения
20668	0,11	Гладкий додекаэдройд с шагренью, каверной с одной стороны
20669	0,16	Додекаэдройд с ППД и шагренью, трещины, примазки охристые
20673	0,1	Уплотненный додекаэдройд со штриховкой
20676	0,17	Обломок додекаэдроида, ППД, шагрень
20677	0,07	Плоский додекаэдройд с крупными индукционными кавернами, ламели
20679	0,08	Осколок с индукционными поверхностями
20680	0,08	Неправильный додекаэдройд, тонкая штриховка
20684	0,08	Кубоид?, обломок, травление
20685	0,04	Протравленный осколок додекаэдроида
20686	0,02	Осколок додекаэдроида с бугорками регенерации
20688	0,04	Осколок с индукционными поверхностями
20690	0,06	Осколок додекаэдроида, мелкие округлые бугорки регенерации
20692	0,06	Осколок додекаэдроида с аксессуарами регенерации
20695	0,04	Осколок, протравленный и окатанный
20696	0,09	Додекаэдройд, ППД, штриховка. Двойник?
20697	0,02	Осколок, неправильный и протравленный
20699	0,04	Неправильный кристалл-кубоид? Канавки и индукционные поверхности
20700	0,05	Осколок, ППД, шагрень

Таблица 6.4

Характеристики поверхностей алмазов второй уральской коллекции

№ п.п.	Номер кристалла	Цилиндр	Октаэдр	Комб. рефл.	УИ	ПТ	Серп. рефл.	Мех. износ	Полигенез	Конус	Травление	Двойники	Шагрь	Штриховка	Регенерация	Сколы	Индукт. грани
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	20694	1	1	0	1	1	0	1	1	1	2	0	0	1	0	0	0
2	20687	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
3	20681	1	1	0	0	1	0	1	1	1	2	0	0	1	0	0	0
4	20675	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1
5	20670	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
6	20666	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0
7	20665	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
8	20664	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
9	20653	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1
10	20646	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
11	20632	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
12	20623	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
13	20617	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0
14	20613	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
15	20609	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0
16	20608	0	1	0	2	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
17	20601	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
18	20599	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1
19	20587	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0
20	20343	1	1	0	1	1	0	1	1	0	2	0	1	1	0	0	0
21	20340	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0
22	20338	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
23	20336	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1
24	20332	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1
25	20330	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0
26	20329	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0
27	20326	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0
28	20325	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1
29	20323	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1
30	20322	1	1	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	1	1	0
31	20319	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
32	20301	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1
33	20300	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
34	20299	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
35	20297	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0
36	20296	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0
37	20295	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0
38	20294	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
39	20293	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
40	20292	0	0	0	2	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
41	20291	0	0	0	2	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0

№ п.п.	Номер кристалла	Цилиндр	Октаэдр	Комб. рефл.	УИ	ПТ	Серп. рефл.	Мех. износ	Полигенез	Конус	Травление	Двойники	Шагрень	Штриховка	Регенерация	Сколы	Индукц. границ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
42	20290	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0
43	20266	1	1	0	1	2	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0
44	20265	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0
45	20264	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1
46	20263	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
47	20261	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0
48	20260	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0
49	20259	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0
50	20258	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0
51	20257	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0
52	20256	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
53	20255	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
54	20254	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0
55	20253	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0
56	20252	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
57	20251	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0
58	20250	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0
59	20249	0	1	0	1	2	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
60	20538	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0
61	20515	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
62	20465	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
63	20555	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0
64	20385	1	1	0	1	1	0	1	1	0	2	0	1	1	0	1	0
65	20359	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
66	20370	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
67	20371	1	1	0	0	0	0	1	1	0	2	0	1	1	0	0	0
68	20372	1	1	0	1	1	0	1	1	0	2	0	1	1	1	1	0
69	20373	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
70	20374	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
71	20378	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0
72	20379	0	1	0	1	0	0	1	1	0	2	0	1	0	1	0	0
73	20380	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
74	20381	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
75	20382	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
76	20383	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0
77	20384	1	1	0	1	0	0	1	1	0	2	0	0	1	0	0	1
78	20386	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
79	20387	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0
80	20388	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
81	20389	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0
82	20390	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
83	20391	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0

№ п.п.	Номер кристалла	Цилиндр	Октаэдр	Комб. рефл.	УИ	ПТ	Серп. рефл.	Мех. износ	Полигенез	Конус	Травление	Двойники	Шагрень	Штриховка	Регенерация	Сколы	Индукц. грани
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
84	20392	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
85	20393	1	1	0	0	0	0	0	1	0	2	1	0	1	0	1	1
86	20394	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1
87	20395	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
88	20396	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1
89	20397	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1
90	20398	1	1	0	1	2	0	1	1	1	2	0	0	0	0	0	1
91	20399	0	1	0	0	2	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0
92	20400	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1
93	20401	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
94	20402	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
95	20403	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0
96	20433	0	0	0	1	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
97	20434	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
98	20435	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0
99	20436	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
100	20437	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1
101	20438	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0
102	20439	1	1	0	1	1	1	1	1	0	2	1	0	0	0	0	1
103	20440	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0
104	20441	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
105	20442	1	1	0	0	0	0	0	1	0	2	0	1	1	0	0	1
106	20443	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1
107	20444	1	1	0	2	2	0	1	1	0	2	0	1	1	0	0	0
108	20445	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
109	20446	1	1	0	2	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1
110	20447	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1
111	20448	0	0	0	2	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1
112	20449	1	1	0	2	1	1	1	1	0	2	0	1	1	0	1	1
113	20450	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
114	20451	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1
115	20452	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
116	20453	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1
117	20454	0	0	0	0	2	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0
118	20455	0	0	0	1	2	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0
119	20456	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1
120	20457	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	1	0
121	20458	1	1	0	0	2	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1
122	20459	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1
123	20461	0	0	0	1	2	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
124	20462	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1
125	20463	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0

№ п.п.	Номер кристалла	Цилиндр	Октаэдр	Комб. рефл.	УИ	ПТ	Серп. рефл.	Мех. износ	Полигенез	Конус	Травление	Двойники	Шагрень	Штриховка	Регенерация	Сколы	Индукц. грани
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
126	20464	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0
127	20466	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0
128	20467	1	1	0	1	0	0	1	1	0	2	0	1	1	1	1	1
129	20468	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0
130	20469	1	1	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	1	0
131	20470	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
132	20471	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
133	20472	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0
134	20474	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0
135	20475	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
136	20476	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1
137	20477	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1
138	20478	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
139	20479	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
140	20480	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1
141	20481	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0
142	20482	1	1	0	1	1	1	1	1	0	2	1	0	1	0	0	0
143	20483	1	1	0	1	2	0	1	1	0	2	0	1	1	0	1	0
144	20484	1	1	0	2	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
145	20485	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0
146	20486	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
147	20487	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0
148	20488	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0
149	20490	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
150	20491	1	1	0	1	1	1	1	1	1	2	0	0	1	0	0	0
151	20492	1	1	0	1	2	1	1	1	1	2	0	1	1	0	0	1
152	20493	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
153	20494	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0
154	20495	1	1	0	0	2	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0
155	20496	1	1	0	2	1	0	1	1	1	2	0	0	1	0	0	0
156	20497	1	1	0	1	2	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
157	20498	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
158	20499	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
159	20500	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
160	20501	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
161	20502	1	1	0	1	2	0	1	1	0	2	0	0	0	0	0	0
162	20503	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1
163	20504	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
164	20505	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0
165	20506	1	1	0	0	0	1	1	1	0	2	0	1	1	0	1	0
166	20507	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0
167	20508	1	1	0	2	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0

№ п.п.	Номер кристалла	Цилиндр	Октаэдр	Комб. рефл.	УИ	ПТ	Серп. рефл.	Мех. износ	Полигенез	Конус	Травление	Двойники	Шагрень	Штриховка	Регенерация	Сколы	Индукц. грани
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
168	20509	0	1	0	1	2	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0
169	20510	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0
170	20511	1	1	0	1	0	1	1	1	0	2	0	0	1	0	0	1
171	20512	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1
172	20514	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
173	20516	1	0	0	1	2	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
174	20517	1	0	0	2	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
175	20518	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1
176	20519	1	1	0	1	2	1	1	1	1	2	0	0	1	0	1	0
177	20520	1	1	0	1	0	0	1	1	0	2	0	1	1	0	0	0
178	20522	1	1	0	0	1	1	1	1	0	2	0	0	1	0	1	0
179	20523	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0
180	20525	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0
181	20527	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0
182	20529	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0
183	20530	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1
184	20531	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0
185	20532	1	1	0	1	1	1	1	1	0	2	0	1	0	0	1	0
186	20533	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
187	20534	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0
188	20536	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
189	20537	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0
190	20539	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0
191	20540	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
192	20541	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0
193	20542	1	1	0	0	0	0	0	1	0	2	0	1	0	0	1	0
194	20543	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
195	20544	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
196	20545	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
197	20546	1	1	0	1	1	1	1	1	0	2	0	0	1	0	0	0
198	20547	1	1	0	0	0	1	1	1	1	2	0	0	1	0	1	0
199	20548	1	1	0	1	0	1	1	1	0	2	0	1	1	0	1	0
200	20549	1	1	0	1	0	0	1	1	1	2	0	0	1	0	1	0
201	20550	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1
202	20551	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0
203	20552	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0
204	20553	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0
205	20554	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0
206	20556	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
207	20557	1	1	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	1	0	1	0
208	20558	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1
209	20559	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0

№ п.п.	Номер кристалла	Цилиндр	Октаэдр	Комб. рефл.	УИ	ПТ	Серп. рефл.	Мех. износ	Полигенез	Конус	Травление	Двойники	Шагрень	Штриховка	Регенерация	Сколы	Индукц. грани
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
210	20560	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
211	20562	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0
212	20565	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0
213	20567	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1
214	20568	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0
215	20569	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0
216	20570	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0
217	20572	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
218	20581	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0
219	20582	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
220	20584	1	1	0	1	1	1	1	1	0	2	0	0	0	0	1	1
221	20586	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0
222	20589	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
223	20590	1	1	0	1	2	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0
224	20591	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
225	20592	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
226	20595	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
227	20596	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
228	20597	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
229	20598	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
230	20600	1	1	0	1	0	1	1	1	0	2	0	0	1	0	1	0
231	20602	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
232	20603	1	1	0	2	1	0	1	1	0	2	0	1	1	0	1	0
233	20604	1	1	0	1	0	1	1	1	1	2	0	0	1	0	0	0
234	20606	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
235	20611	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0
236	20612	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
237	20614	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
238	20615	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0
239	20616	1	1	0	1	0	1	1	1	0	2	0	0	0	1	1	1
240	20619	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
241	20621	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
242	20622	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
243	20626	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
244	20630	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
245	20633	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0
246	20635	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
247	20636	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0
248	20638	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
249	20639	1	1	0	2	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0
250	20640	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
251	20641	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0

№ п.п.	Номер кристалла	Цилиндр	Октаэдр	Комб. рефл.	УИ	ПТ	Серп. рефл.	Мех. износ	Полигенез	Конус	Травление	Двойники	Шагрень	Штриховка	Регенерация	Сколы	Индукц. грани
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
252	20643	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0
253	20644	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1
254	20647	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0
255	20649	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
256	20650	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0
257	20652	1	1	0	1	1	0	1	1	0	2	0	1	1	0	1	1
258	20654	0	0	0	2	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0
259	20658	1	1	0	0	0	0	0	1	0	2	1	0	1	0	1	0
260	20660	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1
261	20661	0	1	0	2	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0
262	20662	1	1	0	2	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0
263	20668	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0
264	20669	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0
265	20673	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0
266	20676	0	0	0	2	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0
267	20677	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1
268	20679	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1
269	20680	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
270	20684	1	1	0	2	0	1	1	1	0	2	0	1	0	0	1	0
271	20685	1	1	0	1	0	0	1	1	1	2	0	0	1	0	1	0
272	20686	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0
273	20688	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1
274	20690	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
275	20692	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
276	20695	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0
277	20696	1	1	0	1	2	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0
278	20697	1	1	0	1	0	0	1	1	0	2	0	0	0	0	1	0
279	20699	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0
280	20700	0	0	0	2	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0
	Σ	180	180	10	198	182	37	231	197	26	188	11	169	201	22	167	57
	Σ, %	69	69	4	76	69	14	88	75	8	72	4	60	72	8	60	20

В основном кристаллы второй коллекции демонстрируют сложный рельеф поверхности. Этот вывод можно сделать и физиографически по изображениям кристаллов. Однако полярный комплекс признаков позволяет раскрыть особенности формирования рельефа поверхности алмазов. Прежде всего отметим, что для 18 кристаллов не удалось получить гномоническую проекцию в правильной кристаллографической установке по оси симметрии алмаза L_4 по причине особенно сложной формы, большого числа сколов и др.

Параметры формы растворения кристаллов

Номер строки в табл. 6.4	Номер кристалла	Параметры эллипсоида			
		a_2	a_3	α , град	Кол-во рефлексов
7	20665	1,39	1,75	4,00	2
10	20646	1,42	1,86	5,13	4
19	20587	1,32	1,83	5,00	1
25	20330	1,54	1,79	6,67	3
26	20329	1,60	1,67	4,50	1
34	20299	1,19	1,67	4,75	2
37	20295	1,45	2,06	5,75	2
38	20294	1,32	1,70	5,50	1
39	20293	1,35	1,54	5,00	2
46	20263	1,49	1,67	5,50	4
58	20250	1,41	1,57	5,50	2
60	20538	1,30	1,65	4,50	3
66	20370	1,35	1,70	5,17	1
74	20381	1,46	1,68	5,25	2
82	20390	1,55	1,75	6,75	2
83	20391	1,57	1,82	5,50	1
110	20447	1,54	1,77	7,00	1
115	20452	1,38	1,72	5,75	4
119	20456	1,45	1,83	5,00	1
136	20476	1,53	1,55	4,00	2
148	20488	1,36	1,52	5,00	1
158	20499	1,39	1,49	6,00	1
160	20501	1,45	1,57	5,33	3
179	20523	1,65	1,65	7,00	1
215	20569	1,75	1,64	5,50	1
246	20635	1,60	1,82	7,50	1
274	20690	1,62	1,86	6,50	1
	МО (СКО) k	1,52 (0,11) 0,07	1,80 (0,14) 0,08	5,94 (0,87) 0,15	

Истинные формы роста алмаза – октаэдры – среди кристаллов не были встречены ни разу. Небольшое количество кристаллов – 27 индивидов (10%) – сохранило форму квазиравновесного растворения – эллипсоида. Остальные 90% кристаллов обладают формами растворения, значительно модифицированными процессами механического износа (88%) и травления (72%). Два типа граней (плоские сетки октаэдра и криволинейные поверхности цилиндра), полигенных по механизмам образования, встречаются у 75% кристаллов. Тем не менее только в 4% случаев они могут быть причислены к истинным формам растворения (комбинированный тип рефлекса).

Одновременное присутствие признаков механического износа и травления отмечается на 160 кристаллах (57%). Но интенсивное воздействие обо-

их факторов (индекс 2) среди полярных признаков встречается редко: хаотический ударный износ и травление – у 5 кристаллов (2%), пластическое течение и травление – у 6 кристаллов (2%). Совместное значительное воздействие всех обсуждаемых факторов, модифицирующих поверхность алмаза (двух крайних типов механической деградации кристаллов – ударного износа и пластического течения, а также травления) встречается только у кристалла № 20444 (рис. 6.9). Естественно, что значительный ударный износ, наблюдающийся обычно после пластического течения структуры, должен уничтожать полярные признаки пластического течения кристалла, которое происходило, вероятно, в толще деформируемых геологических сред мантии на больших глубинах. Часто так и бывает. Но физиографический признак наличия полос пластических деформаций сохраняется значительно дольше и иногда помогает восстановить историю алмаза. Ударный износ, полосы пластической деформации и отсутствие полярного признака ПТ зарегистрированы у двух кристаллов, что подтверждает факт уничтожения полярных признаков пластической деформации кристаллов при хаотическом износе. Полосы пластических деформаций, наблюдаемые визуальнo на кристаллах, и признак ПТ, определяемый по гномограмме, отмечаются одновременно у 66 кристаллов, что составляет 35% от количества алмазов, несущих морфологический признак пластических течений структуры, что свидетельствует об информативности инструментальных исследований.

Распределение кристаллов по степени проявления признаков, согласно троичной системе оценки, удовлетворяет основным закономерностям нормального распределения и свидетельствует об удовлетворительном выборе системы оценки. Так, из 198 кристаллов, имеющих признаки хаотического ударного износа, только 19 обладают максимальным баллом – 2, для признака квазистатического сжатия соответствующие цифры – 182 и 20. Другие данные подтверждают признак травления. Здесь распределение оказалось более широким: 188 алмазов имеют признаки травления и 47 из них обладают максимальной степенью воздействия данного фактора. Вероятно, в случае травления кристаллов троичная система оценки, выбранная нами, не является достаточно выразительной. Однако пока метод не позволяет перейти к более дифференцированной системе оценки.

Дадим описание некоторых кристаллов из второй коллекции Вишерских алмазов.

Кристалл № 20291. Штриховка и мелкая бугорчатая поверхность алмаза обусловлены интенсивным механическим износом поверхности на заключительной стадии эволюции поверхности. Ранее кристалл подвергался пластическим деформациям, о чем свидетельствуют полосы пластических деформаций, наблюдаемые на кристалле, и небольшой остаточный эффект, регистрируемый в расширенной форме треугольно-подобного рефлекса (рис. 6.10). Полирующий износ не характерен для данного кристалла, поскольку предельная форма УИ не достигнута, а поверхность кристалла неоднородна – отмечаются участки разного рельефа.

Кристалл № 20265. На поверхности присутствуют яркие полосы пластической деформации одного направления (рис. 6.11). Однако на гномограмме рефлекс КС не обнаруживается, это связано с тем, что в исследуемой на

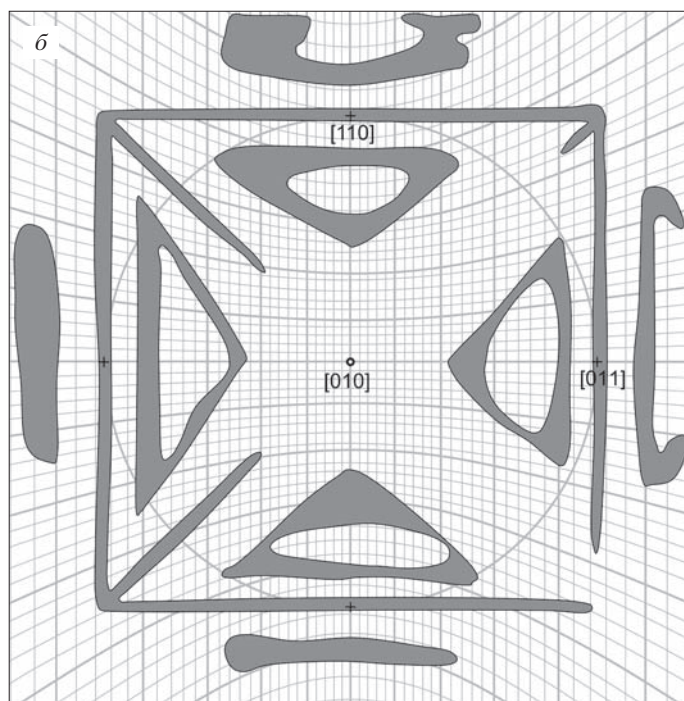
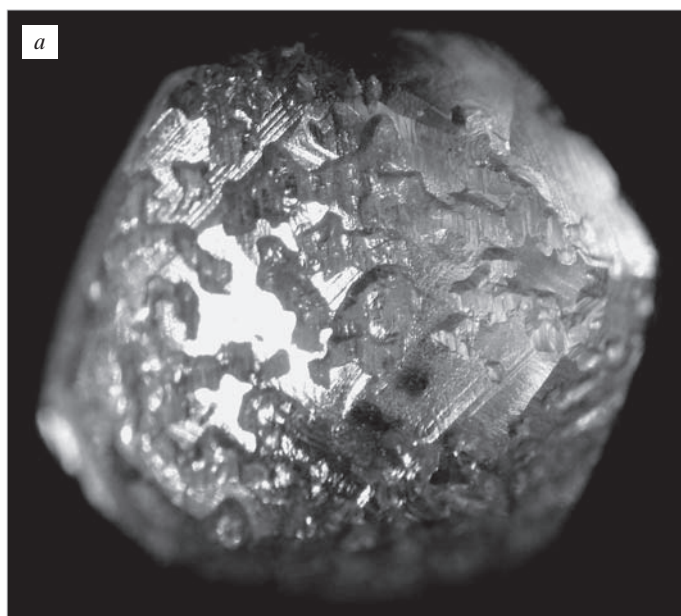


Рис. 6.9. Кристалл № 20444 (*a*) и его гномограмма (*б*)

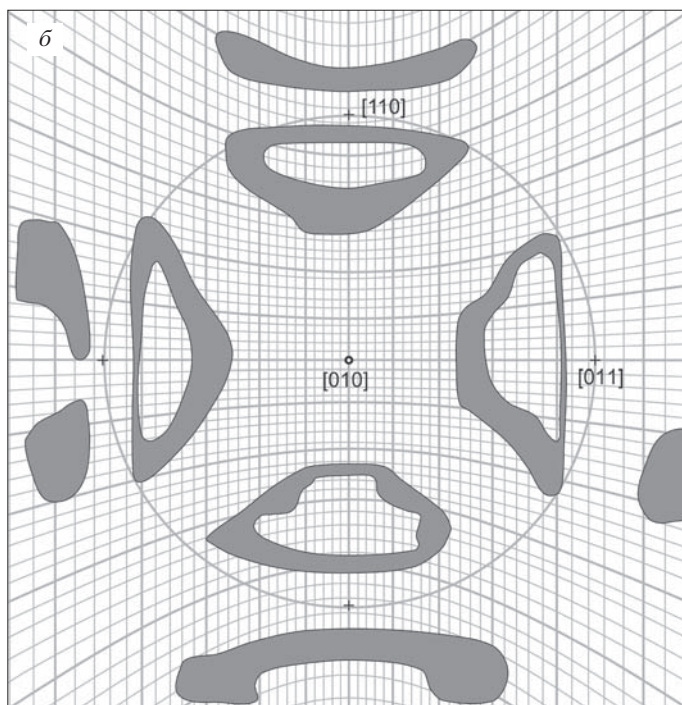
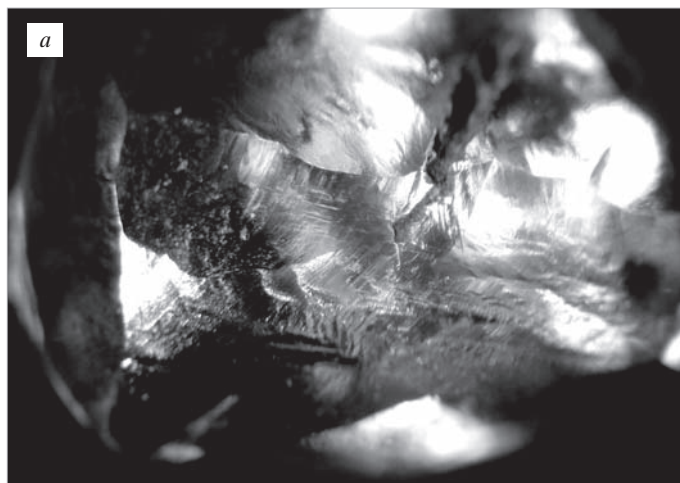


Рис. 6.10. Кристалл № 20291 (а) и гномограмма его полярного комплекса (б)

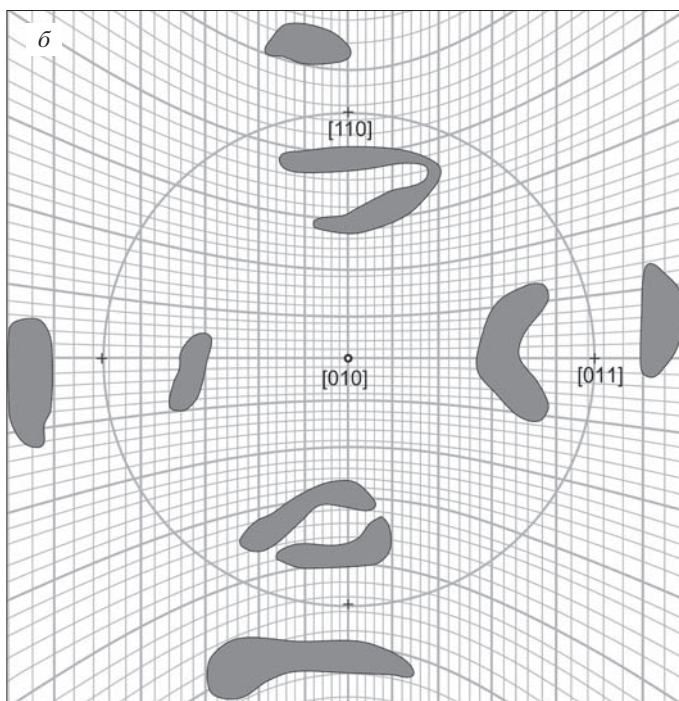
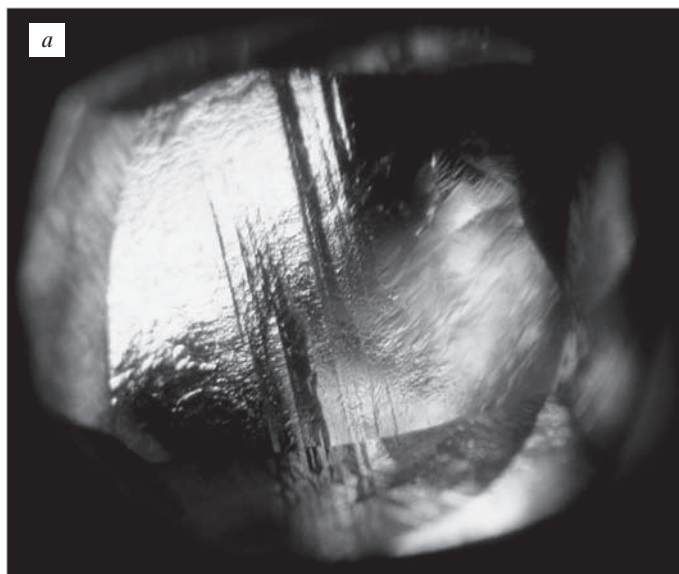


Рис. 6.11. Кристалл № 20265 (а) и его гномограмма (б)

гониометре области поверхности отсутствуют выходы ППД. Небольшой, но грубый механический износ не мог стать причиной исчезновения признаков деформации кристалла. Можно сделать вывод о том, что кристалл испытал пластическое течение структуры по одной системе скольжения. Форма рефлексов граней додекаэдроида далека от треугольной и мала по размерам, что связано с диффузионно-лимитированным полирующим травлением после грубого хаотического износа поверхности.

Кристалл № 20249 представляет собой правильный додекаэдроид с ясно очерченными ребрами гранного шва и наведенной штриховкой вокруг выходов осей третьего порядка (рис. 6.12). Наличие плоскостей пластических деформаций, зафиксированных при внешнем осмотре кристалла, связано со штриховкой и типичным рефлексом пластических течений структуры на фоне эллипсоида растворения. Кристалл подвергался также заключительному слабому хаотическому износу, но травления, вероятно, не происходило.

Кристалл № 20359. Гладкий, слегка удлинённый додекаэдроид на гномограмме демонстрирует причудливо искаженные рефлексы (рис. 6.13). Стрелкой показано направление удлинения кристалла. Темным цветом отмечены участки рефлексов наибольшей освещенности, отраженные от участков с наибольшей площадью поверхности. Искращения симметрии рефлекса, очевидно, связаны с удлинением кристалла, однако можно сделать вывод, что форма поверхностей не может быть удовлетворительно описана уравнением второго порядка. Правильные линии ребер, разделяющие гладкие грани кристалла на фотографии, противоречат изогнутым формам рефлексов на гномограмме. Только диффузионное полирующее травление способно так исказить форму рефлексов додекаэдроида. Дополнительно незначительные характерные признаки позволяют предположить прошедшие ранее слабые пластические течения структуры алмаза и завершающий полирующий механический износ кристалла. Однако никаких особых физиографических признаков этих процессов на кристалле не обнаруживается.

Кристалл № 20371. Округлый, с неровной поверхностью, на гномограмме демонстрирует типичные рефлексы комплексного травления (рис. 6.14). Рефлексы октаэдра, цилиндра, многочисленные сателлитные рефлексы вокруг точек $\{111\}$, наличие и характерное огранение ямок травления по оси L_4 , намечающиеся линии конусов травления, деформированные рефлексы граней додекаэдроида составляют полный набор признаков травления разного типа. Распад цилиндрических поверхностей на отдельные участки может интерпретироваться как начало перехода к стационарному режиму кинетического травления, тем более что большинство световых пятен совпадают с полюсами S-граней алмаза. Остаточные округлые рефлексы от граней растворения подчеркивают результат диффузионного травления поверхностей додекаэдроида данного кристалла.

Кристалл № 20382. На этом кристалле-додекаэдроиде (рис. 6.15) можно продемонстрировать эффект преобразования первичных поверхностей растворения диффузионно-лимитированным травлением, который иногда называют коррозией (Афанасьев и др., 2000). Судя по гномограмме, коррозионные явления не затронули области граней октаэдра, линии тригонтриоктаэдров, что не характерно для кинетического травления, но модифициро-

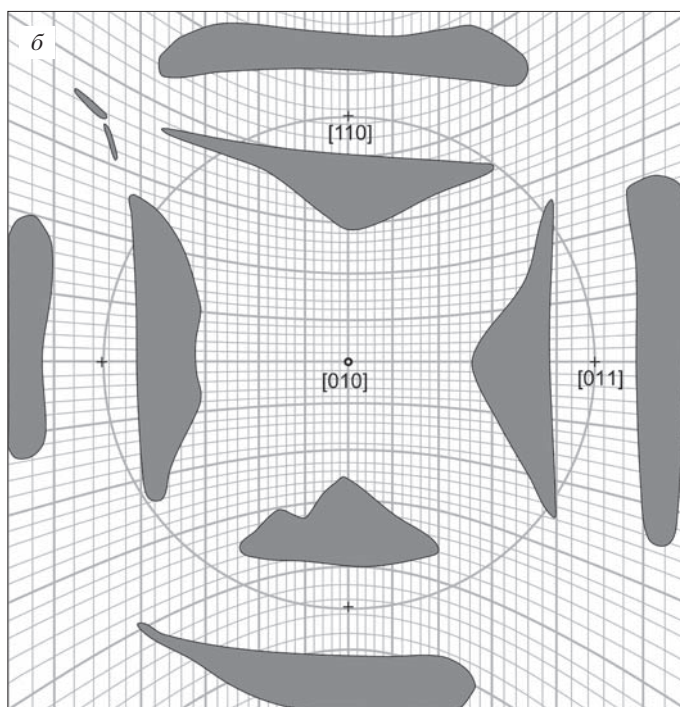
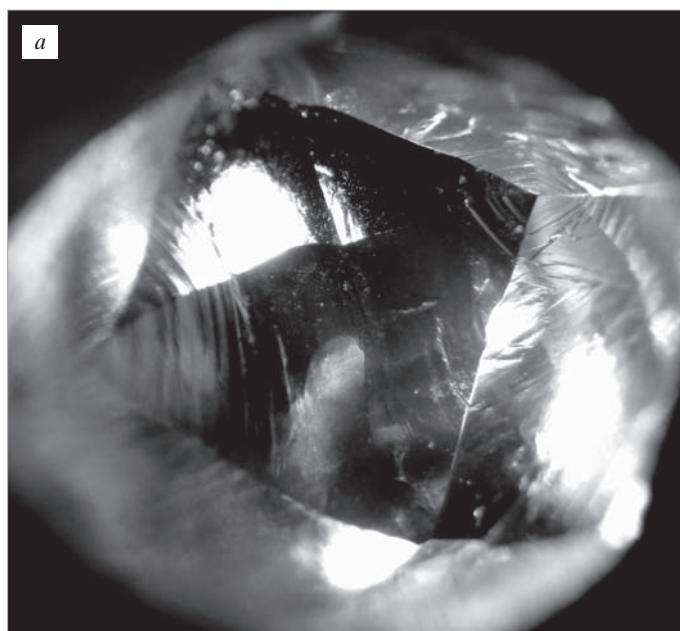


Рис. 6.12. Кристалл № 20249 (а) и гномограмма участка его поверхности (б)

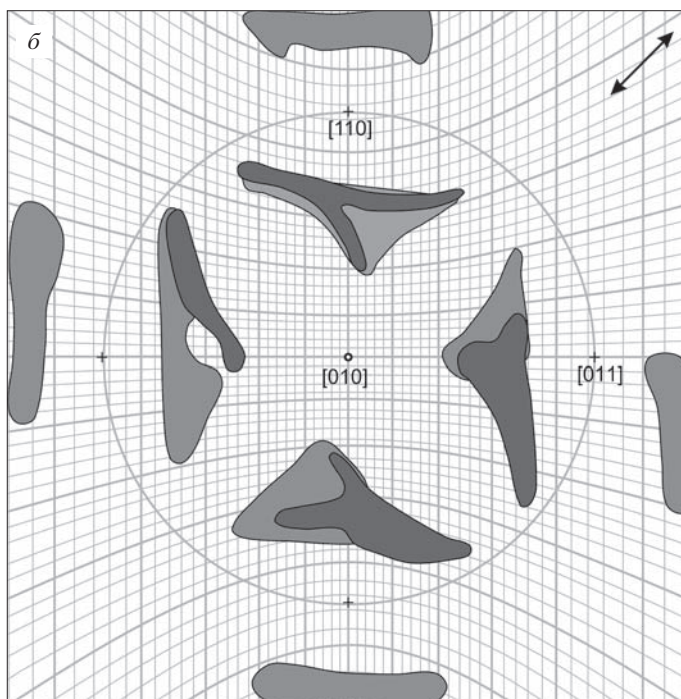
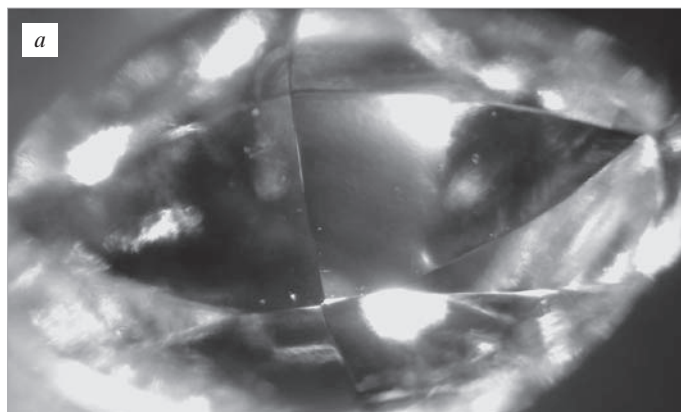


Рис. 6.13. Кристалл № 20359 (а) и гномограмма участка его поверхности (б).
Пояснения см. в тексте

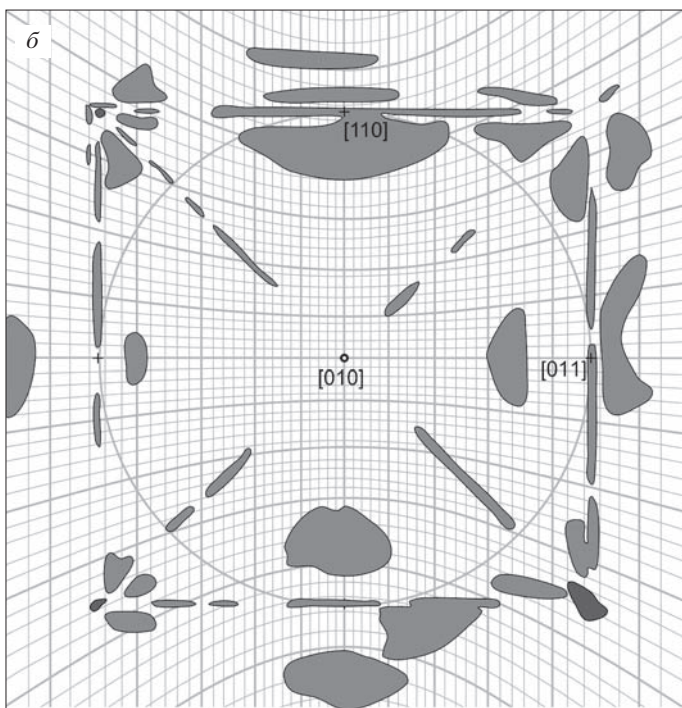


Рис. 6.14. Кристалл № 20371 (а) и его гномограмма (б)

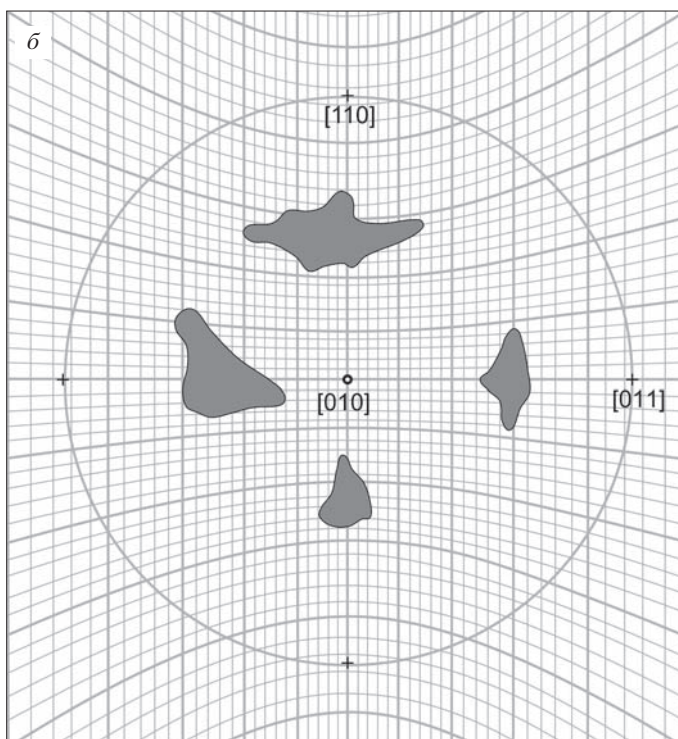
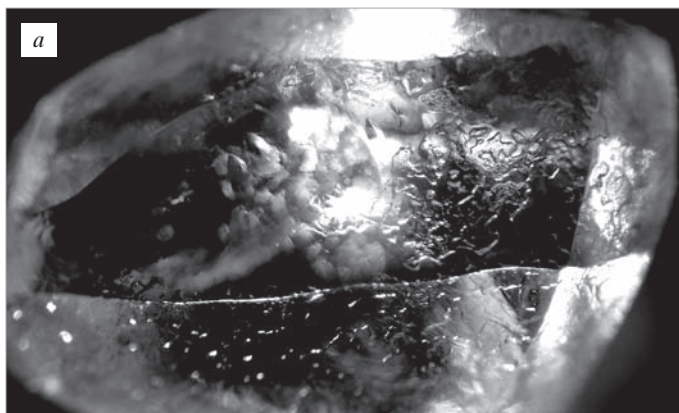


Рис. 6.15. Кристалл № 20382 (а) и гномограмма участка его поверхности (б)

вали до неузнаваемости треугольные рефлексы эллипсоида. Неровный рельеф поверхности алмаза, как видно, несильно повлиял на сложность полярного комплекса.

Кристалл № 20393 (двойник). Фигуры травления в индукционной каверне кристалла вблизи двойникового шва демонстрируют результат структурно зависимого травления (рис. 6.16). Морфология поверхностей травления первого индивида и двойника отличаются весьма существенно, поскольку индукционная поверхность первого субиндивида в центре фото на рис. 6.16, *а* оказалась субпараллельной сетке октаэдра (111), а второго – предположительно сетке тетрагонтриоктаэдра (151). Если морфологические результаты травления различаются, то полярные признаки практически одинаковы – линия цилиндра и расширенный рефлекс октаэдра. У первого основного субиндивида присутствуют дополнительно сателлитные рефлексы травления, рефлексы от ямки травления или индукционной поверхности необычных очертаний и видоизмененный диффузионным травлением рефлекс первичной формы растворения. Общая картина свидетельствует о комплексном травлении двойника.

Кристалл № 20398 имеет признаки механического износа обоих типов и травления (рис. 6.17). На поверхности кристалла вблизи выхода тройной оси видны треугольные ямки травления обратнопараллельной ориентации и каверны индукционных поверхностей срастания с мелкими кристаллами, вероятно, алмаза последней генерации. Часть треугольных ямок можно интерпретировать как участки регенерационных поверхностей (занозистый рельеф), но полярные признаки травления также присутствуют на этом кристалле. Полосы пластических деформаций на данном кристалле не были замечены, но рефлекс КС присутствует на гномограмме.

Особо следует отметить кристалл № 20433, обладающий максимальной из всей исследованных нами уральских алмазов массой – 5,15 кар (рис. 6.18). Алмаз прозрачный с желтоватым оттенком. Небольшие трещины по плоскостям спайности на ребрах и серповидные трещины на гранях указывают на достаточно грубый ударный износ, которому был подвергнут кристалл на последних этапах его истории. Однако форма поверхности свидетельствует о другом. После длительного этапа растворения, когда кристалл потерял не менее 25% первичной массы и приобрел форму гладкого додекаэдроида, кристалл претерпел пластические течения структуры по плоскостям спайности. Кристалл удлинен, поэтому форма измененных квазистатическим сжатием рефлексов на гномограмме диссимметризована. Пластические деформации структуры происходили одновременно с растворением, как у кристалла ii-340 из первой группы уральских алмазов (см. рис. 6.8), поэтому на кристалле, во-первых, сохранилась гладкая поверхность алмаза без обязательной штриховки (если деформации происходят после этапа растворения), а во-вторых, внутри прозрачного кристалла не видны плоскости пластических деформаций, что свидетельствует о высоких термодинамических параметрах системы, при которых плоскости скольжения становятся визуально незаметны – дефекты испытывают быструю релаксацию. Тем не менее полирующий ударный износ данного кристалла также имел место, на что указывает сглаживание вершин треугольных рефлексов. Однако он от-

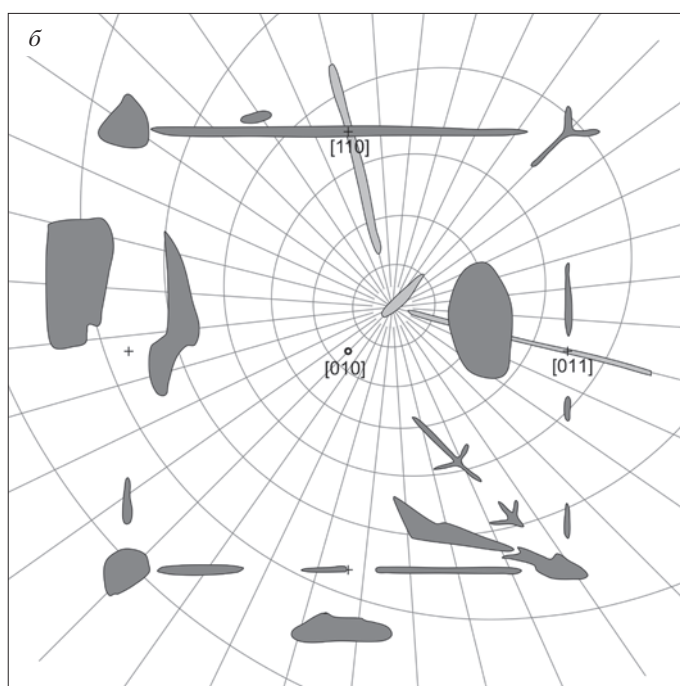
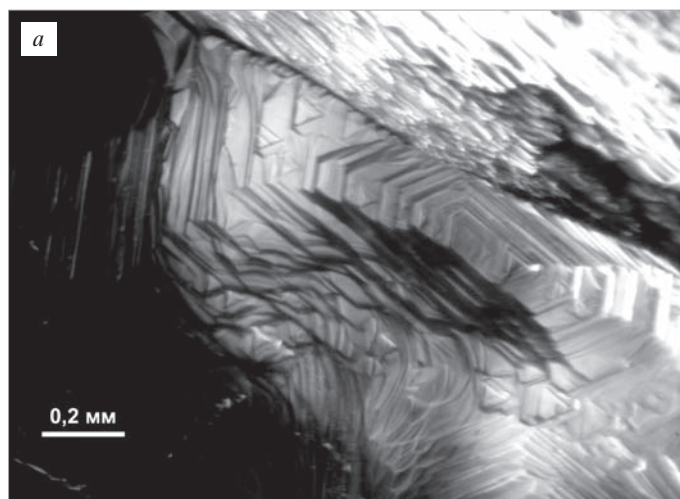


Рис. 6.16. Кристалл-двойник № 20393 (а) и его гномограмма на фоне шпинелевой координатной сетки (б).
Более светлым цветом показаны рефлексы субиндивида-двойника

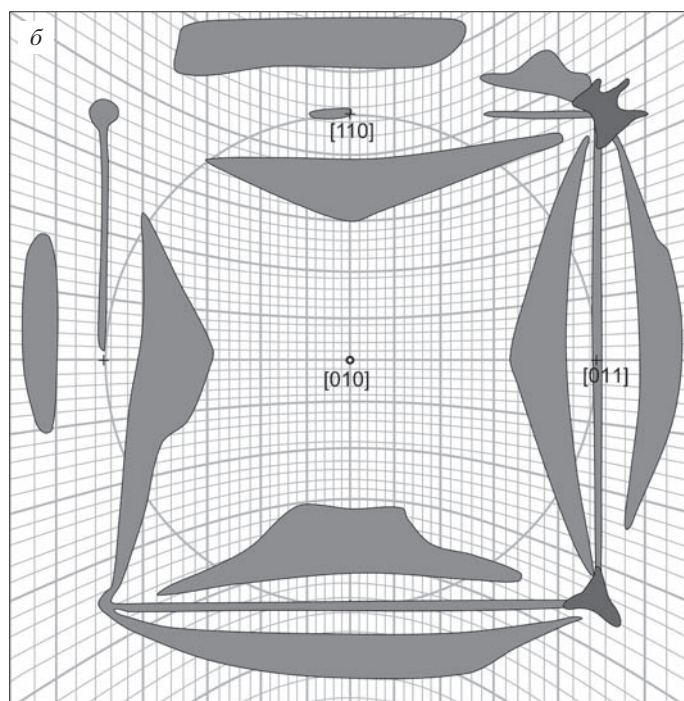
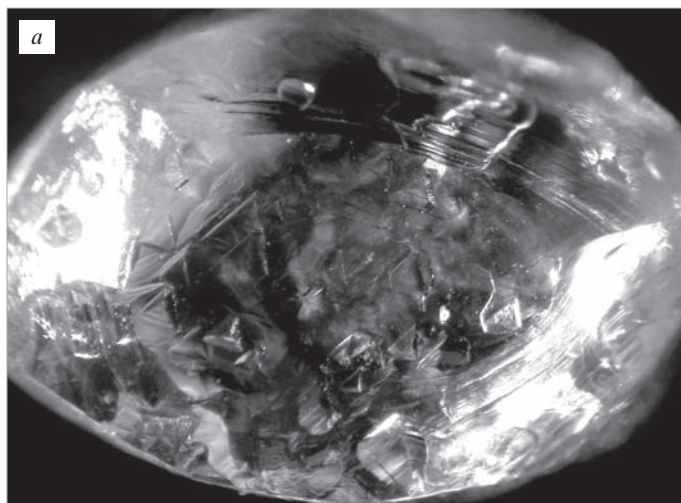


Рис. 6.17. Кристалл № 20398 (*a*) и его гномограмма (*б*)

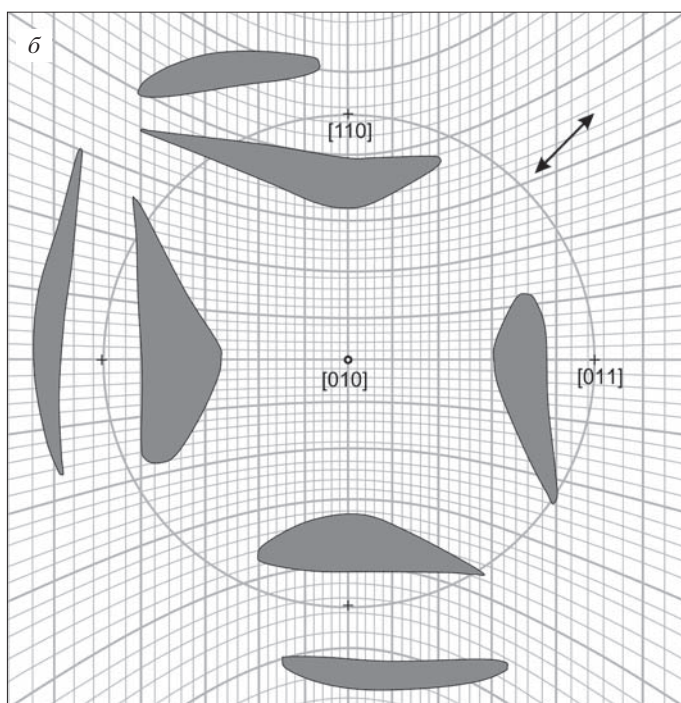
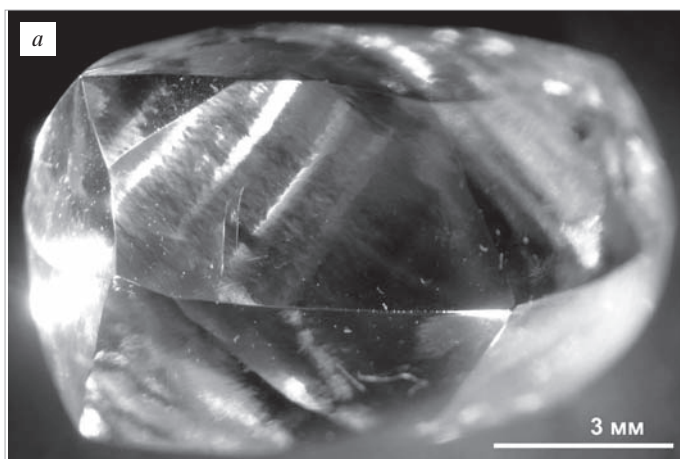


Рис. 6.18. Кристалл № 20433 (а) и его гномограмма (б).
Стрелкой показано направление удлинения кристалла

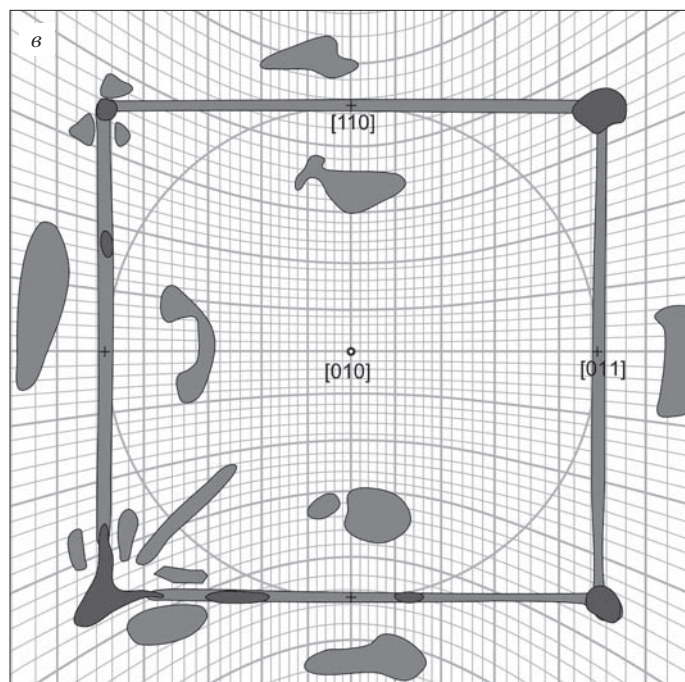
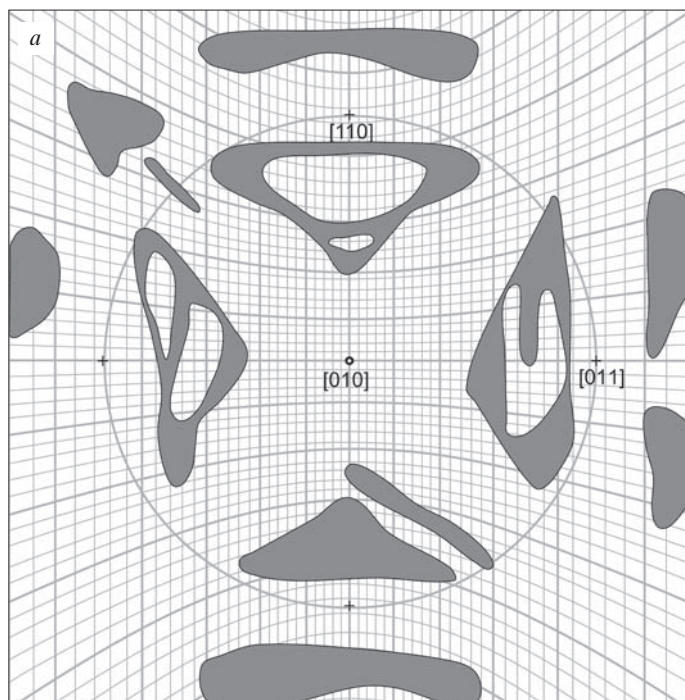
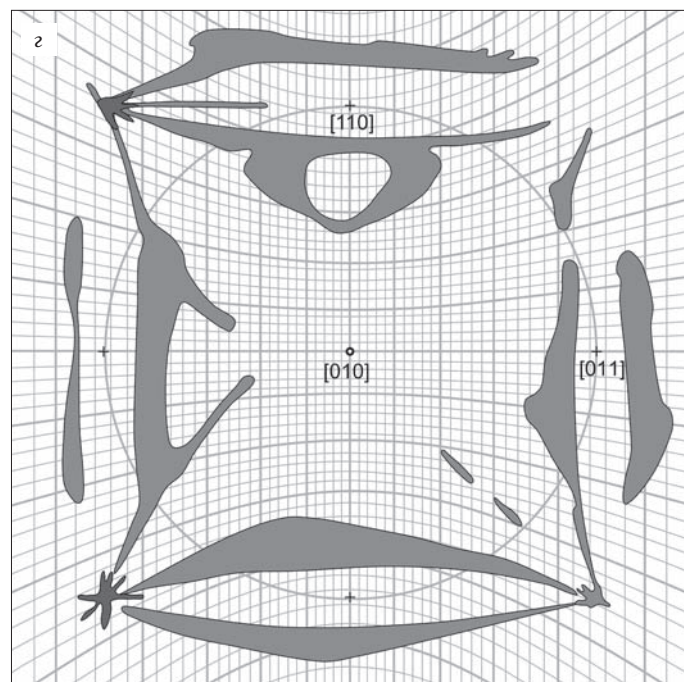
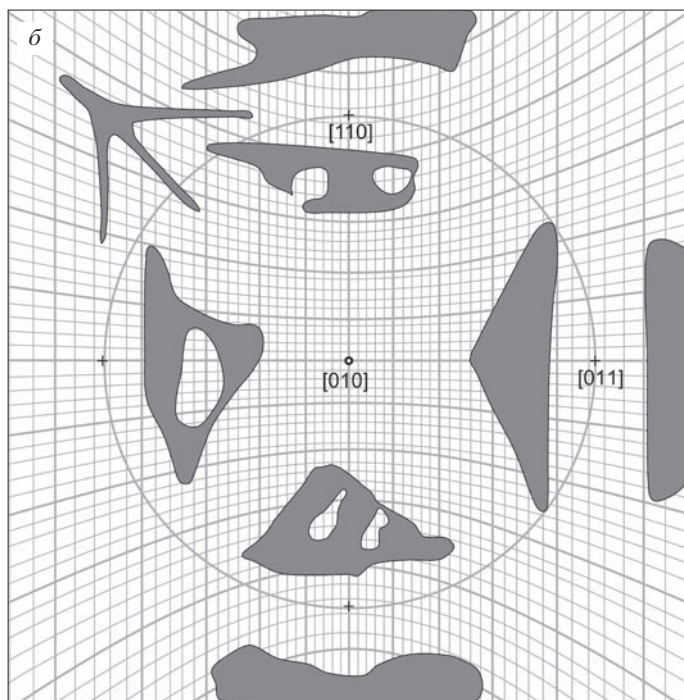


Рис. 6.19. Гномограммы
a – № 20446; *б* – № 20696;



кристаллов:
 в – № 20384; з – № 20694

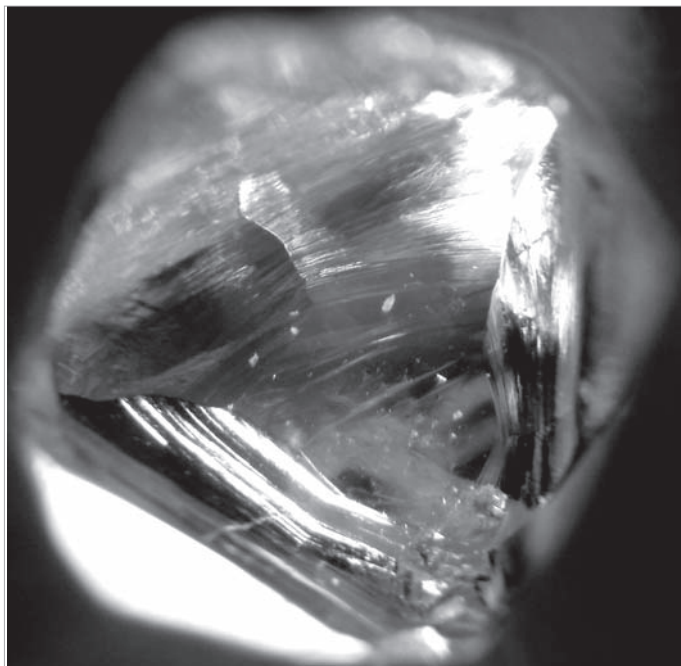


Рис. 6.20. Кристалл № 20694

личался от последнего грубого ударного износа, приведшего к макроскопическим дефектам поверхности.

Рассмотрим характерные типы рефлексов кристаллов, отражающие совместное воздействие разных факторов. Группа кристаллов с интенсивным ударным износом, в основном слабым диффузионным травлением и небольшими пластическими течениями структуры (6 кристаллов) обладает характерным рефлексом (рис. 6.19, *а*). Более значительные пластические деформации структуры, слабый хаотический износ и слабое кинетическое травление (также 6 кристаллов) отражены на рис. 6.19, *б*, слабый ударный износ, но сильное как кинетическое, так и диффузионное травление (34 кристалла) – на рис. 6.19, *в*. Для этих кристаллов не отмечаются или полностью уничтожены признаки пластического течения структуры. Смешанный износ и сильное травление также смешанного типа (15 кристаллов) продемонстрированы на рис. 6.19, *г*, облик кристалла – на рис. 6.20. Напомним, что совместное интенсивное действие всех факторов, модифицирующих поверхность растворения алмаза, отражено на рис. 6.9, *б*.

6.3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛМАЗОВ УРАЛА

Сравнительный анализ уральских кристаллов из первой и второй коллекций (см. табл. 6.2, 6.4) позволяет заключить следующее.

1. Доли кристаллов, сохранивших формы растворения, различаются по коллекциям довольно значительно: в первой – 10 кристаллов (43%), во второй – 27 (10%). Этот показатель связан отчасти с естественной селек-

цией кристаллов в алмазопроявлении, но, вероятнее всего, отражает искусственный отбор кристаллов. Вторая коллекция, насколько нам известно, имеет многолетнюю историю исследований различными методами и многими минералогами. Поэтому в данном случае доле сохранности первичной поверхности растворения на уральских алмазах нет смысла придавать большого значения.

2. Установлено, что признак комбинированного рефлекса в обоих случаях не связан с процессами регенерации. Поэтому происхождение граней октаэдра и поверхностей цилиндра может быть обусловлено только механическим износом и травлением, а не сменой роста и растворения. Доли легко диагностируемых рефлексов – плоских сеток октаэдра и поверхностей цилиндра – в обеих коллекциях близки и составляют 61–65%. Наличие модифицированных пирамид регенерации на поверхности алмаза необязательно должно сопровождаться присутствием плоских сеток октаэдра, куба или криволинейных поверхностей цилиндра, что наблюдается у уральских алмазов.

3. Близки также значения показателей механического износа кристаллов двух коллекций – 91 и 88%. Соответственно ударный износ затронул 74% кристаллов в первой и 76% во второй коллекции. Пластические деформации структуры по гномограммам отмечаются у 57% кристаллов первой коллекции и 69% кристаллов во второй. Блочное строение приповерхностных областей, выявленное в результате механического износа, отмечено у 2 кристаллов (9%) в первой и 37 кристаллов (14%) второй коллекции. Очевидно, что блочность кристаллов имеет более широкое распространение, поскольку серповидный рефлекс, выявляющий блочность, возникает в результате хаотического ударного износа, который происходит не всегда. Вероятно, данный показатель занижен на 15–20%.

4. Малая встречаемость поверхности конуса была отмечена в предыдущих главах. Согласно статистике, во второй коллекции уральских алмазов конус встречается на 26 (10%), в первой – на 2 кристаллах (9%). В основном конус обязан своим происхождением процессам травления. Таким образом, можно заключить, что конические поверхности уральских алмазов обусловлены травлением.

5. Существенное различие между двумя коллекциями отмечается в количестве зарегистрированных двойников: в первой – 5 кристаллов (22%), во второй – 11 (4%).

6. Более широкий разброс отмечается среди физиографических показателей двух групп кристаллов: шагреневый рельеф граней, штриховка, пирамиды регенерации, наличие сколов и индукционных поверхностей. Однако эти во многом субъективные показатели, по нашему убеждению, самостоятельного значения не имеют. Только в комплексе с полярными индексами они приобретают определенное значение. Например, во второй коллекции кристаллов штриховка в 81% случаев совпадает с признаком КС (149 из 184 кристаллов), а шагреневый рельеф в 64% случаев совпадает с признаком УИ (126 из 198). Установлено также, что 75% случаев (43 из 57) наличия индукционных поверхностей могут быть связаны с появлением поверхности цилиндра на гномограмме. Неполные совпадения обусловлены не только

субъективным фактором. Иногда на той части поверхности кристалла, которая сканируется на гониометре, могут отсутствовать необходимые признаки. Кроме того, шагреневый рельеф может быть связан как с хаотическим износом регенерационного рельефа, так и с травлением кристалла, а штриховка может быть обусловлена не только пластическими деформациями, но и ростовой неоднородностью вхождения дефектов в структуру алмаза, выявленных на стадии растворения. Таким образом, для многих физиографических признаков можно отметить полигенез.

Можно предположить, что обратная корреляция должна наблюдаться у показателя регенерации с индексом ударного износа. Чем больше кристаллов подвергалось заключительной механической хаотической обработке в изучаемой выборке, тем меньше на поверхности алмазов будут сохраняться пирамиды регенерации. Однако в нашем случае сходное количество таких кристаллов в обеих коллекциях не позволяет убедиться в этом. Во второй выборке только 8% алмазов имеют признаки прошедших этапов регенерации, а в первой – 22%.

7. В результате расчета среднестатистической формы растворения для двух групп уральских кристаллов получены похожие характеристики обобщенного эллипсоида, которые свидетельствуют о сходности условий растворения:

	a_2		a_3		α , град	
	I гр.	II гр.	I гр.	II гр.	I гр.	II гр.
МО	1,40	1,52	1,79	1,80	5,45	5,94
СКО	0,10	0,11	0,12	0,14	0,72	0,87
k	0,07	0,07	0,06	0,08	0,13	0,15

Сравнительный анализ среднестатистических форм растворения алмазов месторождений Урала, Бразилии и Якутии приведен в главе 9.

ФОРМЫ КРИСТАЛЛОВ АЛМАЗА БРАЗИЛИИ

Кристаллы Бразилии отобраны из россыпей штатов Минас Жерайс и Мату Гроссу. Бассейн р. Макаубас левого притока р. Жекитиньонья штата Минас Жерайс составляет около 300 км². Общее количество изученных нами алмазов из бассейна р. Макаубас 189 (Петровский и др., 2003). Два кристалла (MGD18/1, MGD 18/4) добыты из бассейна р. Зеленая, расположенной в 500 км от р. Макаубас в пределах штата Минас Жерайс.

Из штата Мату Гроссу предоставлены для исследования 6 кристаллов (образцы MtGrDn1-6), а также 55 кристаллов, добытых на территории алмазоносного поля Жуина (Juina), располагающегося на западе штата. Кроме того, коллекция бразильских алмазов включала 19 кристаллов с разными наборами морфологических признаков, иллюстрирующих широкие варианты условий для эволюции формы алмазов, характерные для разных геологических обстановок Бразилии.

7.1. АЛМАЗЫ БАСЕЙНА Р. МАКАУБАС

Коллекция кристаллов насчитывает 189 алмазов, относящихся в основном к I разновидности по Ю.Л. Орлову (табл. 7.1, 7.2). Для 17 кристаллов не получена гномоническая проекция рефлексов, однако часть физиографической информации по этим кристаллам внесена в табл. 7.2. Расчет статистики полярных характеристик алмазов произведен по 172 кристаллам. В коллекции преобладают додекаэдриды. Обломков и осколков среди них немного – 25%, что связано, с одной стороны, со специальным отбором кристаллов для морфологических исследований, а с другой – с произошедшей селекцией наиболее прочных алмазов в ходе многократного переотложения алмазов в россыпях до попадания их в россыпи р. Макаубас.

Из всей коллекции только 12 кристаллов (7%) сохранили исходную поверхность растворения, не модифицированную процессами механической деградации и травления. Параметры эллипсоидной поверхности растворения кристаллов приведены в табл. 7.3.

Для алмазов бассейна р. Макаубас характерен высокий показатель естественной механической обработки – 138 кристаллов (80%) – и травления – 145 алмазов (84%). Причем признаки ударного износа имеют 120 кристаллов (70%), а пластического течения структуры – 91 кристалл (53%). Интенсивный ударный износ встречается редко – у 13 кристаллов (8%), что является важным показателем, коррелирующим с небольшой долей обломков и осколков данной выборки. Одновременное присутствие признаков механи-

Кристаллы алмазов бассейна р. Макаубас

№ п.п.	Кристалл	Описание
1	D1	Октаэдроид. Штриховка параллельна ребрам, травление
2	D2	Комб. форма октаэдр–додекаэдроид, ламели, рефлексы гексоктаэдра
3	D3	Комб. форма октаэдр–додекаэдроид, травление, пленка на поверхности
4	D4	Четверник незакономерный. Регенерация и грубый износ
5	D5	Октаэдроид, травление, параллельный сросток
6	D6	Грубоокатанный упрощенный додекаэдроид, травление. Гномограммы нет
7	D7	Додекаэдроид. Регенерация, небольшое травление. Гномограммы нет
8	D8	Грубоокатанный додекаэдроид, травление ППД. Пленки
9	D9	Двойник, ламели, ППД
10	D10	Додекаэдроид с гладкими поверхностями
11	MGD10/1	Додекаэдроид, небольшие аксессуары регенерации по ППД
12	MGD10/2	Уплощенный тройник, регенерация
13	MGD10/3	Комб. форма октаэдр–ромбододекаэдр
14	MGD10/4	Гладкий додекаэдроид, травление. Крупное открытое включение
15	MGD10/5	Додекаэдроид. Двойник. Травление
16	MGD10/6	Обломок додекаэдроида
17	MGD10/7	Додекаэдроид с аксессуарами регенерации, ППД. Черные включения
18	MGD10/8	Додекаэдроид с грубой поверхностью
19	MGD10/9	Додекаэдроид с гранью октаэдра и легкой шагренью
20	MGD10/10	Обломок додекаэдроида, гладкие поверхности
21	MGD10/11	Двойник, травление
22	MGD10/12	Додекаэдроид с шагренью
23	MGD10/13	Обломок додекаэдроида и ямками травления. «Двуликий Янус»
24	MGD10/14	Додекаэдроид, шагрень, травление
25	MGD10/15	Додекаэдроид, травление
26	MGD10/16	Обломок додекаэдроида, травление
27	MGD10/17	Обломок додекаэдроида, износ и травление
28	MGD10/18-2	Додекаэдроид, травление
29	MGD10/20	То же
30	MGD10/21	—”—
31	MGD10/22	Додекаэдроид, небольшое травление и износ
32	MGD10/23-5	Додекаэдроид с крупными аксессуарами регенерации
33	MGD10/24	Октаэдроид с бороздами по ребрам, травление
34	MGD10/25	Додекаэдроид, удлинение по L_3 , ламели, ППД
35	MGD10/26	Уплощенный кубооктаэдроид сложной формы, грубый рельеф
36	MGD10/28	Желтоватый додекаэдроид со штриховкой
37	MGD10/29	Додекаэдроид, грубые бугорки шагрени
38	MGD10/31	Додекаэдроид, травление
39	MGD10/32	Октаэдр с желобами по ребрам. Есть грани куба. Нет гномограммы

№ п.п.	Кристалл	Описание
40	MGD10/33	Параллельный росток с зональностью
41	MGD10/34	Двойник регенерированный, износ
42	MGD10/35	Додекаэдрoid с гранным швом, желобом и шагренью, ППД
43	MGD10/36	Додекаэдрoid со штриховкой и ударными серповидными трещинами
44	MGD10/37	Октаэдрический осколок
45	MGD10/38	Додекаэдрoid протравленный
46	MGD10/40	Додекаэдрoid с шагренью и ямками травления по L_3
47	MGD10/41	Двойник, плоский октаэдрoid
48	MGD10/42	Сильноокатанный кристалл неясной формы. Гномограммы нет
49	MGD10/43	Додекаэдрoid с ладелями
50	MGD10/45	Додекаэдрoid с шагренью
51	MGD10/46	Додекаэдрoid с шагренью, обломок
52	MGD10/47	Неправильный кристалл-обломок
53	MGD10/48	Уплотненный осколок. Нет гномограммы
54	MGD10/49	Додекаэдрoid с ладелями
55	MGD10/50	Додекаэдрoid сложной формы с аксессуарами. Нет гномограммы
56	MGD10/51	Уплотненный по L_3 октаэдрoid. Блочный рельеф. Серповидные рефлексы
57	MGD10/52	Комб. форма октаэдр–додекаэдрoid, ППД, зональность. Серповидные рефлексы
58	MGD10/53	Додекаэдрoid с шагреньевым рельефом. Диффузные рефлексы
59	MGD10/55	Осколок додекаэдрoidа. «Двуликий Янус»
60	MGD10/56	Додекаэдрoid, ударный износ, шагрень, регенерация на выходах ППД
61	MGD10/57	Регенерированный кристалл неправильной формы с округлыми ребрами
62	MGD10/58	Октаэдрoid с округлыми ребрами, гномограмма как у MGD10/57
63	MGD10/59	Обломок додекаэдрoidа со сглаженными поверхностями. Ко-нус
64	MGD10/60	Регенерированный обломок додекаэдрoidа
65	MGD10/61	Додекаэдрoid с шагренью
66	MGD10/62	Уплотненный октаэдрoid. Трещина и крупное включение. Нет гномограммы
67	MGD10/63	Неправильный кристалл-осколок. Нет гномограммы
68	MGD10/64	Комб. форма октаэдр–додекаэдрoid с желобами
69	MGD10/66	Регенерированный обломок, нет гномограммы. Черные включения
70	MGD10/67	Неправильный кристалл-обломок. Нет гномограммы
71	MGD10/68	Уплотненный гладкий додекаэдрoid. Ламели
72	MGD10/69	Додекаэдрoid с гранями октаэдра. Шагрень
73	MGD10/70	Октаэдр с желобами
74	MGD10/74	Неправильной формы кристалл с бороздами и пятнами пигментации

№ п.п.	Кристалл	Описание
75	MGD11/1	Гладкий додекаэдрон с ямками по L_4 , блочность
76	MGD11/2	Октаэдрон, грубо штрихованный параллельный сrostок
77	MGD11/3	Додекаэдрон, регенерация, штриховка
78	MGD11/4	Октаэдрон, штриховка
79	MGD11/5	Округлый кристалл неправильной формы, крупная шагреня
80	MGD11/6	Додекаэдрон с острыми аксессуарами, пятна зеленой пигментации
81	MGD11/7	Правильный додекаэдрон с почти гладкими гранями
82	MGD11/8	Удлиненный додекаэдрон с пятнами пигментации и сглаженной шагренью
83	MGD11/9	Октаэдрон с бороздами по ребрам, конус
84	MGD11/10	Неправильной формы регенерированный обломок, ППД
85	MGD11/11	Октаэдрон, регенерация, полицентрическое строение граней. Сrostок
86	MGD11/12	Обломок додекаэдрона, штриховка, шагреня
87	MGD11/13	Обломок додекаэдрона
88	MGD11/14	Комб. форма октаэдр–додекаэдрон, штриховка грани гексоктаэдра
89	MGD11/15	Додекаэдрон, штриховка
90	MGD11/16	Додекаэдрон, травление
91	MGD11/17	Додекаэдрон, сrostок
92	MGD11/21	Нет описания
93	MGD11/22	То же
94	MGD11/24	–”–
95	MGD11/25	Черный додекаэдрон, гладкие грани
96	MGD11/30	Обломок додекаэдрона. Ламели + шагреня
97	MGD11/31	Двойник, мелколамельная поверхность
98	MGD11/32	Додекаэдрон с шагренью
99	MGD11/33	Уплотненный желтый додекаэдрон, ямки травления, конус
100	MGD11/34	Додекаэдрон. Регенерация по ППС. Шагреня, нет гномограммы
101	MGD11/35	Осколок, регенерация, двойник, пятна зеленой пигментации
102	MGD11/36	Октаэдрон с желобами по ребрам
103	MGD11/37	Уплотненный гладкий двойник, черный ажурные включения
104	MGD11/38	Правильный додекаэдрон, ламели
105	MGD11/39	Додекаэдрон, ламели, пятна коричневой пигментации, ямки травления по L_4
106	MGD11/40	Двойниковый сrostок октаэдрона
107	MGD11/41	Удлиненный додекаэдрон с шагренью и бороздами у L_4 , ямка травления по L_4
108	MGD11/42	Свежий обломок, регенерация. Нет гномограммы
109	MGD11/43	Додекаэдрон, шагреня, есть грани куба. Износ
110	MGD11/44	Удлиненный додекаэдрон, шагреня
111	MGD11/45	Округлый осколок
112	MGD11/46	Двойник, уплотненный по плоскости двойникования, каналы. Нет гномограммы
113	MGD11/47	Уплотненный блочный кристалл, трещины по плоскости двойникования

№ п.п.	Кристалл	Описание
114	MGD11/48	Гладкий додекаэдрокд, конус, ламели
115	MGD11/49	Додекаэдрокд, ламели
116	MGD11/50	Кубокд. Периодичная регулярная шагренъ. Нет гномограммы
117	MGD11/51	Додекаэдрокд, блоки (ламели?), конус
118	MGD11/52	Трещиноватый обломок
119	MGD11/53	Окатанный неправильный обломок 3-й плоскости скола. Гномограммы нет
120	MGD11/54	Додекаэдрокд. Зональность по гексоктаэдрокду?
121	MGD11/55	Обломок додекаэдрокда, ламели, зональность
122	MGD11/56 № 6	Удлиненный, но не идеально гладкий додекаэдрокд
123	MGD12/1	Комб. рефлекс. Октаэдр–додекаэдрокд с желобами. Износ
124	MGD12/2	Двойник
125	MGD12/3	Уплотненный додекаэдрокд с гладкими поверхностями
126	MGD12/4	Округлый неправильной формы кристалл, грубый рельеф и царапины
127	MGD13/1	Нет описания
128	MGD13/2	То же
129	MGD13/3	–”–
130	MGD13/4	–”–
131	MGD14/1	–”–
132	MGD14/2	–”–
133	MGD15/1	Уплотненный по L_3 гладкий додекаэдрокд, включение
134	MGD15/2	Нет описания
135	MGD16	Додекаэдрокд, конус, шагренъ у оси L_4 , чистые грани октаэдра
136	MGD17/1	Нет описания
137	MGD17/2	Комб. форма, шагренъ, травление
138	MGD19/1	Коричневый додекаэдрокд, износ
139	MGD19/2	Кристалл неправильной формы
140	MGD19/3	Кристалл неправильной формы, индукционные поверхности. Нет гномограммы
141	MGD19/4	Гладкий додекаэдрокд. Грани гексоктаэдра
142	MGD19/5	Гладкий додекаэдрокд
143	MGD19/6-1	Додекаэдрокд с шагренью и штриховкой
144	MGD19/6-2	Додекаэдрокд со ступенями по октаэдру
145	MGD19/6-3	Додекаэдрокд с матовой поверхностью. Графитизация, ППД
146	MGD19/6-4	Додекаэдрокд аксессуарии по октаэдру. Графитизация
147	MGD19/6-5	Осколок додекаэдрокда с округлыми аксессуориями. Износ
148	MGD19/6-6	Обломок неправильной формы
149	MGD19/6-7	Обломок октаэдрокда
150	MGD19/6-8	Кристалл неправильной формы
151	MGD19/7-1	Гладкий додекаэдрокд с двумя огранеными включениями
152	MGD19/7-2	Додекаэдрокд с небольшой штриховкой
153	MGD19/7-3	Додекаэдрокд, штриховка, черное включение, зональность
154	MGD19/7-4	Додекаэдрокд с мелкой шагренью, зональность по октаэдру
155	MGD19/7-5	Плоский додекаэдрокд
156	MGD19/7-6	Грушевидный додекаэдрокд, борозды, ямка травления

№ п.п.	Кристалл	Описание
157	MGD19/7-7	Октаэдронид, штриховка
158	MGD19/7-8	Кристалл треугольной формы с шагренью
159	MGD19/7-9	Кристалл с кавернами по граням додекаэдронид
160	MGD19/7-10	Кристалл неправильной формы с ямками травления по октаэдру
161	MGD19/7-11	Уплотненный обломок додекаэдронид с пятнами пигментации
162	MGD19/7-12	Неправильный обломок с ямками травления по кубу
163	MGD19/7-13	Осколок додекаэдронид
164	MGD19/7-14	Двойник, додекаэдронид с сильно шероховатой поверхностью
165	MGD19/7-15	Обломок гладкого додекаэдронид, графитизация. Нет гномограммы
166	MGD20/1	Додекаэдронид со штриховкой
167	MGD20/2	Додекаэдронид с шероховатой поверхностью
168	MGD20/3	Октаэдронид. Пятна пигментации и ямки травления по октаэдру
169	MGD20/4	Додекаэдронид. Зональностью по октаэдру
170	MGD20/5	Обломок додекаэдронид. Штриховка. Грани гексоктаэдра?
171	MGD21/1	Крупный додекаэдронид. ППД, штриховка и пятна пигментации
172	MGD21/2	Додекаэдронид с ламелями
173	MGD21/3	Плоский двойник додекаэдронид с зональностью по октаэдру. ППД
174	MGD21/4	Додекаэдронид, штриховка, ламели, конус, серповидный рефлекс
175	MGD21/5	Додекаэдронид, штриховка, ламели, конус
176	MGD21/6	Додекаэдронид с небольшими желобами по ребрам октаэдра
177	MGD21/7	Додекаэдронид с желобами по ребрам октаэдра, штриховка
178	MGD22/1	Обломок додекаэдронид, с округлыми аксессуориями на поверхности
179	MGD22/2	Додекаэдронид с ямками травления
180	MGD22/3	Додекаэдронид с тонкой шагренью
181	MGD22/4	Округлый додекаэдронид с бугорками и пятнами пигментации
182	MGD22/5	Уплотненный додекаэдронид с тремя сколами по вершинам L_4
183	MGD22/6	Уплотненный осколок с желобом, идущим к L_4 . Мелкая шагрень
184	MGD23/1	Округлый додекаэдронид. Неровная поверхность. Мелкая шагрень
185	MGD23/2	Удлиненный додекаэдронид с шагренью и ППД
186	MGD23/3	Округлый додекаэдронид-обломок с регенерированной поверхностью, ППД
187	MGD23/4	Неправильной формы кристалл с мелкими аксессуориями и штриховкой
188	MGD23/5	Удлиненный додекаэдронид с шагренью зеленоватого оттенка, с ямкой на L_4
189	MGD23/6	Октаэдронид. Ступени на гранях

Таблица 7.2

Характеристики поверхностей алмазов бассейна р. Макаубас

№ п.п.	Кристалл	Цилиндр	Октаэдр	Комб. рефл.	УИ	ПТ	Серп. рефл.	Мех. износ	Полигенез	Конус	Травление	Двойники	Шагрь	Штриховка	Регенерация	Сколы	Импульс. грани
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	D1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	2	0	0	1	1	0	0
2	D2	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	D3	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0
4	D4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
5	D5	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0
6	D6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
7	D7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
8	D8	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0
9	D9	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0
10	D10	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
11	MGD10/1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	MGD10/2	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0
13	MGD10/3	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0
14	MGD10/4	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
15	MGD10/5	0	1	0	0	1	0	1	1	1	2	1	0	0	0	0	0
16	MGD10/6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
17	MGD10/7	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
18	MGD10/8	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
19	MGD10/9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
20	MGD10/10	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
21	MGD10/11	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
22	MGD10/12	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0
23	MGD10/13	1	1	0	2	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
24	MGD10/14	1	1	0	1	1	0	1	1	1	2	0	1	1	0	0	0
25	MGD10/15	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
26	MGD10/16	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0
27	MGD10/17	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
28	MGD10/18	1	1	0	1	1	0	1	1	1	2	0	0	0	0	0	0
29	MGD10/20	0	1	0	0	2	0	1	1	1	2	0	0	0	0	0	0
30	MGD10/21	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
31	MGD10/22	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0
32	MGD10/23-5	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0
33	MGD10/24	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
34	MGD10/25	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
35	MGD10/26	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
36	MGD10/28	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0
37	MGD10/29	1	1	0	1	1	0	1	1	1	2	0	1	0	0	0	0
38	MGD10/31	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0
39	MGD10/32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	MGD10/33	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	1	0	0	0
41	MGD10/34	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1

№ п.п.	Кристалл	Цилиндр	Октаэдр	Комб. рефл.	УИ	ПТ	Серп. рефл.	Мех. износ	Полигенез	Конус	Травление	Двойники	Шагрень	Штриховка	Регенерация	Сколы	Индукц. границ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
42	MGD10/35	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
43	MGD10/36	0	1	0	1	0	0	1	1	1	2	0	0	1	0	0	0
44	MGD10/37	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0
45	MGD10/38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
46	MGD10/40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0
47	MGD10/41	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
48	MGD10/42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
49	MGD10/43	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
50	MGD10/45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0
51	MGD10/46	0	0	0	1	0	0	1	0	0	2	0	1	0	0	1	0
52	MGD10/47	1	1	0	1	1	0	1	1	0	2	0	1	0	0	1	0
53	MGD10/48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
54	MGD10/49	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0
55	MGD10/50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
56	MGD10/51	1	1	0	1	1	1	1	1	1	2	0	0	0	0	0	0
57	MGD10/52	1	1	0	2	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0
58	MGD10/53	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0
59	MGD10/55	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0
60	MGD10/56	1	1	0	1	1	0	1	1	0	2	0	1	1	1	0	0
61	MGD10/57	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0
62	MGD10/58	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0
63	MGD10/59	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
64	MGD10/60	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0
65	MGD10/61	0	0	0	1	1	0	1	0	0	2	0	1	0	0	0	0
66	MGD10/62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
67	MGD10/63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
68	MGD10/64	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
69	MGD10/66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
70	MGD10/67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
71	MGD10/68	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
72	MGD10/69	1	1	0	1	1	0	1	1	1	2	0	1	1	0	0	0
73	MGD10/70	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0
74	MGD10/74	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
75	MGD11/1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
76	MGD11/2	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0
77	MGD11/3	0	1	0	1	1	0	1	1	1	2	0	0	1	0	1	0
78	MGD11/4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
79	MGD11/5	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0
80	MGD11/6	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0
81	MGD11/7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
82	MGD11/8	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0
83	MGD11/9	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0

№ п.п.	Кристалл	Цилиндр	Октаэдр	Комб. рефл.	УИ	ПТ	Серп. рефл.	Мех. износ	Полигенез	Конус	Травление	Двойники	Шагрень	Штриховка	Регенерация	Сколы	Индукц. границы
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
84	MGD11/10	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0
85	MGD11/11	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0
86	MGD11/12	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0
87	MGD11/13	1	1	0	2	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0
88	MGD11/14	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0
89	MGD11/15	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0
90	MGD11/16	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
91	MGD11/17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
92	MGD11/21	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0
93	MGD11/22	0	1	0	1	2	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
94	MGD11/24	0	0	0	1	2	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0
95	MGD11/25	0	1	0	1	2	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
96	MGD11/30	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
97	MGD11/31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
98	MGD11/32	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
99	MGD11/33	1	1	0	1	1	1	1	1	1	2	0	0	0	0	0	0
100	MGD11/34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
101	MGD11/35	1	1	0	2	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
102	MGD11/36	1	1	0	0	0	0	0	1	0	2	0	1	0	1	1	0
103	MGD11/37	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
104	MGD11/38	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0
105	MGD11/39	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
106	MGD11/40	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0
107	MGD11/41	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0
108	MGD11/42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
109	MGD11/43	1	1	0	2	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0
110	MGD11/44	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0
111	MGD11/45	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0
112	MGD11/46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
113	MGD11/47	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
114	MGD11/48	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0
115	MGD11/49	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
116	MGD11/50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
117	MGD11/51	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0
118	MGD11/52	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0
119	MGD11/53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
120	MGD11/54	0	1	0	1	2	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
121	MGD11/55	0	1	0	1	2	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
122	MGD11/56-6	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
123	MGD12/1	1	1	0	2	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
124	MGD12/2	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0
125	MGD12/3	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

№ п.п.	Кристалл	Цилиндр	Октаэдр	Комб. рефл.	УИ	ПТ	Серп. рефл.	Мех. износ	Полигенез	Конус	Травление	Двойники	Шагрень	Штриховка	Регенерация	Сколы	Индукц. границ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
126	MGD12/4	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0
127	MGD13/1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
128	MGD13/2	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
129	MGD13/3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
130	MGD13/4	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
131	MGD14/1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
132	MGD14/2	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
133	MGD15/1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
134	MGD15/2	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
135	MGD16	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0
136	MGD17/1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
137	MGD17/2	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
138	MGD19/1	1	1	0	2	1	1	1	1	1	2	0	1	1	0	0	0
139	MGD19/2	1	1	0	0	0	0	0	0	1	2	0	1	0	0	0	0
140	MGD19/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1
141	MGD19/4	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
142	MGD19/5	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
143	MGD19/6-1	1	1	0	2	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0
144	MGD19/6-2	1	1	0	2	0	0	1	1	0	2	0	0	0	0	0	0
145	MGD19/6-3	0	1	0	1	0	0	1	1	1	2	0	1	0	0	0	0
146	MGD19/6-4	1	1	0	1	0	0	1	1	0	2	0	1	1	0	0	0
147	MGD19/6-5	1	1	0	1	0	0	1	1	0	2	0	1	0	0	1	0
148	MGD19/6-6	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
149	MGD19/6-7	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0
150	MGD19/6-8	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0
151	MGD19/7-1	1	1	0	0	2	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
152	MGD19/7-2	0	1	0	1	2	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0
153	MGD19/7-3	0	1	0	0	2	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
154	MGD19/7-4	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0
155	MGD19/7-5	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
156	MGD19/7-6	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
157	MGD19/7-7	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0
158	MGD19/7-8	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
159	MGD19/7-9	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0
160	MGD19/7-10	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0
161	MGD19/7-11	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
162	MGD19/7-12	0	1	0	2	2	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
163	MGD19/7-13	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
164	MGD19/7-14	0	0	0	2	0	0	1	0	0	2	1	0	0	0	0	0
165	MGD19/7-15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
166	MGD20/1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0
167	MGD20/2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0

№ п.п.	Кристалл	Цилиндр	Октаэдр	Комб. рефл.	УИ	ПТ	Серп. рефл.	Мех. износ	Полигенез	Конус	Травление	Двойники	Шагрень	Штриховка	Регенерация	Сколы	Индукц. границы
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
168	MGD20/3	1	1	0	1	0	0	1	1	0	2	0	1	1	0	0	0
169	MGD20/4	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0
170	MGD20/5	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
171	MGD21/1	0	1	0	1	2	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
172	MGD21/2	0	1	0	0	2	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
173	MGD21/3	0	1	0	1	2	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
174	MGD21/4	1	1	0	1	2	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
175	MGD21/5	0	1	0	1	2	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0
176	MGD21/6	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0
177	MGD21/7	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0
178	MGD22/1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
179	MGD22/2	1	1	0	0	2	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
180	MGD22/3	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
181	MGD22/4	1	1	0	2	0	0	1	1	0	2	0	1	1	0	0	0
182	MGD22/5	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0
183	MGD22/6	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
184	MGD23/1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0
185	MGD23/2	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0
186	MGD23/3	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0
187	MGD23/4	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0
188	MGD23/5	0	1	0	2	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0
189	MGD23/6	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0
	Σ	91	122	2	120	91	8	138	117	41	145	15	93	89	32	47	4
	Σ, %	53	71	1	70	53	5	80	68	24	84	8	49	47	17	25	2

ческого воздействия и травления отмечается на 114 кристаллах (66%), физиографический признак наличия полос пластической деформации – только у 22 кристаллов, что составляет только 24% от тех алмазов, для которых характерен рефлекс пластического течения. Точно так же штриховка, часто связанная с пластическими деформациями, обнаружена только на 53 кристаллах (59%). Вероятно, незначительный ударный износ позволил сохраниться признаку пластического течения структуры на многих кристаллах бассейна р. Макаубас.

Рассмотрим особенности поверхности некоторых кристаллов из бассейна р. Макаубас.

Кристалл D1. Крупный октаэдр массой 83 мг представляет собой монокристалл октаэдрической формы (рис. 7.1). На кристалле присутствуют все грани октаэдра, на которых, особенно вблизи ребер, отмечается штриховка. На гномограмме регистрируются признаки кинетического травления. Одновременно на некоторых участках поверхности алмаза начинает

Параметры формы растворения кристаллов бассейна р. Макаубас

Номер строки в табл. 7.2	Кристалл	Параметры эллипсоида			
		A_2	A_3	α , град	Кол-во рефлексов
10	D10	1,24	1,39	5,3	4
11	MGD10/1	1,22	1,48	5,4	4
14	MGD10/4	1,45	1,44	3,5	4
16	MGD10/6	1,29	1,51	4,9	4
17	MGD10/7	1,28	1,39	5,6	4
20	MGD10/10	1,23	1,45	4,7	3
42	MGD10/35	1,29	1,47	4,0	4
49	MGD10/43	1,31	1,64	4,0	2
75	MGD11/1	1,24	1,55	4,1	5
91	MGD11/17	1,39	1,52	5,0	3
125	MGD12/3	1,20	1,42	4,8	4
134	MGD15/2	1,26	1,47	4,0	4
	МО (СКО) k	1,31 (0,06) 0,044	1,58 (0,10) 0,066	5,0 (0,9) 0,186	

образовываться двойниковый шов, что указывает на переход к диффузионному режиму травления. На фото фрагмента поверхности алмаза хорошо видно, что в результате кинетического травления на выходе оси L_4 формируется участок цилиндрической поверхности (см. рис. 7.1, б), который не может быть объяснен механической обработкой. Тем не менее признак ударного износа, предшествующего травлению, присутствует на гномограмме (см. рис. 7.1, в).

Кристалл D3 – додекаэдроксид с протравленной поверхностью (рис. 7.2). На некоторых гранях отмечаются примазки неясного происхождения. Гранный шов на поверхности грани додекаэдроиды, чистой от примазок, слегка угадывается. По гномограмме кристалла можно сделать вывод в основном о диффузионном травлении кристалла. Кинетический режим травления не наблюдается. Хаотический механический износ кристалла также предшествовал травлению. С небольшой вероятностью можно допустить прошедшую на ранних этапах пластическую деформацию структуры кристалла, однако ясных признаков этого процесса не сохранилось.

Кристалл MGD10/13 – обломок неправильной формы (рис. 7.3). С одной стороны просматривается поверхность додекаэдроиды (см. рис. 7.3, б). На кристалле отчетливо виден интенсивный хаотический износ поверхности, предшествовавший также интенсивному травлению. Характерная форма вытянутых треугольноподобных рефлексов додекаэдроиды позволяет предположить пластические деформации структуры, произошедшие на стадии первичного растворения алмаза. Травление обладает яркими признаками одновременно хаотического и диффузионного режимов. На последней стадии полирующего износа кристалл

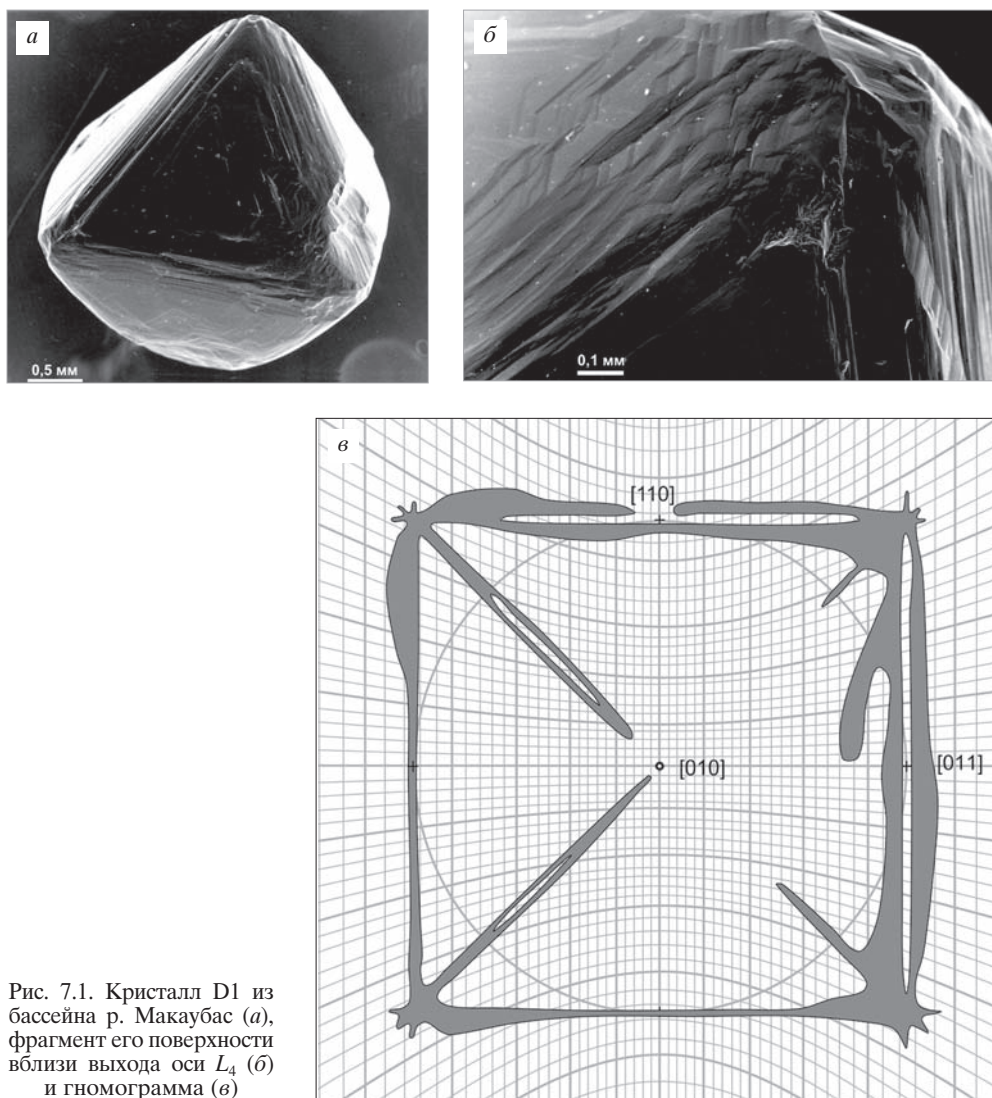


Рис. 7.1. Кристалл D1 из бассейна р. Макаубас (а), фрагмент его поверхности вблизи выхода оси L_4 (б) и гномограмма (в)

был обработан только с одной стороны, что привело к размыванию рефлексов травления (см. рис. 7.3, б). Другая сторона алмаза оказалась защищенной и сохранила тонкие особенности смешанного режима травления (см. рис. 7.3, в).

Кристалл MGD10/23-5 имеет сложную поверхность, однако проекция нормалей к поверхности свидетельствует о небольших по интенсивности хаотическом износе поверхности и кинетическом травлении, затронувших алмаз (рис. 7.4). Изображение алмаза не согласуется с относительно простой картиной рефлексов.

Рассмотрим серии похожих рефлексов от поверхностей алмазов бассейна р. Макаубас.

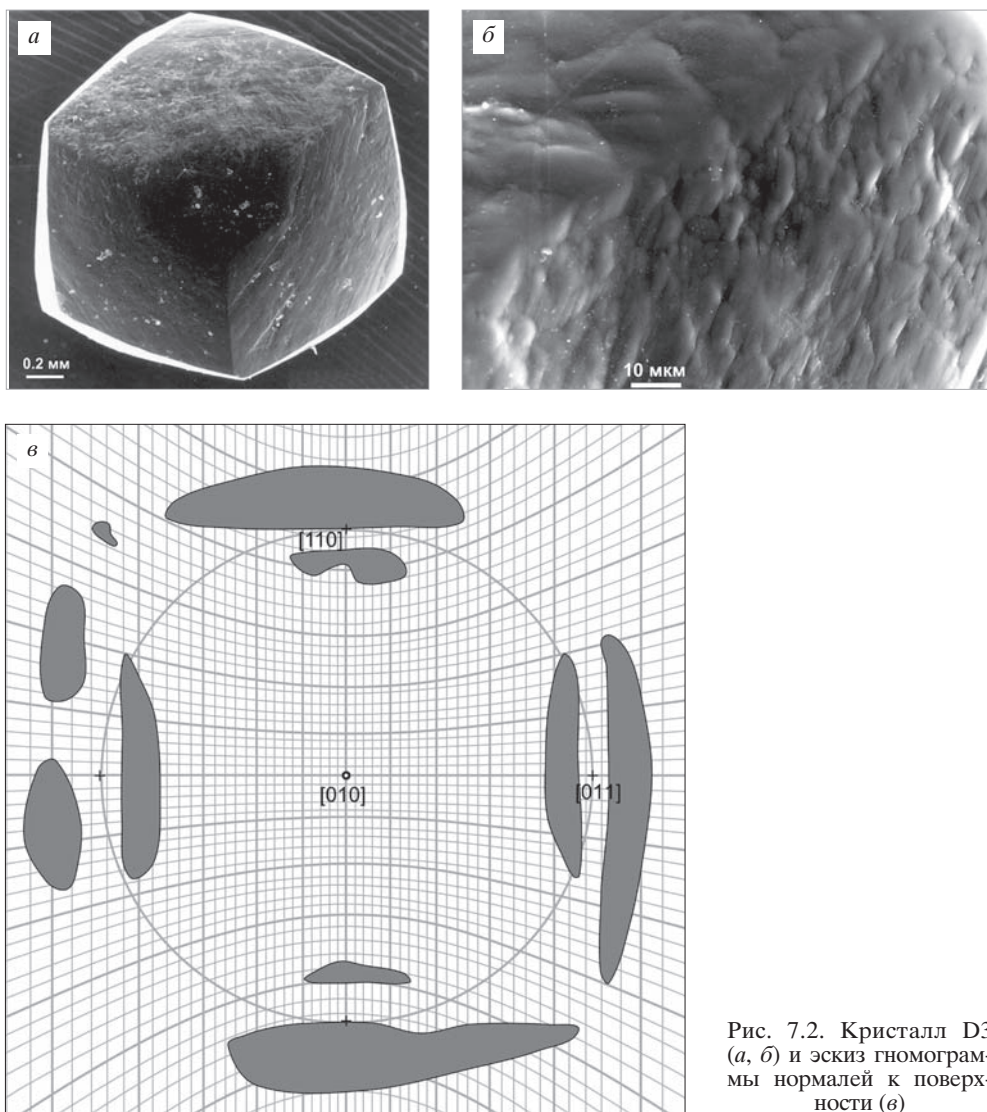


Рис. 7.2. Кристалл D3 (а, б) и эскиз гномограммы нормалей к поверхности (в)

Кристалл MGD10/28 – возможно, двойник прорастания (рис. 7.5). Поверхность алмаза частично покрыта удлиненными аксессуарами регенерации, которые были подвергнуты комплексному воздействию разных факторов незначительной интенсивности. Резкое различие в интенсивностях рефлексов указывает на то, что яркие участки образованы поверхностями видоизмененных аксессуаров регенерации, а слабоосвещенные – участками трансформированной первичной поверхности растворения. Расширенный треугольный рефлекс свидетельствует о хаотическом механическом износе и, возможно, пластическом течении структуры. Смещение максимума интенсивности к стороне АВ рефлекса обычно связано с диффузионным

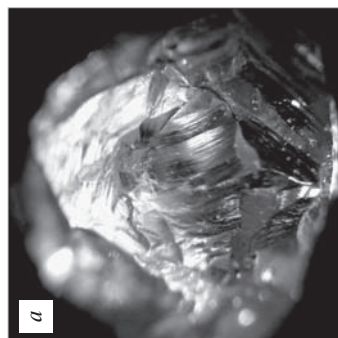
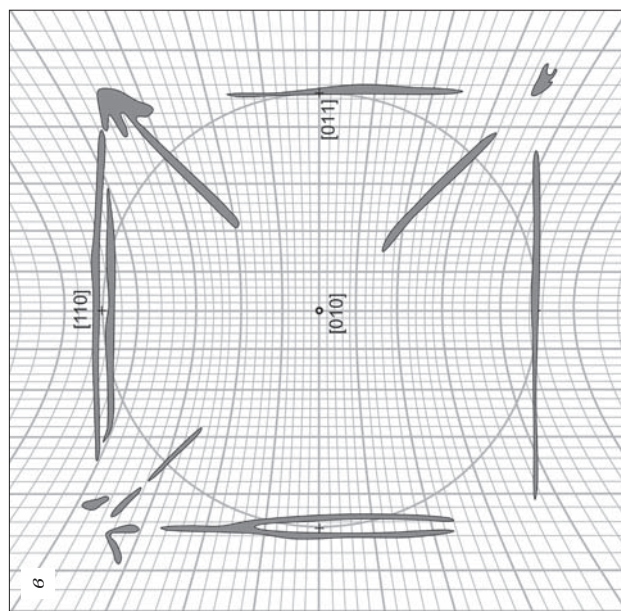
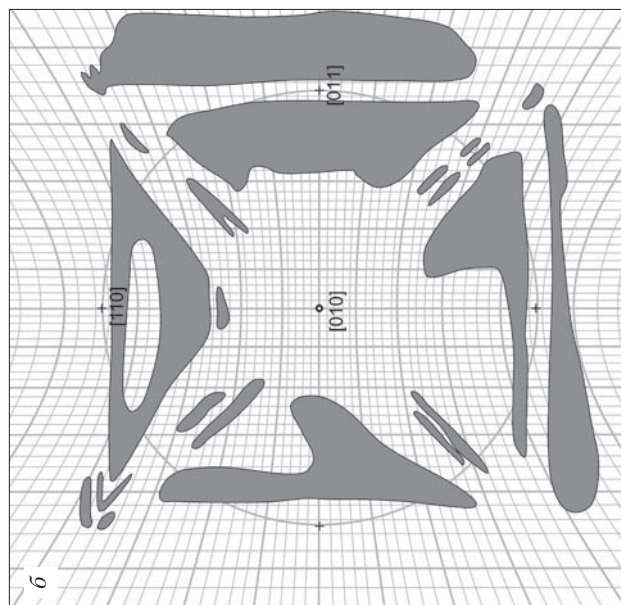


Рис. 7.3. Алмаз-обломок MGD10/13 (а) и две его гномограммы в разных ракурсах (б, в)



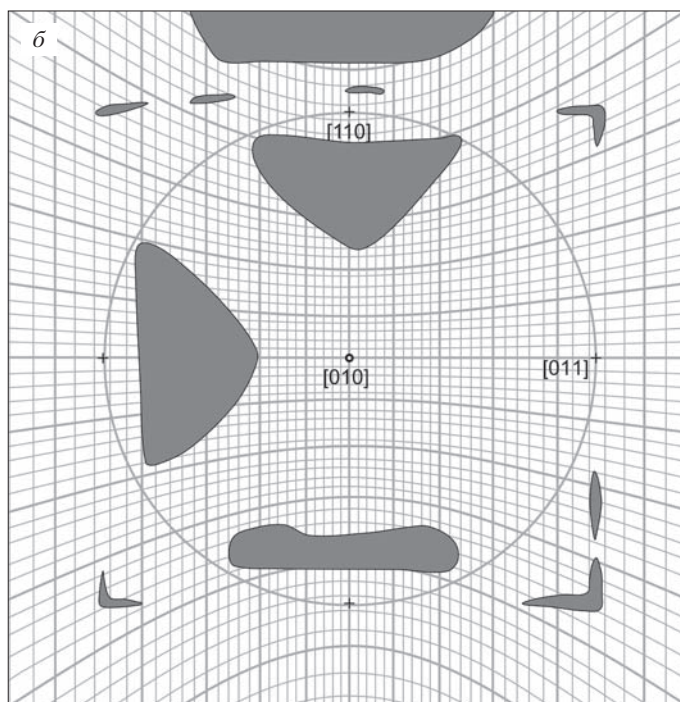
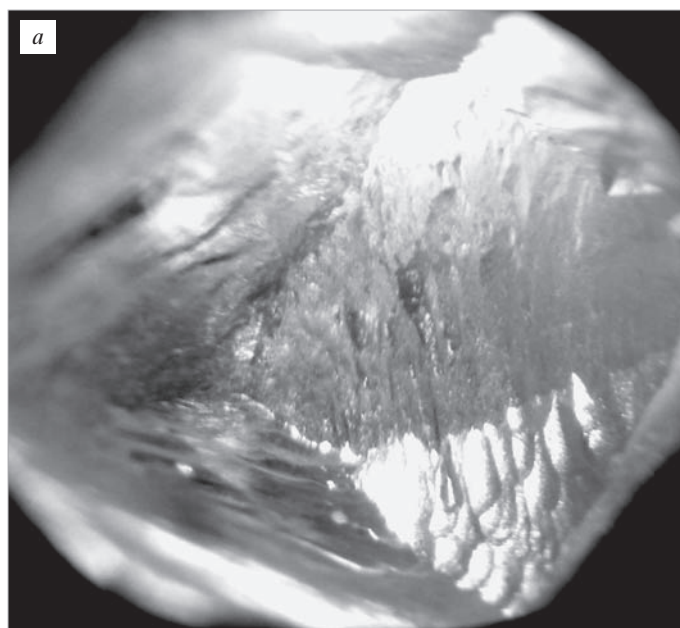


Рис. 7.4. Кристалл MGD10/23-5 (а) и эскиз его гномограммы (б)

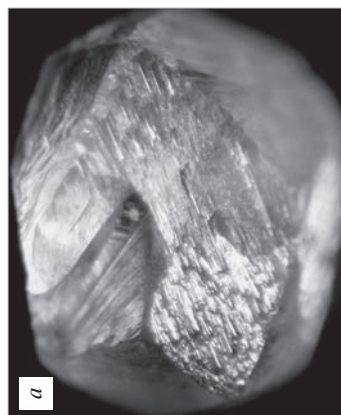
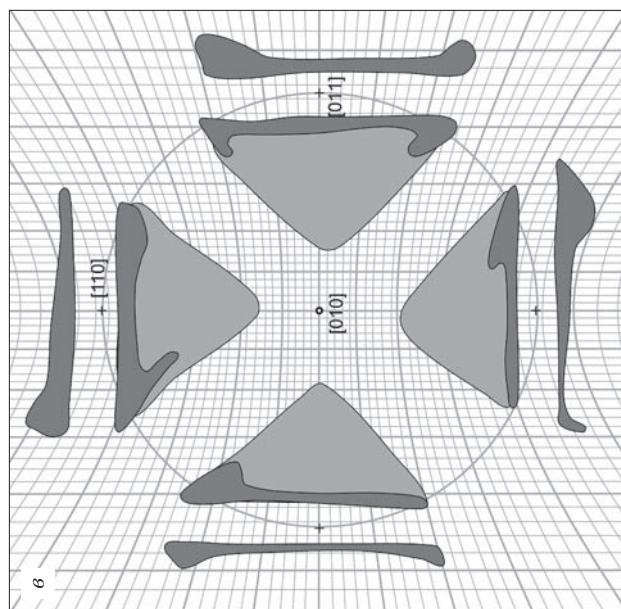
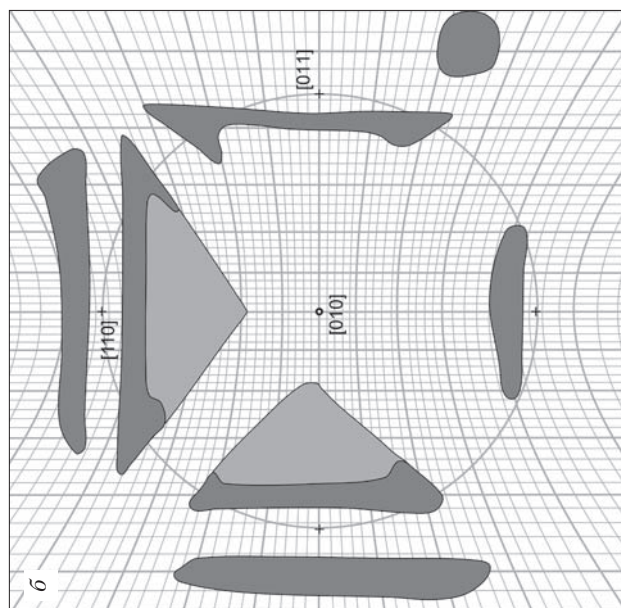


Рис. 7.5. Кристалл MGD10/28 (а) и эскизы гномограммы нормалей к поверхности кристаллов MGD10/28 (б) и MGD14/2 (в)



травлением. Однако другие признаки травления отсутствуют на кристалле. Тем не менее травление нельзя исключить, поскольку ясно очерченный гранный шов может быть обусловлен растворением или диффузионным травлением. Подобный рефлекс наблюдался для кристаллов MGD10/61 (см. рис. 4.16) и MGD14/2 (см. рис. 7.5, в). Во всех этих случаях важную роль сыграла регенерация алмаза.

Кристаллы MGD10/38, MGD10/45. Додекаэдрониды с шероховатой поверхностью обладают линейными рефлексами (рис. 7.6, 7.7), образованными в результате диффузионного травления и слабого механического износа. На кристаллах не просматривается гранный шов, однако, согласно гномограммам, он существует и двугранный угол при нем достигает $6-7^\circ$ для кристалла MGD10/38 и 4° для MGD10/45. Линейные рефлексы данных кристаллов можно считать следующей стадией эволюции рефлекса, изображенного на рис. 7.5, 4.16, 4.17. При этом освещенность поля треугольного рефлекса падает до нуля, а форма рефлекса приближается к линии. Около 12 кристаллов данной выборки демонстрируют похожие рефлексы. Связь данного типа рефлекса с диффузионным травлением прослеживается на гномограмме кристалла MGD11/32 (рис. 7.8, а). Иногда травление с диффузионного режима переходит к кинетическому, и тогда гранный шов на некоторых участках поверхности исчезает (рис. 7.8, б). На поверхности, прилегающей к выходу осей третьего порядка, вокруг плоских сеток октаэдра, как было отмечено выше, обычно развивается кинетически лимитированный режим травления. Поэтому при активизации травления здесь формируются независимо от других поверхностей плоские сетки структурно важных F- и S-граней алмаза, а также сателлитные рефлексы (рис. 7.8, в, г). Если, наоборот, активизируется полирующий механический износ, то линейные рефлексы уширяются и их форма стремится к предельной форме хаотического износа алмаза (рис. 7.8, д). Интенсивность света от диффузно отражающих поверхностей снижается, а поверхность кристалла приобретает хорошо известные признаки ударного износа – ромбические трещины (рис. 7.8, е). На кристалле MGD22/3 в результате полировки шагреновой поверхности после травления вновь проявился гранный шов, однако он должен исчезнуть, если механический износ алмаза продолжится. Описанная трансформация светового рефлекса от шероховатой поверхности додекаэдроида осуществляется при любой последовательности диффузионного травления и хаотического износа. Исходная шероховатость поверхности может быть связана как с начальным интенсивным износом алмаза, так и с регенерацией. Важно отметить, что в данном случае при образовании линейных рефлексов на экране параболического гониометра травление происходит не по предельной форме ударного износа. Линейный рефлекс является отражением цилиндрической поверхности, которая, согласно диффузионной модели травления, может быть описана тензором устойчивости типа (3.17). Однако главная система координат тензора устойчивости в этом случае оказывается повернутой на угол, составляющий половину угла при гранном шве в точке выхода оси второго порядка из алмаза. Например, для кристалла MGD10/45 (см. рис. 7.7) поверхность травления может быть описана тензором устойчивости вида

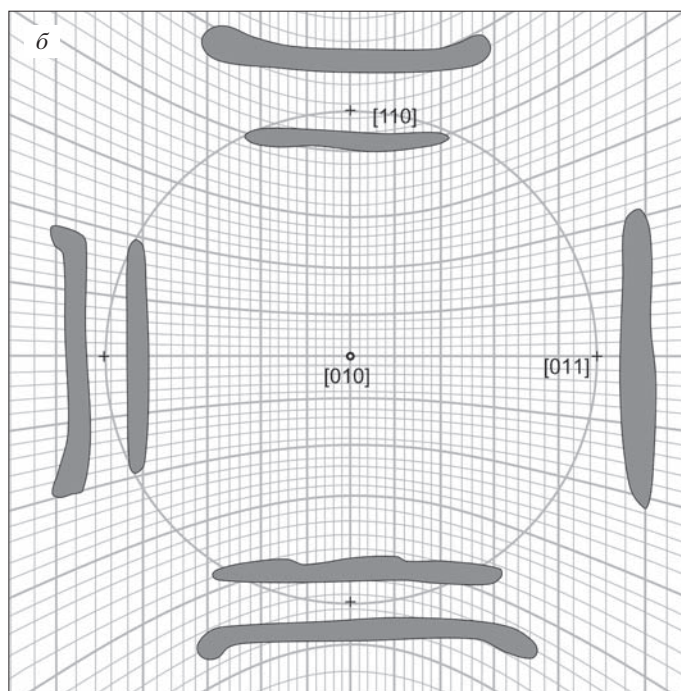
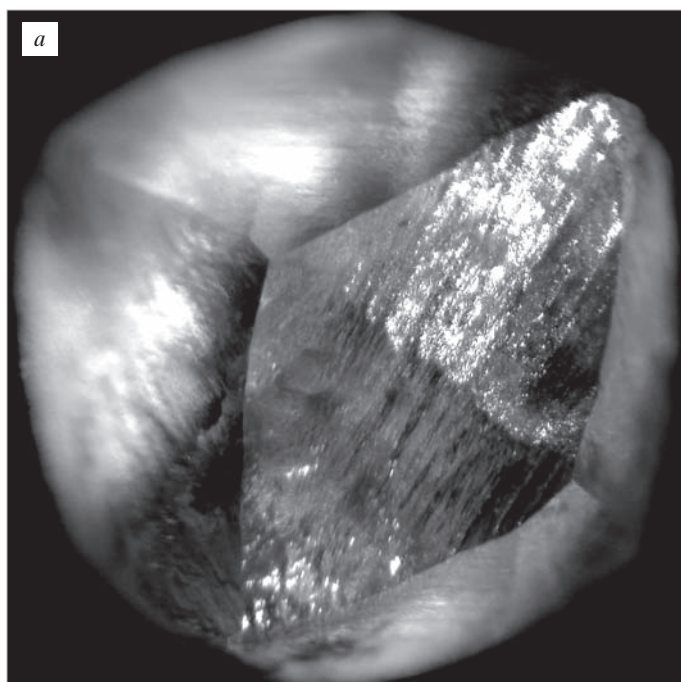


Рис. 7.6. Кристалл MGD10/38 (*a*) и его гномограмма (*б*)

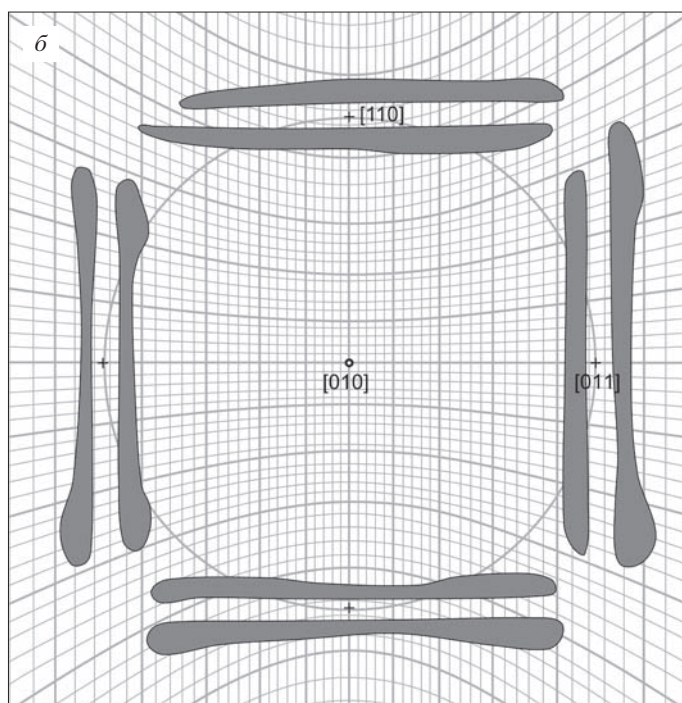
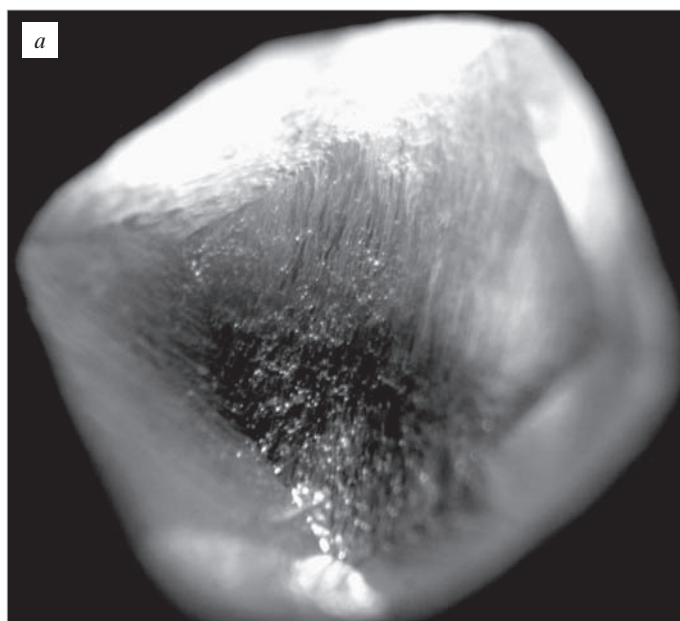


Рис. 7.7. Кристалл MGD10/45 (*a*) и его гномограмма (*б*)

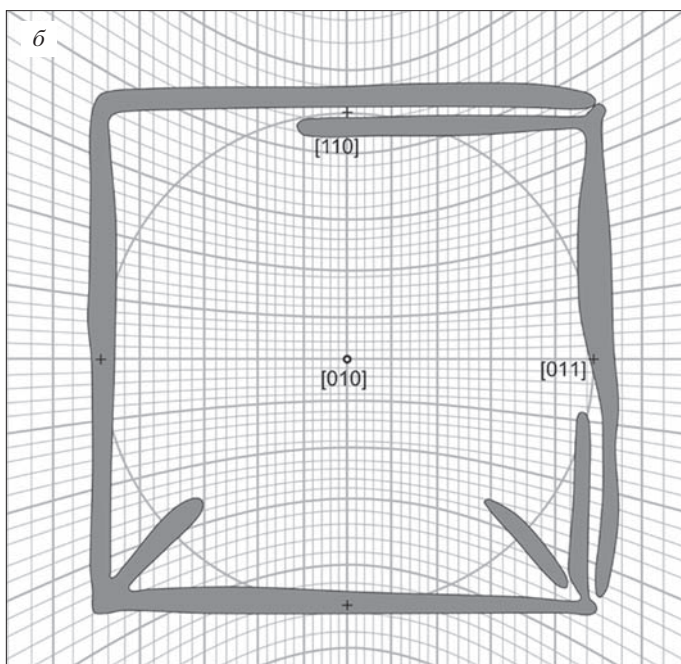
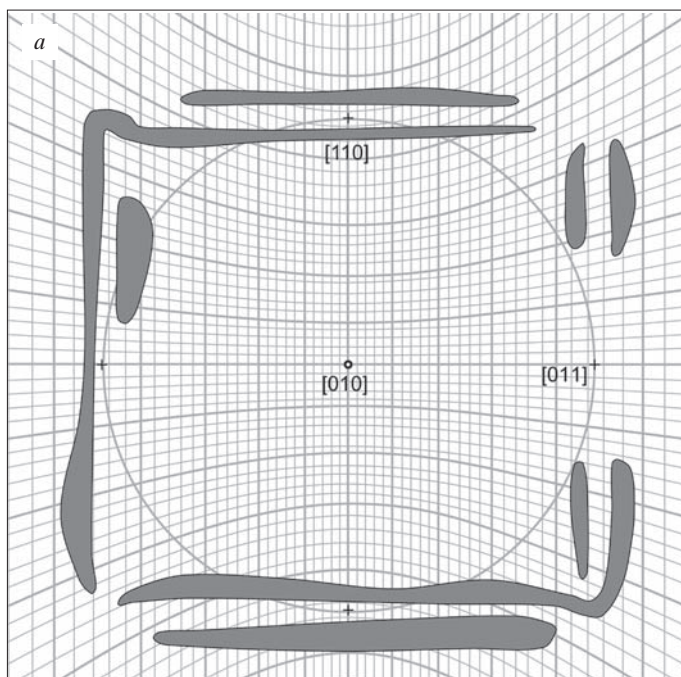
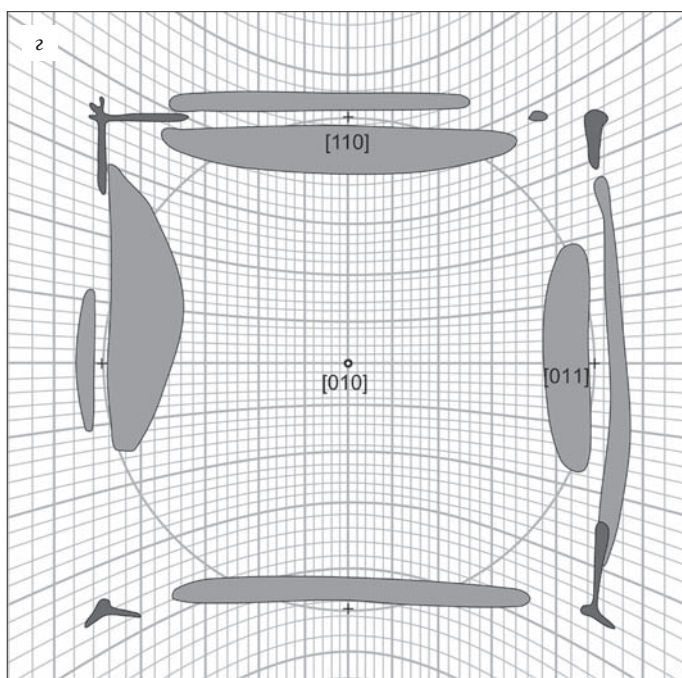
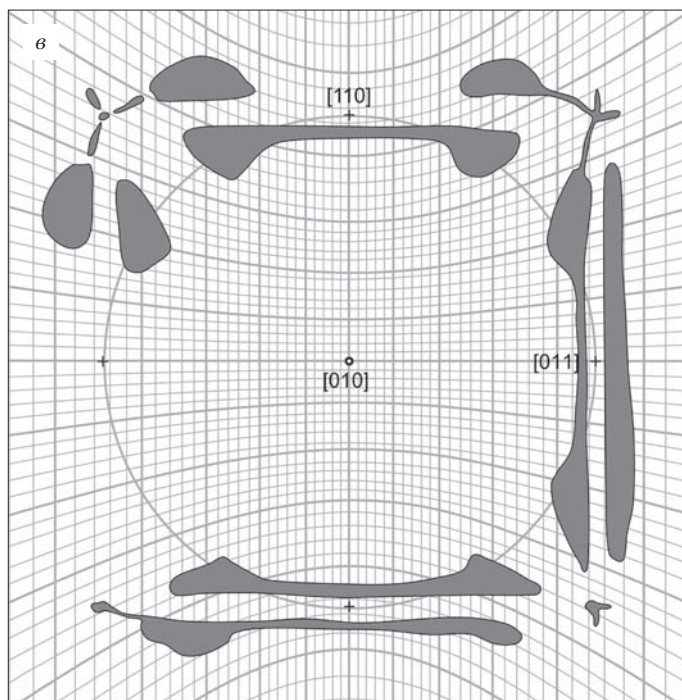
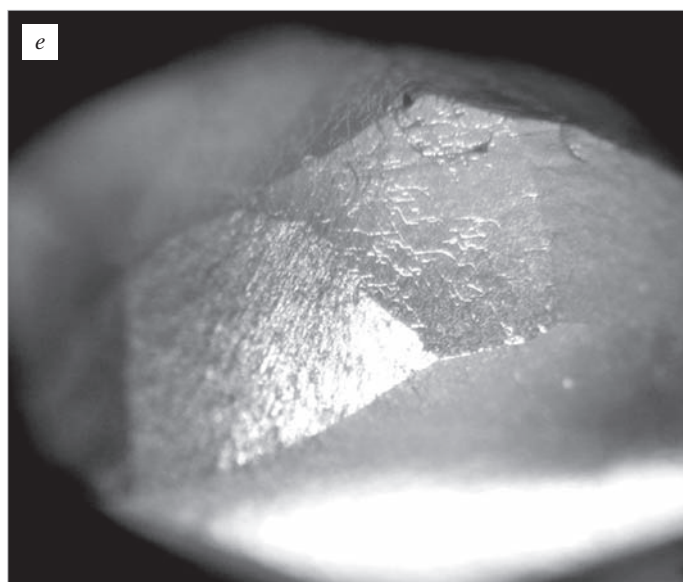
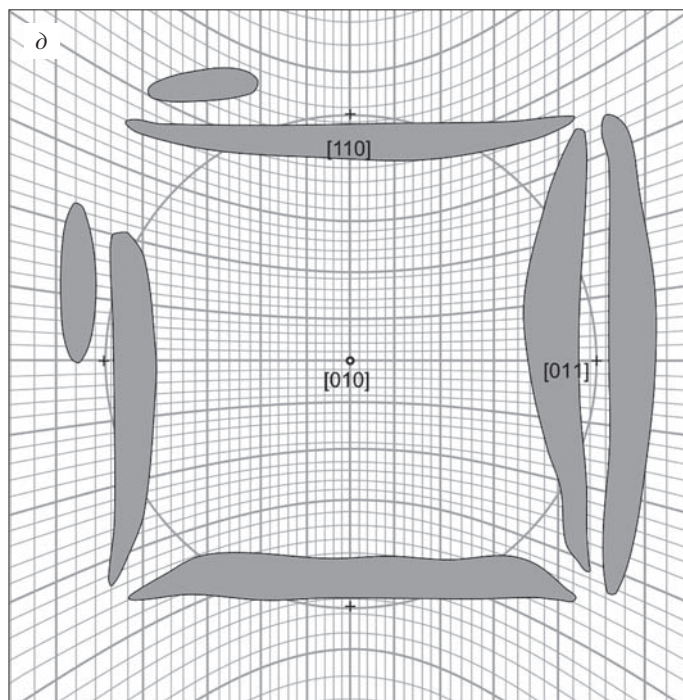


Рис. 7.8. Гномограммы кристаллов MGD10/32 (а), MGD10/40 (б), MGD19/6-3 (в), MGD11/14 (г), MGD22/3 (д) и поверхность кристалла MGD22/3 (е)



Продолжение рис. 7.8



Окончание рис. 7.8

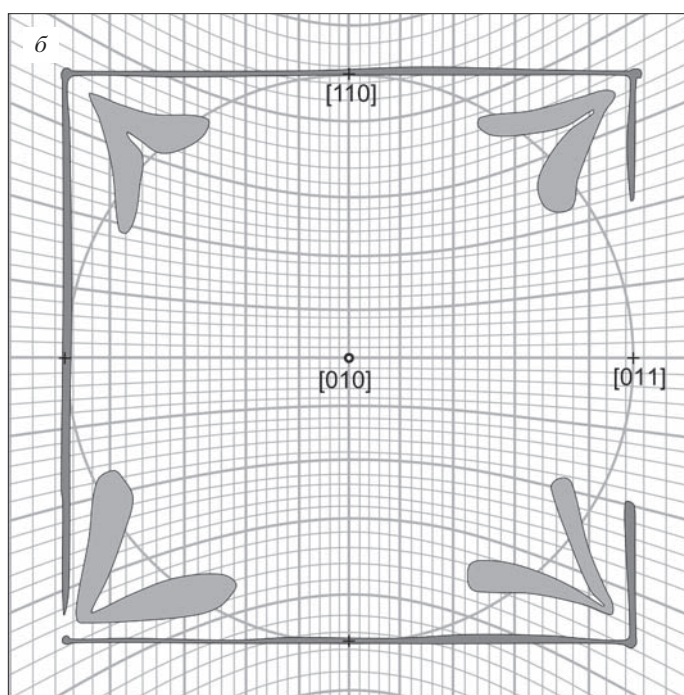
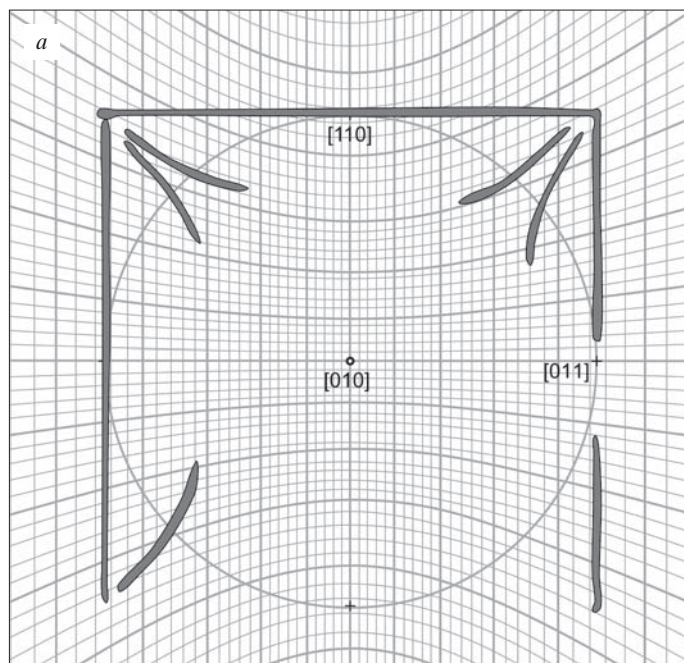
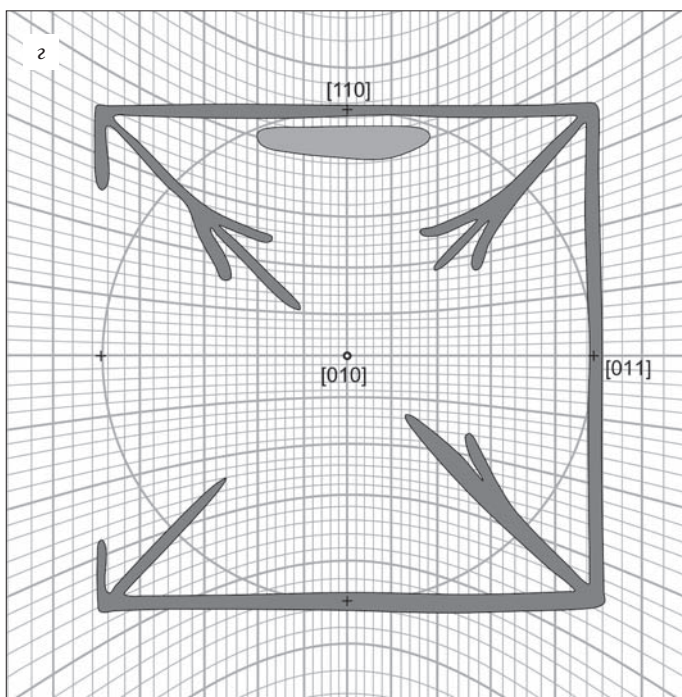
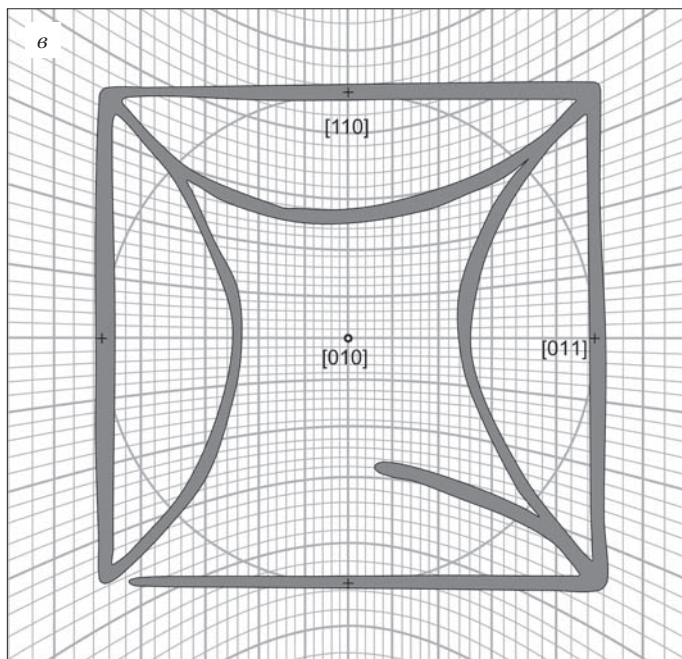


Рис. 7.9. Полярные комплексы
MGD10/15 (*б*), MGD19/6-5 (*а*),



кристаллов MGD10/34 (а),
MGD20/3 (z)

$$T_{ij} = \begin{vmatrix} T_1 \cos^2 \alpha' & 0 & T_1 \cos \alpha' \sin \alpha' \\ 0 & T_2 & 0 \\ T_1 \cos \alpha' \sin \alpha' & 0 & T_1 \sin^2 \alpha' \end{vmatrix}, \quad (7.1)$$

где $\alpha' = 45 - \alpha = 43^\circ$, угол при гранном шве $\alpha = 2^\circ$, $T_1/T_2 = 1,2$. Отношение компонентов тензора определяется угловой протяженностью линейного рефлекса. Если длина рефлекса $70^\circ 30'$, то отношение ненулевых компонентов равно 1. В описываемом случае средняя угловая длина рефлекса составляет 58° .

Смешанный режим травления алмаза, обладающего предельной формой ударного износа, подробно обсуждавшийся в главе 5 на примере кристаллов MGD19/6-2 и MGD19/6-4 (см. рис. 5.10, 5.11), характерен для многих кристаллов бассейна р. Макаубас (рис. 7.9). Предельная форма хаотического износа в ходе травления трансформируется в контурную линию, образованную с одной стороны поверхностью цилиндра (линия тригонтриоктаэдров), простирающуюся непосредственно до плоскостей октаэдра, а с другой – конусом с предельными параметрами (ось конуса направлена под углом 22° к оси четвертого порядка, что близко к направлению $\langle 025 \rangle$, образующая составляет 49°). Поверхность этого конуса включает в себя составные части (компликационные формы), две плоские сетки $\{111\}$ и одну $\{021\}$, и является фрагментом поверхности додекаэдроиды износа (см. главу 4, рис. 4.15). Отсутствие освещенности в основном поле рефлекса предельного ударного износа обусловлено только травлением. Существование двух типов поверхности травления – цилиндра и конуса – не может быть описано в рамках одной диффузионной модели травления.

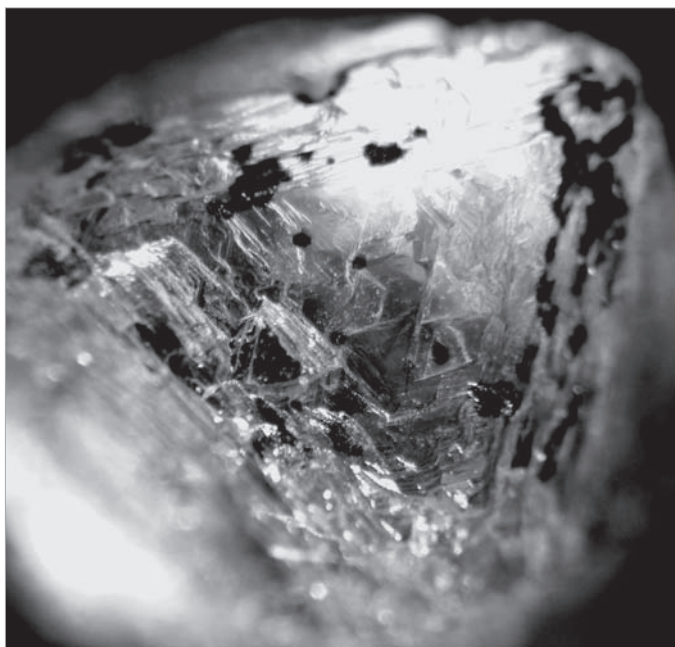


Рис. 7.10. Поверхность кристалла MGD20/3. На фото видны ямки травления обратнопараллельной ориентации и многочисленные пятна пигментации

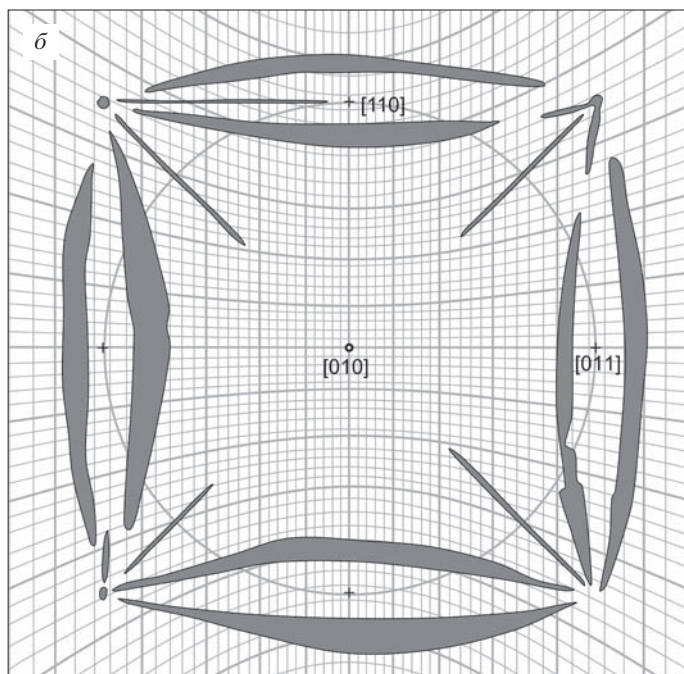
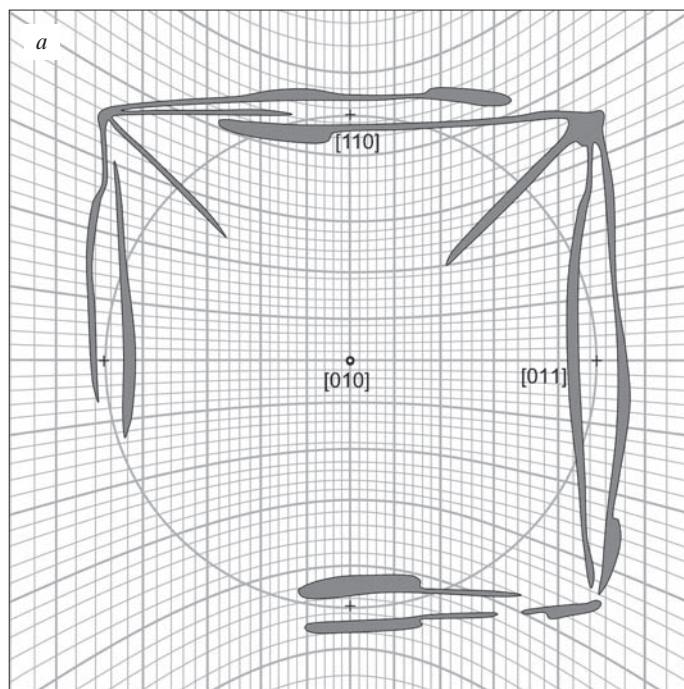


Рис. 7.11. Гномограммы кристаллов MGD10/11 (а) и MGD10/12 (б)

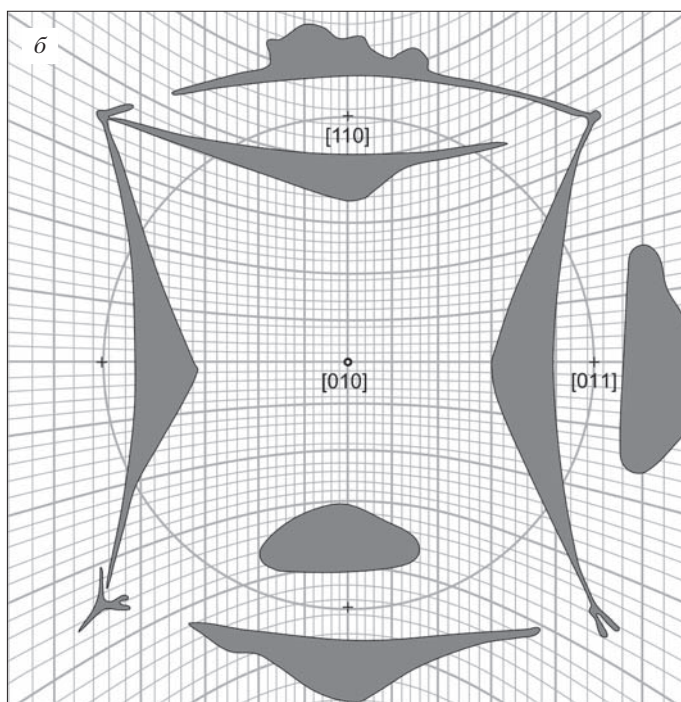
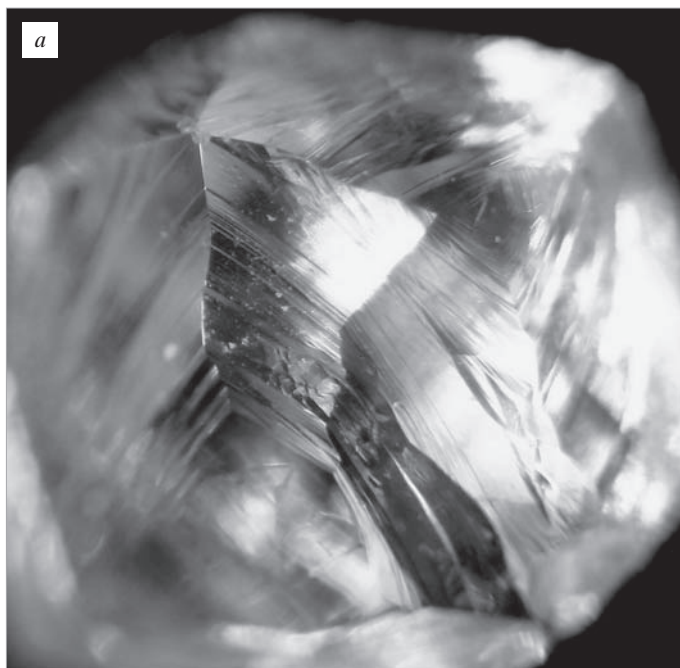


Рис. 7.12. Кристалл MGD21/5 (а) и его гномограмма (б)

Поэтому необходимо признать одновременное сосуществование диффузионного травления, производящего поверхность цилиндра в центре додекаэдронных граней, и кинетического травления на ребрах додекаэдроида, где создаются участки конической поверхности. Чем ближе облик кристалла к ромбододекаэдру (додекаэдрониду), тем более точно будет выполняться описанный смешанный режим травления в целом мелкошагреневой поверхности алмаза, а на экране гониометра будет наблюдаться рефлекс (см. рис. 4.14, *а* или 7.9).

На рис. 7.10 изображен участок поверхности алмаза MGD20/3 с ямками травления и пятнами коричневой пигментации радиационного генезиса. Пятна находятся в приповерхностном слое кристалла и локализуются закономерным образом по линиям ребер и точкам вершин октаэдра, что согласуется с послойным механизмом роста октаэдра алмаза на стадии регенерации и накоплением дефектов и примесей (включая радиационную) по линиям ребер и точкам вершин.

Нестационарное диффузионное травление кристалла, приводящее к образованию конических поверхностей с разными параметрами, как было описано в главе 5, наблюдалось на 41 алмазе бассейна р. Макаубас. На 8 кристаллах конические поверхности составляли основную часть поверхности (рис. 7.11).

Сочетание конуса нестационарного диффузионного травления и остаточной поверхности эллипсоида, модифицированной пластическим течением структуры, можно наблюдать на кристалле MGD21/5 (рис. 7.12). Штриховка на гранях додекаэдроида вызвана сдвиговыми деформациями структуры, а на этом неровном рельефе формируются участки конической поверхности травления. Судя по гномограмме, вблизи граней октаэдра они проявляются наиболее ярко.

Из 189 кристаллов бассейна р. Макаубас только 12 алмазов (7%) сохранили первичную гладкую поверхность квазиравновесного растворения (см. табл. 7.3). Расчет среднестатистических параметров – математического ожидания и среднеквадратичного отклонения – произведен по модели логнормального распределения. Небольшие коэффициенты вариации обобщенных параметров эллипсоида могут служить признаком единой истории растворения этих кристаллов в глубинах литосферы. Сопоставление с показателями форм растворения алмазов других алмазоносных провинций выполнено в главе 9.

7.2. АЛМАЗЫ ДРУГИХ ПРОВИНЦИЙ БРАЗИЛИИ

Рассмотрим несколько групп кристаллов алмазов, добытых из алмазоносных проявлений, не связанных с бассейном р. Макаубас (табл. 7.4, 7.5).

7.2.1. Кристаллы из россыпи р. Зеленая. Штат Минас Жерайс

Два кристалла серии MGD18, представляющие собой обломки, содержат небольшие фрагменты поверхности, свидетельствующие о травлении и предельном механическом износе (рис. 7.13). Единственная грань додекаэдроид, обладающая признаком механического износа предельного типа, наблюдается на кристалле MGD18/1. Кристалл MGD18/4 имеет грань куба, расположенную на отрицательном рельефе в ямке травления, что может

Таблица 7.4

Кристаллы различных алмазоносных участков Бразилии

№ п.п.	Кристалл	Описание
1	MGD18/1	Додекаэдроид, обломок, износ и травление
2	MGD18/4	Неправильная форма. Есть грани куба
3	MtGrDn1	Нет описания
4	MtGrDn2	То же
5	MtGrDn3	—”—
6	MtGrDn4	—”—
7	MtGrDn5	—”—
8	MtGrDn6	—”—
9	Жуина-1	Обломок, регенерированный плоский мех, полировка
10	Топ-01	Гладкий додекаэдроид с гранями октаэдра, травление
11	Топ-02	Гладкий додекаэдроид
12	Топ-03	Додекаэдроид со штриховкой по [110] линии конуса
13	Топ-04	Обломок гладкого округлого кристалла
14	Топ-05	Уплощенный октаэдроид, регенерация, макроступени. Гномограммы нет
15	Топ-06	Уплощенный октаэдроид с тонкой шагренью
16	Топ-07	Октаэдроид, тонкий износ. Гномограмма как у Топ-11
17	Топ-08	Обломок, металлический блеск
18	Топ-09	Желтый осколок, регенерация. Гномограммы нет
19	Топ-10	Крупный додекаэдроид с грубой штриховкой. Зеленые пятна и включения
20	Топ-11	Додекаэдроид с шагренью. Включение
21	URSA-1	Осколок додекаэдра. Нет гномограммы
22	URSA-2	Октаэдроид с регенерационным рельефом. Нет гномограммы
23	URSA-3	Додекаэдроид гладкий
24	ZMP-02	Додекаэдр с травлением
25	BAR-01	Додекаэдроид изометричный
26	BAR-02	Поликристалл. Нет гномограммы
27	MAC-7	Два из семи кристаллов додекаэдры, для одного сделана гномограмма
28	«Баллас»	Округлый кристалл

Морфологические признаки кристаллов Бразилии

№ п.п.	Кристалл	Цилиндр	Октаэдр	Комб. рефл.	УИ	ПТ	Серп. рефл.	Мех. износ	Полигенез	Конус	Кин. травл.	Диф. травл.	Комб. травл.	Шагрень	Штриховка	Регенерация	Сколы
1	MGD18/1	1	1	0	2	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
2	MGD18/4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	MtGrDn1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	2	0	0	0	0	0	0
4	MtGrDn2	1	1	0	1	0	0	1	1	0	2	0	0	0	0	0	0
5	MtGrDn3	1	1	0	2	0	0	1	1	0	2	1	1	0	0	0	0
6	MtGrDn4	1	1	0	2	2	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
7	MtGrDn5	1	1	0	2	1	0	1	1	0	2	1	1	0	0	0	0
8	MtGrDn6	1	1	0	2	1	0	1	1	0	1	2	1	0	0	0	0
9	Жуина-1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1
10	Ton-01	1	1	0	1	2	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0
11	Ton-02	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
12	Ton-03	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0
13	Ton-04	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1
14	Ton-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
15	Ton-06	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	1	0	0	0
16	Ton-07	1	1	0	2	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0
17	Ton-08	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1
18	Ton-09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
19	Ton-10	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
20	Ton-11	1	1	0	2	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0
21	URSA-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1
22	URSA-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
23	URSA-3	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	ZMP-02	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	2	0	0	0	1	0
25	BAR-01	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0
26	BAR-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	MAC-7	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
28	«Баллас»	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0

быть связано с кинетическим травлением (см. рис. 7.13, б). Однако других морфологических признаков, кроме граней октаэдра, куба и линии тетрагонтриоктаэдров, связанной с цилиндрической поверхностью боковых стенок ямки травления, на кристалле MGD18/4, не наблюдается. Все эти признаки могут быть одновременно отнесены к одному процессу – кинетическому травлению.

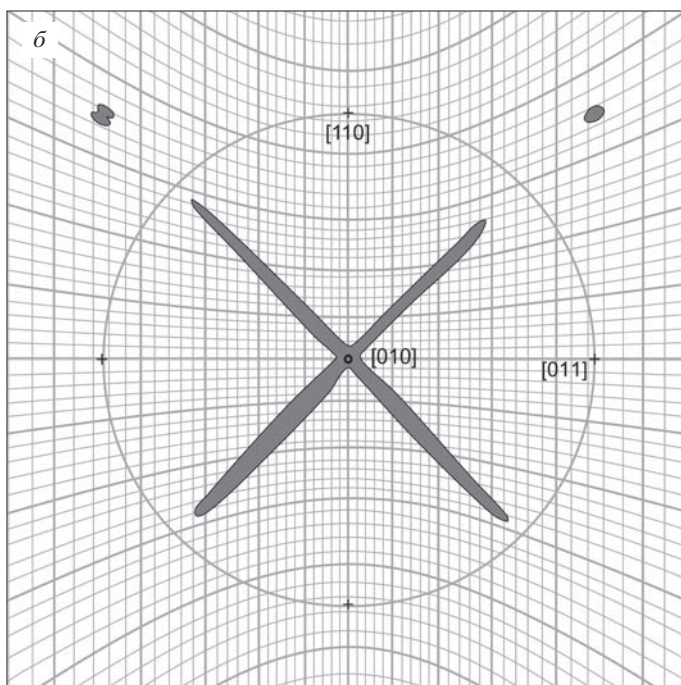
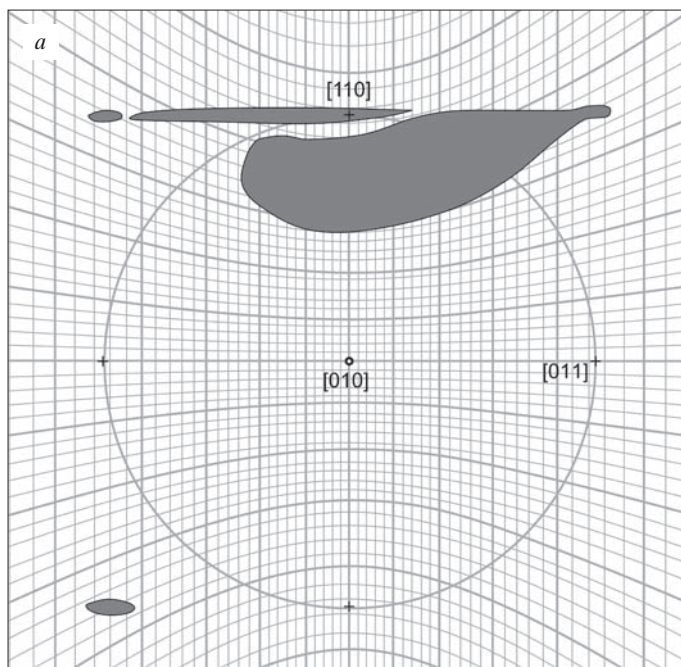


Рис. 7.13. Полярные комплексы нормалей к поверхности кристаллов MGD18/1 (а), MGD 18/4 (б)

7.2.2. Кристаллы штата Мату Гроссу

Шесть изученных кристаллов серии MtGrDn обладают рядом общих черт (рис. 7.14). Во-первых, ни один из кристаллов не сохранил базисную поверхность растворения. Во-вторых, на гранях всех кристаллов ярко проявляются признаки сильного травления в смешанном режиме. В-третьих, первичная поверхность эллипсоида еще до этапа травления была значительно механически изношена. На трех кристаллах отмечается предельная степень износа. В-четвертых, все кристаллы имеют признаки заключительной механической полировки. Признаки пластического течения структуры, если оно и происходило на ранних этапах развития формы одновременно с растворением, потом оказались стерты в результате хаотического износа и травления. Сходство основных морфологических признаков свидетельствует о единстве происхождения кристаллов данной совокупности.

Алмазы поля Жуина представляют собой прозрачные обломки и осколки алмазов с небольшими и редкими фрагментами округлых поверхностей, а также округлые дымчатые на просвет сероватые сростки. Несколько кристаллов имеют поверхности предположительно искусственного происхождения и признаки алмазной резки. Из 55 кристаллов алмазоносного поля Жуина 10 представляют собой спайные осколки и обломки, 8 – обломки с раковистым изломом и техногенными сколами, 7 – обломки с явными физиографическими признаками естественного механического износа, 6 – обрезки (?), 24 – округлые блочные монокристаллы и сростки. На естественных поверхностях кристаллов редко наблюдаются элементы симметрии. Кристаллов, пригодных для гониометрического анализа поверхности, практически нет. На экране гониометра регистрируются размытые диффузные рефлексы октаэдра и цилиндрической поверхности, иногда неправильные пятна света, располагающиеся на месте рефлекса первичного эллипсоида растворения, и серповидные рефлексы блочной поверхности, что указывает на механическую обработку поверхности на заключительном этапе эволюции кристаллов. На рис. 7.15 приведена гномограмма одного обломка алмаза из провинции Жуина. Кристалл имеет признаки хаотического износа, пластического течения структуры и травления смешанного типа. Алмаз испытал два этапа хаотического износа – перед травлением и после него. Первый этап был более значительным и развивался по поверхности растворения, модифицированной небольшим пластическим течением структуры. Заключительный этап полировки создал диффузный рассеивающий эффект на экране гониометра, не показанный на гномограмме. Описанная последовательность эволюции формы отдельного индивида, по-видимому, характерна для большинства изученных кристаллов из коллекции Жуина. По комплексу полярных признаков кристалл поля Жуина похож на кристаллы серии MtGrDn1-6.

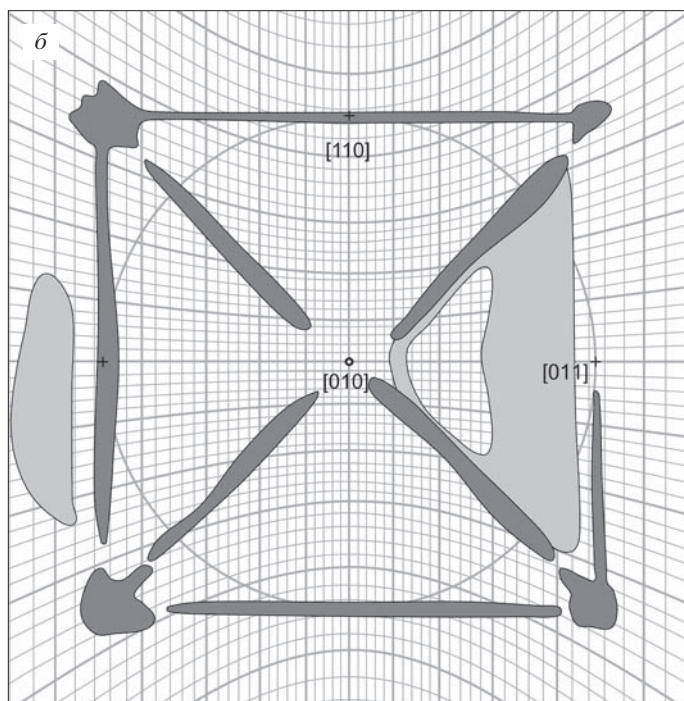
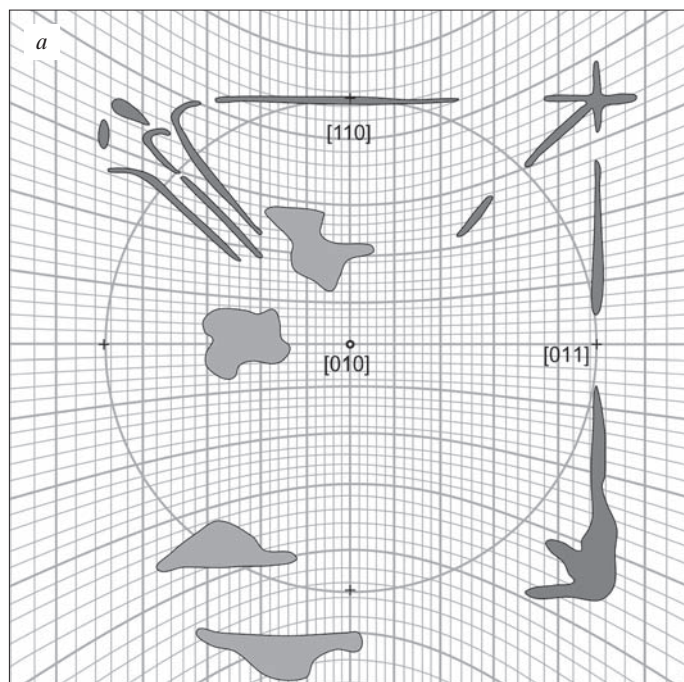
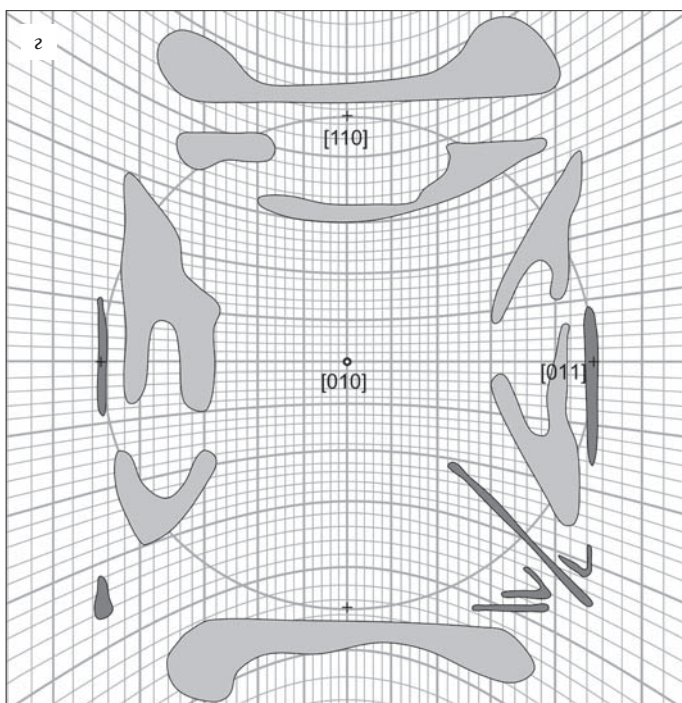
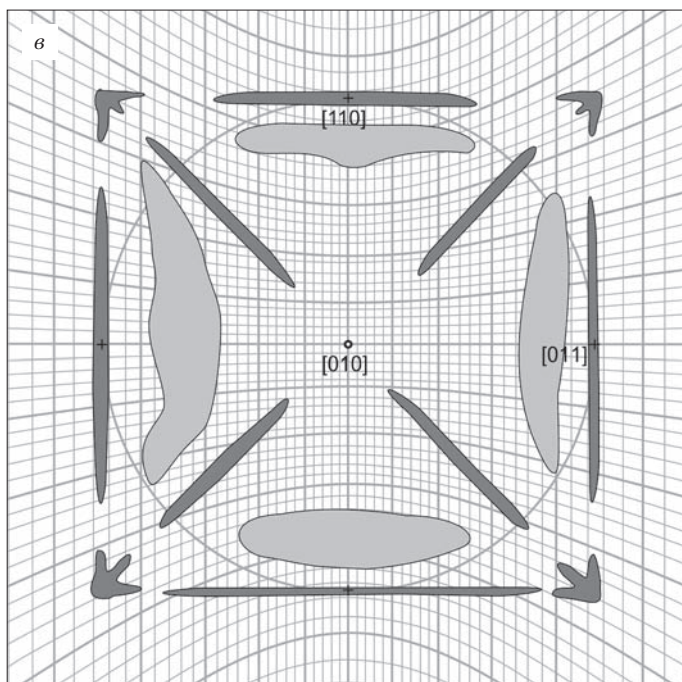
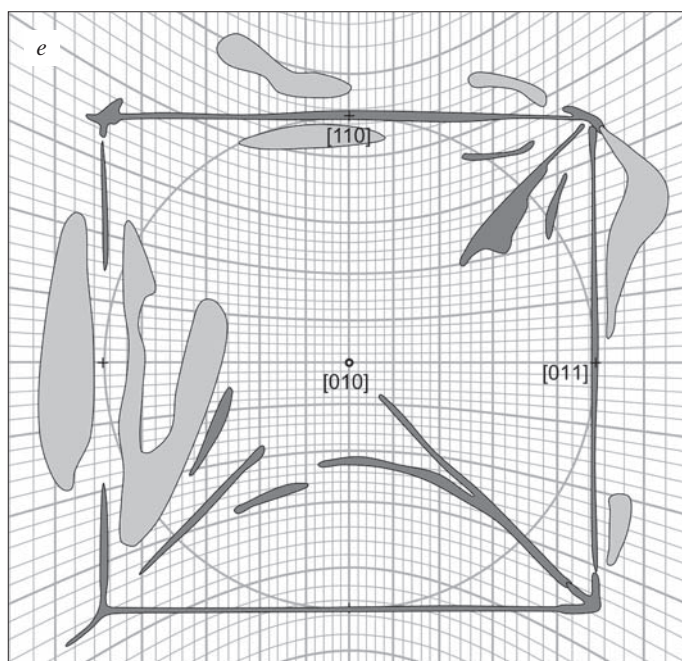
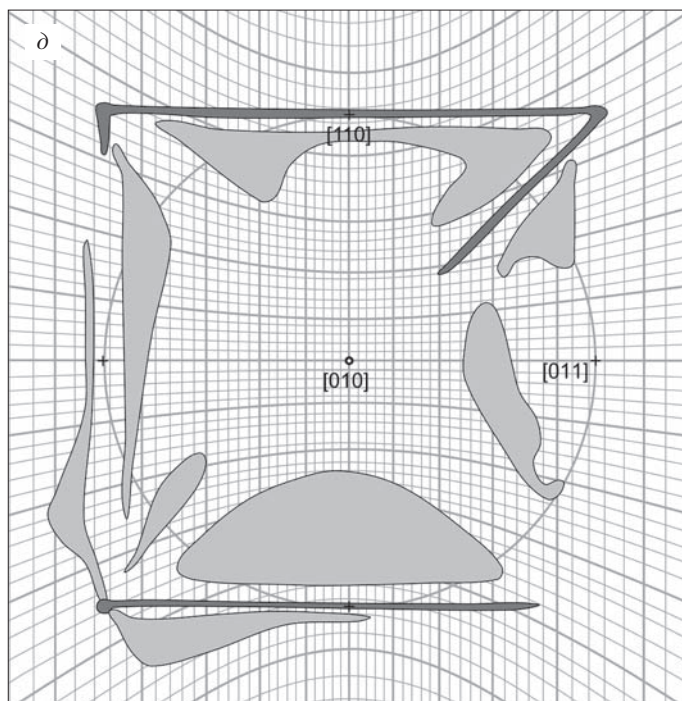


Рис. 7.14. Гномограммы кристаллов
 a – MtGrDn1; $б$ – MtGrDn2; $в$ – MtGrDn3;
 Более темным цветом показаны

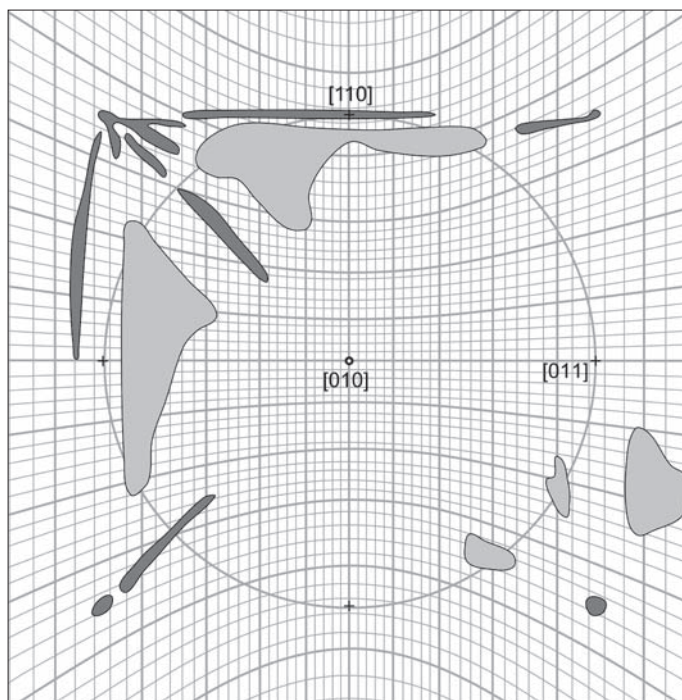


алмазоносного поля Жуина:
 z – MtGrDn4; ∂ – MtGrDn5; e – MtGrDn6.
 более яркие рефлексy



Окончание рис. 7.14.

Рис. 7.15. Гномограмма обломка алмаза-додекаэдроида из провинции Жуина.
Более темным цветом показаны наиболее яркие рефлексy



7.2.3. Кристаллы серии Топ-01-11

Эти кристаллы представляют собой разнородную группу, обладающую широким спектром признаков. Среди них встречен один кристалл с высоким индексом ПТ (Топ-01) (рис. 7.16, *а*), два кристалла с предельным механическим износом поверхности (Топ-07, Топ-11) (см. рис. 4.14, *а*), один кристалл с признаками сильного травления смешанного типа (Топ-06) (рис. 7.16, *б*). Большие вариации признаков указывают на разную историю кристаллов данной серии.

Остальные кристаллы, приведенные в табл. 7.4, 7.5, имеют слабый ударный износ, признаки небольшого влияния травления, но чаще признаки пластического течения структуры. Некоторые кристаллы описаны в предыдущих главах данной работы.

Один округлый кристалл, условно отнесенный к категории «баллас», в гониометре продемонстрировал рефлексy монокристалла и «балласом» не оказался (рис. 7.17). На гномограмме этого кристалла отразились результаты действия всех обсуждаемых факторов: растворения, пластических деформаций структуры, хаотического износа и кинетического травления (см. табл. 7.5).

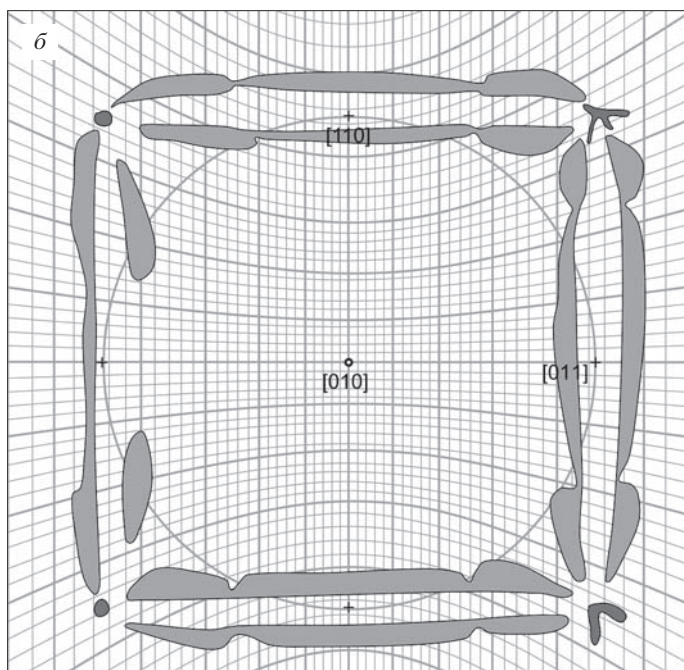
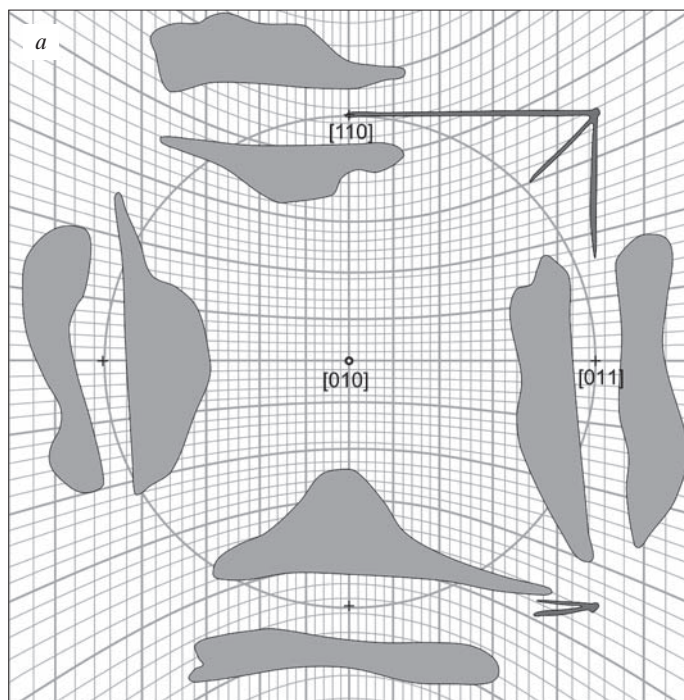


Рис. 7.16. Гномограммы кристаллов Топ-01 (а), Топ-06 (б)

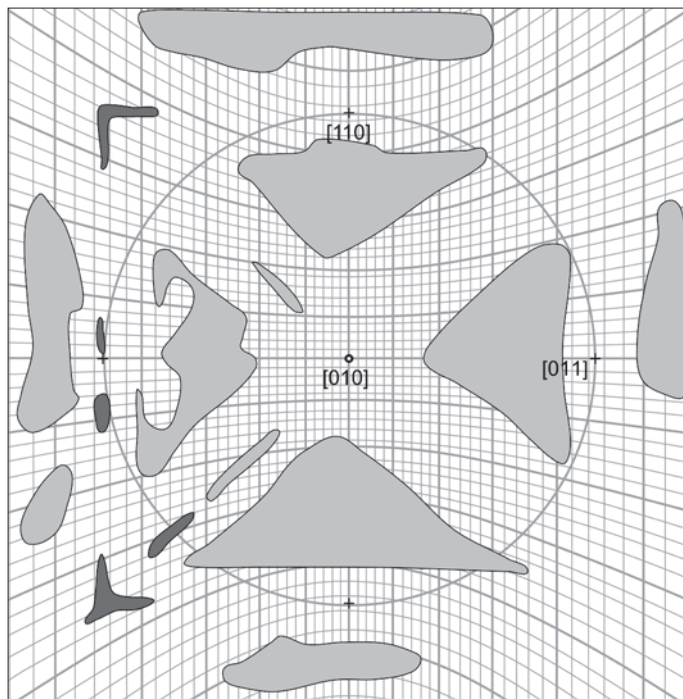


Рис. 7.17. Гномограмма кристалла, ошибочно названного «балласом»

Якутские коллекции алмазов включали: 401 кристалл россыпных алмазов руч. Холомолоох (левый приток р. Эбелях, которая является правым притоком р. Анабар), 16 алмазов россыпей р. Эбелях, 719 кристаллов из россыпи р. Булкур (левый приток р. Лена в нижнем течении), 26 кристаллов из кимберлитовых жил трубки Интернациональная, 2 округлых кристалла из россыпи Новинка ближнего сноса трубки Интернациональная, 5 кристаллов из россыпи Заря, ближнего сноса трубки Мир, 29 кристаллов из трубки Удачная и около 130 кристаллов, относимых также к вторичным кимберлитам трубки Удачная.

8.1. АЛМАЗЫ РУЧ. ХОЛОМОЛООХ

Из выборки, насчитывающей 401 кристалл категории $(-2...+1)$ по международной классификации Sity (диаметром от 1 до 2 мм), разделенных на 8 серий в среднем по 50 кристаллов, подробному исследованию были подвергнуты 83 кристалла. Из пробы очищенных россыпных кристаллов удалены техногенно измененные кристаллы с зеркальными плоскостями скола. Причем из каждой серии по визуально-морфологическим признакам для инструментального гониометрического изучения отбирались под бинокулярным микроскопом в первую очередь наиболее изометричные кристаллы с гладкой поверхностью.

Это первая крупная коллекция алмазов, с которой автору довелось работать. На начальном этапе исследований нашей целью было установление только параметров первичной поверхности растворения алмаза. Теория механического износа алмаза и форм травления не была разработана.

При постановке исследования в ходе визуального отбора алмазы классифицировались по следующим типам:

- 1) гладкие ромбододекаэдрониды, изометричные, удлиненные и уплощенные;
- 2) округлые, леденцовые формы без явных признаков элементов симметрии, гладкие сростки и двойники;
- 3) ромбододекаэдрониды с шагреневым рельефом;
- 4) октаэдр, сростки октаэдров и комбинационные формы октаэдр-додэкаэдронид с ясным регенерационным рельефом;
- 5) неправильные обломки, осколки, сростки с негладкой поверхностью, иногда с занозистым рельефом.

Такая система классификации была принята с учетом задач исследования. Условная «степень сложности» поверхности увеличивается при пере-

Таблица 8.1

Распределение кристаллов руч. Холомолоох по типам поверхностей

Категория	Группы								Кол-во	
	1	2	3	4	5	6	7	8	шт.	%
1 – гладкие додекаэдрониды	12	2	8	9	3	1	2	3	40	10,0
2 – округлые, леденцовые формы	24	22	23	18	17	20	27	15	166	41,4
3 – ромбододекаэдрониды с шагреневым рельефом	4	11	5	8	7	8	7	15	65	16,2
4 – октаэдрониды и комбинированные формы	1	5	4	2	7	4	2	3	28	7,0
5 – неправильные обломки	10	10	9	13	16	17	13	14	102	25,4
Сумма	51	50	49	50	50	50	51	50	401	100

ходе от первой до пятой категории (табл. 8.1). Окраска кристаллов не играет для гониометрических измерений никакой роли, и она не учитывалась в данной классификации. Кристаллы с изучаемого участка подразделялись на группы по несколько десятков в каждой. Все кристаллы первой категории были отсняты на гониометре. Для многих кристаллов получено несколько гномограмм в разных ориентациях (по разным осям L_4). Некоторые кристаллы второй группы также были измерены. Среди кристаллов третьей группы годные для измерения параметра формы растворения составляли меньше половины, поскольку форма рефлексов остальных была далека от треугольной. Алмазы последних категорий не исследовались на гониометре, поскольку их поверхность сильно изменена вторичными процессами.

Уже в самом начале работы было обнаружено, что при визуальном отборе часто создается ложное представление о поверхности кристалла. Даже кристаллы первой категории не всегда давали ясный треугольный рефлекс и представляли непростой объект для измерений параметра эллипсоида растворения. При детальном рассмотрении под большим увеличением было установлено, что большинство алмазов первой группы имели тонкий шероховатый рельеф. Кристаллы второй категории сложно развернуть в правильную кристаллографическую установку, а форма рефлекса от элементарной поверхности оказалась весьма прихотливой. Соответственно поиски удачной ориентировки алмаза в гониометре требовали неоправданно больших затрат времени. Сейчас можно утверждать, что поверхности леденцовых форм алмазов часто несут признаки нестационарного травления, поэтому сложность рефлекса была вполне закономерна. Кристаллы третьей группы на гномограммах часто демонстрировали довольно симметричное расположение диффузно рассеивающих пятен. У додекаэдронидов с шероховатым, шагреневым рельефом часто обнаруживался комбинированный рефлекс октаэдра, цилиндра и додекаэдроида. Кристаллы четвертой категории тоже в половине случаев давали комбинированный рефлекс. Алмазы пятой группы не измерялись на гониометре ввиду казавшейся тогда

Таблица 8.2

Полярные и физиографические характеристики алмазов россыпи Холомолоох

№ п.п.	Номер кристалла	Цилиндр	Октаэдр	Комб. рефл.	УИ	ПТ	Серп. рефл.	Мех. износ	Полигенез	Конус	Кин. травл.	Диф. травл.	Комб. травл.	Двойники	Шагрень	Штриховка	Регенерация
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1-1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
2	1-2	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
3	1-3	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
4	1-4	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1-5	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
6	1-6	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
7	1-7	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
8	1-8	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
9	1-9	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0
10	1-10	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
11	1-11	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
12	1-12	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
13	1-13	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
14	2-1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
15	2-2	0	0	0	1	2	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
16	2-3	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	2-4	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
18	2-5	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
19	2-6	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0
20	2-7	1	1	0	1	0	0	1	1	1	2	1	1	0	0	1	1
21	2-8	1	1	0	1	1	0	1	1	1	2	1	1	0	0	1	1
22	2-9	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0
23	3-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
24	3-2	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
25	3-3	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0
26	3-4	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
27	3-5	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
28	3-6	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	2	1	0	0	1	0
29	3-7	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0
30	3-8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
31	3-9	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0
32	3-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
33	3-11	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	2	1	0	0	0	0
34	4-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
35	4-2	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
36	4-3	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
37	4-4	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
38	4-5	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
39	4-6	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
40	4-7	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
41	4-8	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
42	4-9	0	0	0	1	2	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
43	4-10	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0

№ п.п.	Номер кристалла	Цилиндр	Октаэдр	Комб. рефл.	УИ	ПТ	Серп. рефл.	Мех. износ	Полигенез	Конус	Кин. травл.	Диф. травл.	Комб. травл.	Двойники	Шагренъ	Штриховка	Регенерация
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
44	4-11	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
45	4-12	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	2	1	0	0	0	0
46	4-13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
47	4-14	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
48	5-1	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
49	5-2	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	5-3	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
51	5-4	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
52	5-5	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0
53	5-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0
54	6-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55	6-2	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
56	6-3	1	1	0	1	2	0	1	1	1	1	2	1	0	1	1	0
57	6-4	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
58	6-5	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	2	1	0	0	0	0
59	6-6	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	6-7	0	0	0	1	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
61	6-8	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0
62	6-9	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
63	6-10	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
64	7-1	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
65	7-2	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
66	7-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
67	7-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
68	7-5	0	1	0	1	2	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0
69	7-6	1	1	0	1	2	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0
70	7-7	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0
71	7-8	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0
72	7-9	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	2	1	0	0	1	1
73	8-1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
74	8-2	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0
75	8-3	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0
76	8-4	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0
77	8-5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0
78	8-6	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1
79	8-7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
80	8-8	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	2	1	0	1	1	0
81	8-9	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
82	8-10	1	1	0	2	0	0	1	1	1	1	2	1	0	1	1	0
83	8-11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0
	Σ	24	28	3	46	49	0	67	28	11	21	57	15	1	39	20	5
	Σ, %	29	34	4	55	59	0	81	34	13	25	69	18	1	47	24	6

непригодности их для гониометрических измерений. В дальнейшем опытным путем было установлено, что практически для всех монокристаллов алмаза подходящих размеров можно найти правильную кристаллографическую установку, руководствуясь световыми рефlekсами отражения.

Таким образом, на начальном этапе исследований нами был произведен отбор кристаллов по физиографическим характеристикам (табл. 8.2). Среди исследованных на параболическом гониометре алмазов россыпи Холомолоох в первую очередь оказались те, которые сохранили первичную поверхность растворения, не были подвержены интенсивному хаотическому износу, регенерации, но могли быть модифицированы диффузионным типом травления, сохраняющим основную ориентацию поверхности. Кристаллы с другим набором признаков были изначально отбракованы, что вполне оправдывало поставленную на начальном этапе исследований цель, но не отражало задачи настоящей работы. Тем не менее результаты измерений кристаллов россыпи Холомолоох предоставляют важнейшую информацию для сравнительного анализа и сопоставления параметров формы растворения. Кроме того, большинство изученных кристаллов принадлежат довольно представительной выборке кристаллов I разновидности – высшего ювелирного качества – по классификации Ю.Л. Орлова и выводы относительно эволюции их формы имеют важное практическое значение.

В результате искусственного отбора кристаллов с наиболее гладкими поверхностями доля кристаллов с сохранившейся исходной поверхностью растворения оказалась очень мала – не больше 12% (10 кристаллов). Поверхности большинства изученных алмазов модифицированы в основном диффузионным травлением (69%). Кинетический режим травления отмечен у 25% кристаллов. Травление с признаками обоих режимов встречено у 18% кристаллов. Несмотря на особый отбор кристаллов, пластические деформации структуры наблюдаются у 60% кристаллов, а 12% имеют наивысший индекс течения структуры. Признаки полирующего хаотического износа поверхности зарегистрированы у 55% алмазов. Только один кристалл № 8-10 оказался с максимальным показателем износа.

Важно отметить, что гладкая поверхность алмаза может сохраниться, если этапу травления не предшествовал интенсивный хаотический износ кристалла, создающий дефектную структуру в толстом приповерхностном слое. Последующее травление дефектной структуры алмаза создает контрастный шагреневый рельеф на поверхности (см. рис. 5.9). Если кристалл подвергается слабому хаотическому износу полирующего типа, то структура поверхности изменяется на небольшую глубину, насыщаясь краевыми дислокациями, и полирующее диффузионное травление способно удалить тонкий дефектный слой, восстановив в итоге гладкую бездефектную поверхность. При этом основные признаки хаотического износа поверхности сохраняются, поскольку удаленные при истирании части алмаза безвозвратно потеряны. Преимущественно именно такие кристаллы попали в изученную выборку, но с учетом всей генеральной совокупности алмазов их не более 10–15%.

Рассмотрим основные типы морфологии алмазов, специально отобранных для гониометрических исследований.

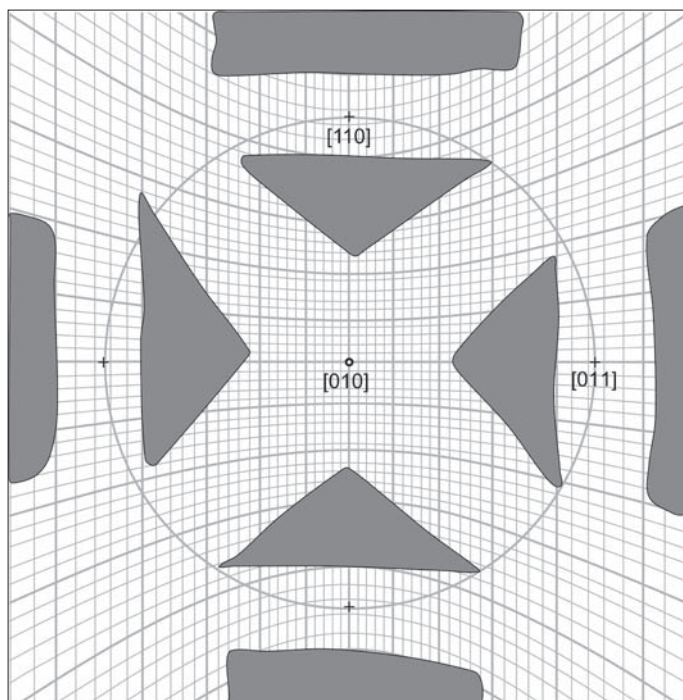


Рис. 8.1. Гномограмма додекаэдроиды № 4-5, сохранившего поверхность эллипсоида растворения

1. Округлые додекаэдроиды с гладкими поверхностями растворения, демонстрирующие обычный треугольный рефлекс эллипсоида (рис. 8.1). Характеристики эллипсоидов растворения кристаллов приведены в табл. 8.3. У кристалла № 4-5, в частности, регистрируется уменьшение внешней симметрии, обусловленное потерей плоскостей симметрии рефлексов на гномограмме, что можно связать с вращением кристалла вокруг оси L_4 в ходе растворения. У двух кристаллов зафиксировано исчезновение оси симметрии четвертого порядка, но сохранилась одна плоскость симметрии. Остальные семь кристаллов обладают полным набором внешних элементов симметрии. У пяти кристаллов наблюдается небольшой механический износ поверхности, не приводящий к сильному искажению треугольного рефлекса. Известно, что хаотический износ увеличивает размер рефлекса, одновременно понижая значения двух параметров a_2 и a_3 обобщенного эллипсоида, рассчитываемого по гномограмме (см. главу 4). У двух кристаллов из этой группы встречаются слабые признаки травления диффузионного типа, которое приводит к сокращению площади рефлекса и таким образом увеличивает расчетные значения указанных параметров эллипсоида. Можно считать, что воздействие обоих факторов на среднестатистические показатели обобщенного эллипсоида компенсируется. Доля кристаллов, сохранивших поверхность растворения, среди изученных алмазов составляет 12%, а с учетом генеральной совокупности не превышает 3%.

2. Округлые, гладкие додекаэдроиды с признаками небольшого хаотического износа, пластического течения и диффузионного травления

Параметры формы растворения кристаллов руч. Холомолоох

Номер строки в табл. 8.2	Номер кристалла	Параметры эллипсоида			
		A_2	A_3	α , град	Кол-во рефлексов
23	3-1	1,53	1,78	6,17	3
26	3-4	1,34	1,83	5,25	4
29	3-7	1,48	1,61	5,00	4
36	4-3	1,48	1,78	5,25	4
38	4-5	1,35	1,66	5,13	4
39	4-6	1,35	1,61	5,00	4
54	6-1	1,58	1,81	6,63	8
61	6-8	1,39	1,59	5,00	2
63	6-10	1,38	1,58	4,38	3
78	8-6	1,31	1,54	4,00	4
	МО (СКО) k	1,43 (0,06) 0,044	1,72 (0,13) 0,074	5,59 (1,0) 0,181	

(рис. 8.2). Множественные неглубокие ямы и невысокие бугорки на поверхности не портят вид гладкой поверхности, но слегка модифицируют форму рефлекса, нарушая прямолинейность ребер треугольника. Обычный для этой группы алмазов хаотический полирующий износ, по-видимому предшествовавший травлению, не портит поверхность, но его результаты проявляются только в центральной части рефлекса.

3. Додекаэдровиды с поверхностями, модифицированными травлением смешанного типа (рис. 8.3). На алмазе присутствуют цилиндр и грани октаэдра, а также сателлитные рефлексы, что характерно для кинетического режима травления. Рефлекс от граней додекаэдроида сократился и причудливо изменил форму в результате диффузионного травления. Приведенные на рис. 8.3 гномограммы принадлежат алмазам, сильно различающимся степенью развития шагреневоего рельефа. Кристалл № 1-9 обладает слабовыраженной шероховатостью и внешне гладкой поверхностью, а кристалл № 8-8 имеет рельеф апельсиновой корки. Однако гномограммы демонстрируют одинаковый набор полярных признаков. Сначала кристаллы испытали пластические деформации структуры в ходе растворения, затем слабый по интенсивности механический износ полирующего типа и на заключительной стадии – смешанный режим травления. Единственное отличие заключается в том, что травление кристалла № 8-8 было более значительным.

4. Особая группа алмазов с гладкими поверхностями обладает признаками сильного пластического течения структуры и последующего диффузионного травления (рис. 8.4). На гномограмме (см. рис. 8.4, а) просматривается сильно растянутый треугольник ABC эллипсоида со «срезанными» вершинами A и B , но сохранившейся вершиной C . Кроме того, уменьшена общая площадь рефлекса и наблюдается значительное увеличение угла при гранном шве. У алмаза № 7-1 отмечается исключительно

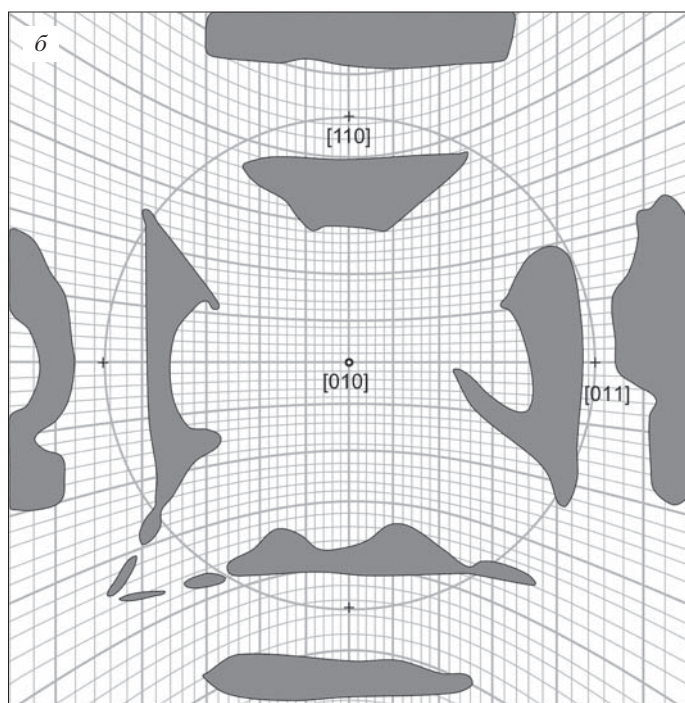
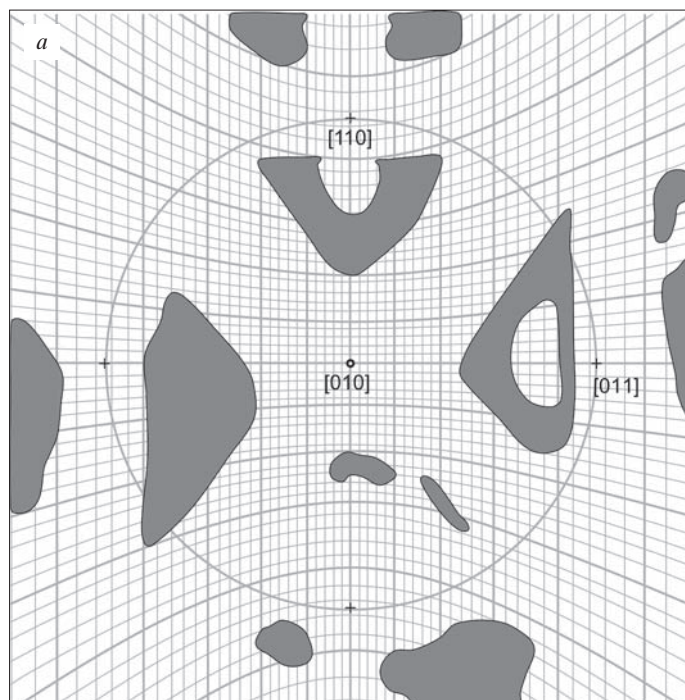
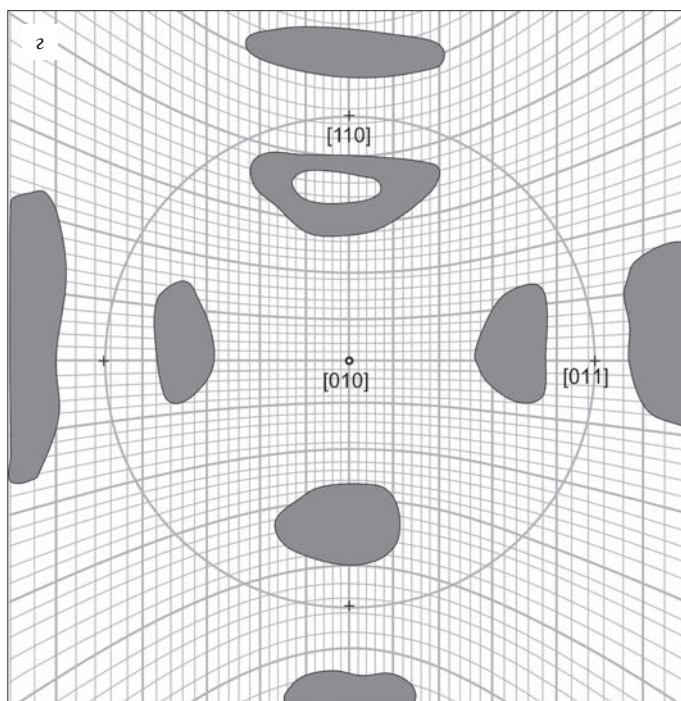
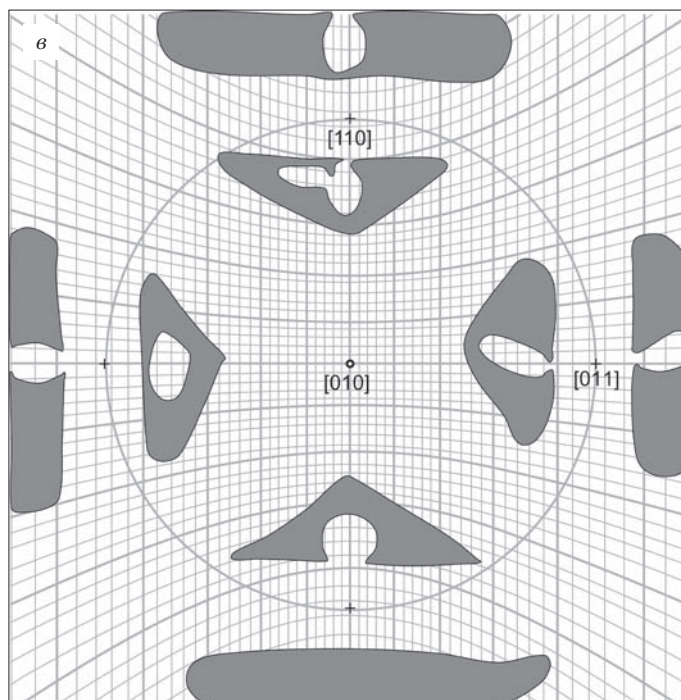


Рис. 8.2. Гномограммы гладких округлых алмазов № 1-1 (а), 1-7 (б), 4-7 (в), 1-5 (г)



Окончание рис. 8.2

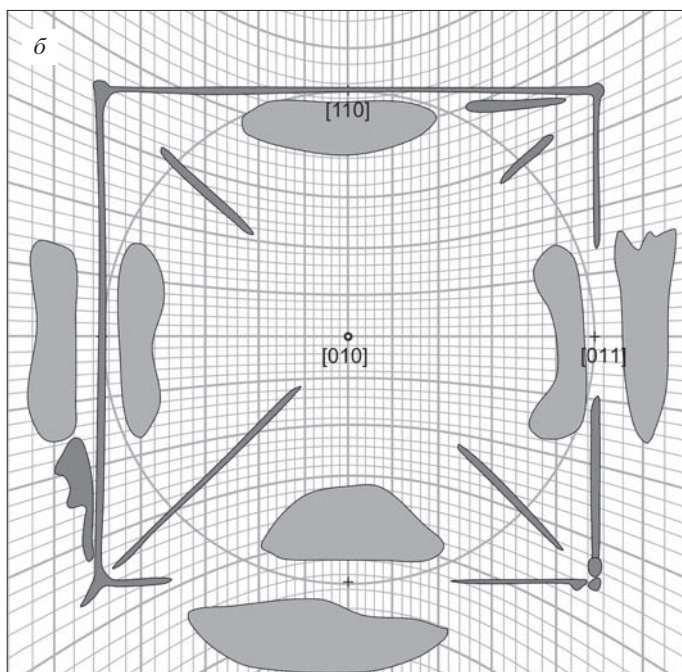
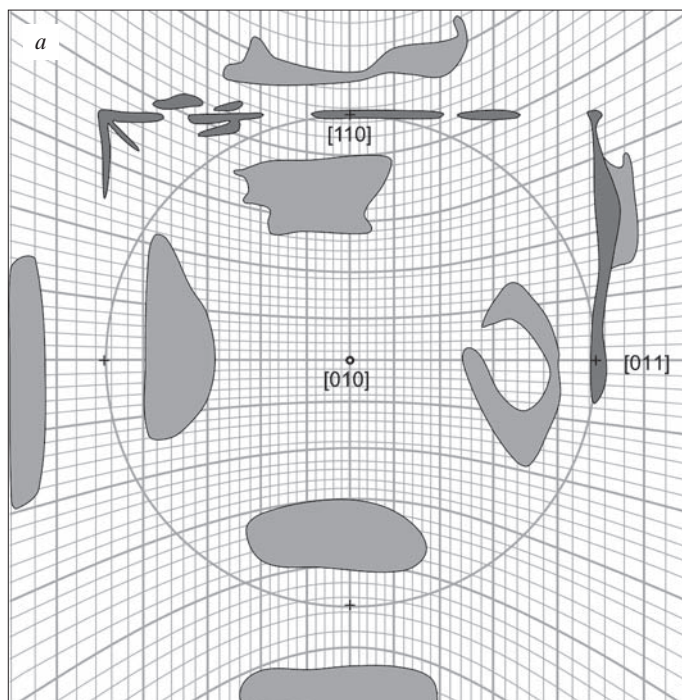


Рис. 8.3. Полярный комплекс алмазов № 1-9 (а), 8-8 (б)

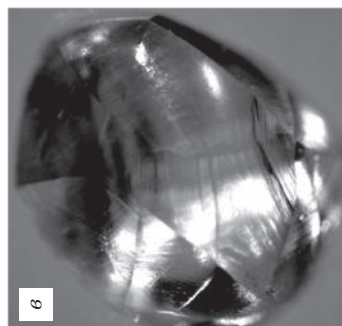
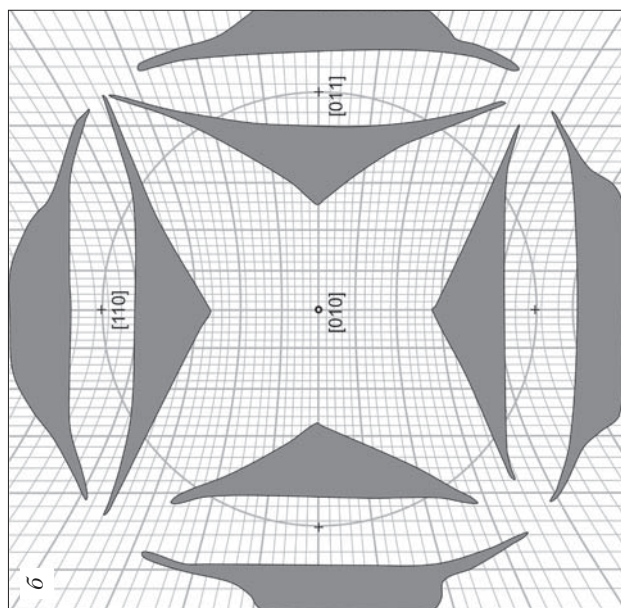
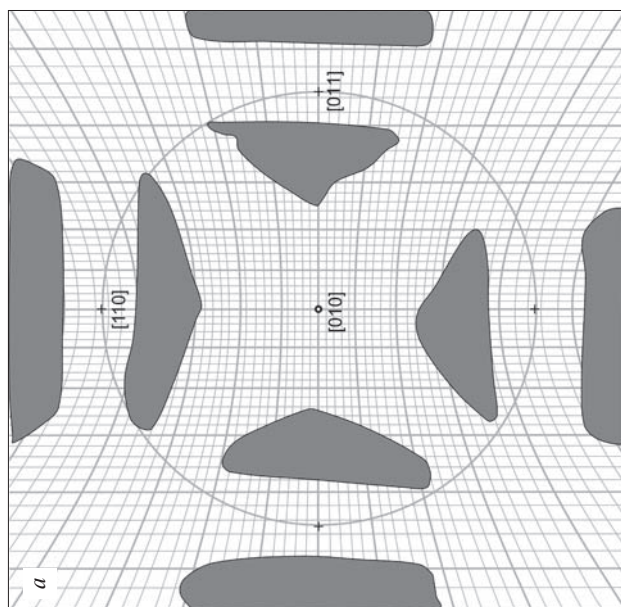


Рис. 8.4. Гномограмма кристаллов № 2-2 (а), 7-1 (б) и поверхность кристалла № 7-1 (с)

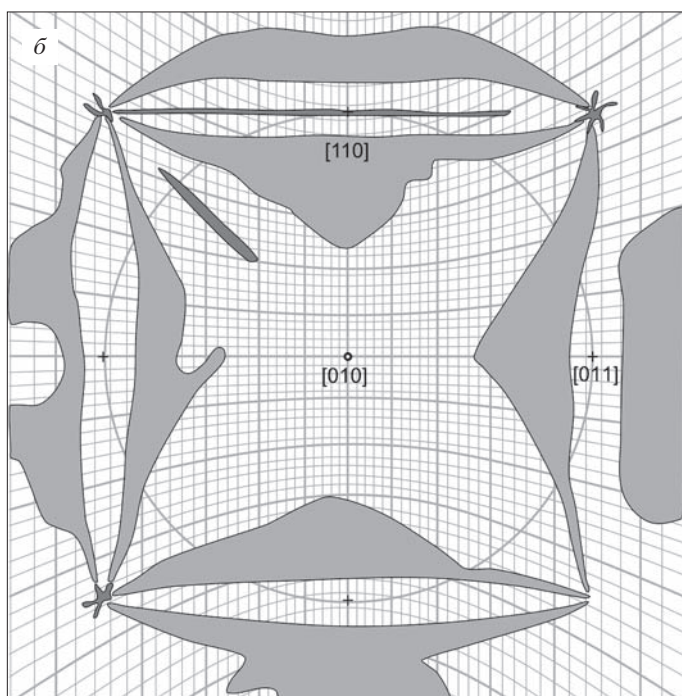
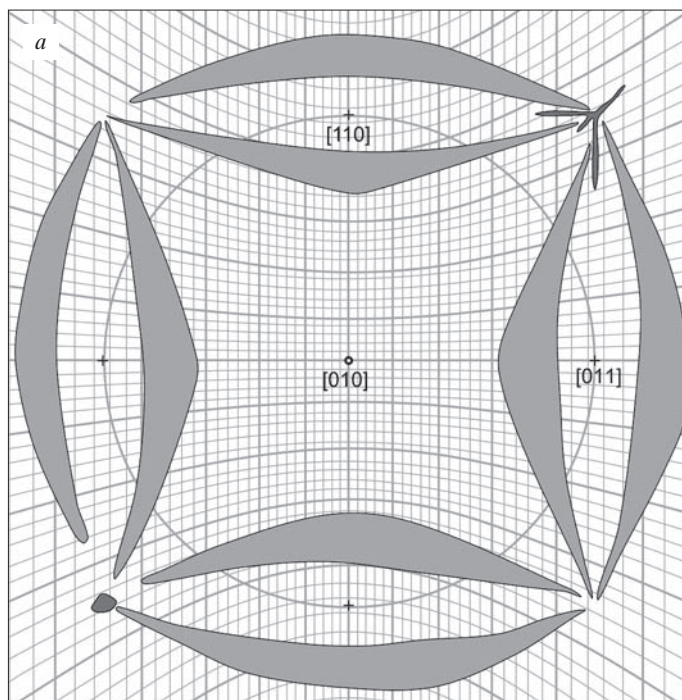


Рис. 8.5. Полярный комплекс кристаллов № 3-3 (а), 6-3 (б)

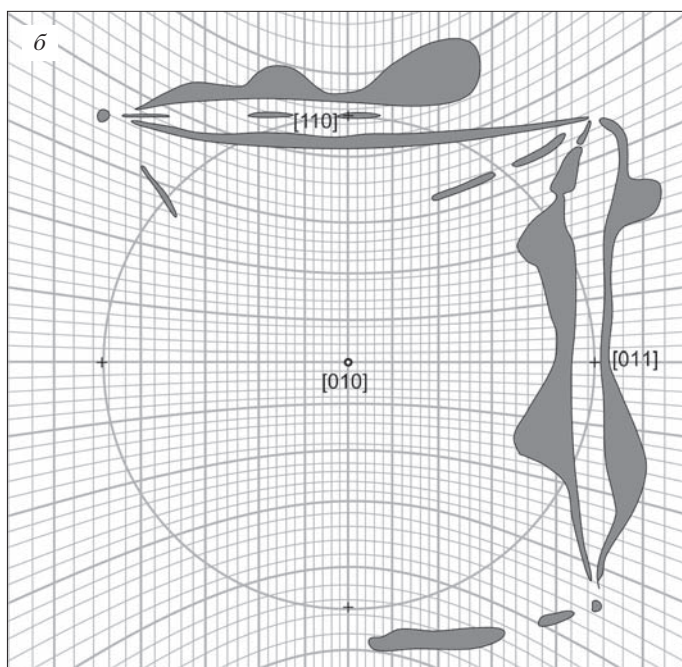
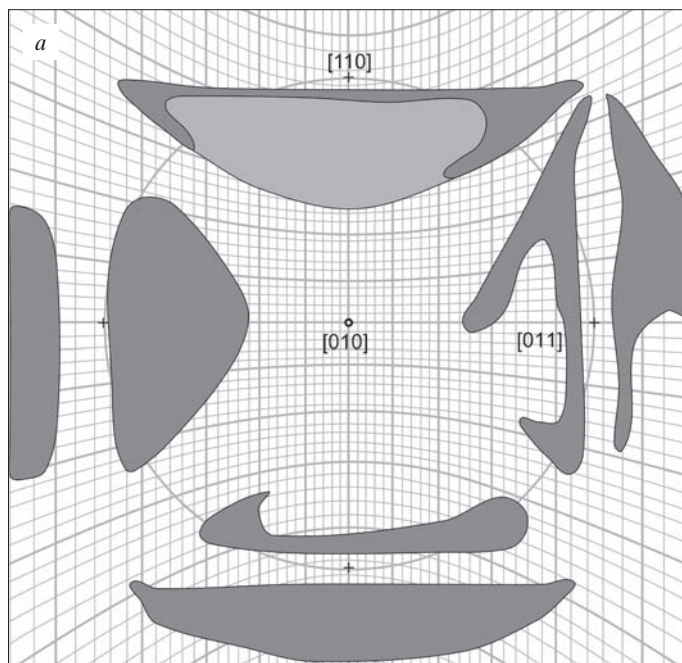


Рис. 8.6. Гномограммы полярного комплекса нормалей алмаза № 8-10 в двух ракурсах.
Пояснения см. в тексте

небольшое нестационарное диффузионное травление, не заслуживающее упоминания в табл. 8.2, оно затронуло только области поверхности, прилегающие к точкам выхода тройных осей, где в результате сильных пластических деформаций возникли штриховка, система субпараллельных поверхности трещин и создались благоприятные условия для топохимических реакций (см. рис. 8.4, б, в).

5. В число исследованных кристаллов попали также кристаллы со значительными признаками смешанного травления, которое уничтожило результаты предыдущих процессов, как на кристалле № 3-3, вероятно испытывавшем пластические течения структуры (рис. 8.5, а). На кристалле № 6-3 смешанный тип интенсивного травления сохранил вершины С треугольного рефлекса, модифицированного также значительным пластическим течением алмаза (рис. 8.5, б).

Единственный из отобранных для инструментальных исследований кристалл № 8-10 имеет признаки хаотического истирания предельного типа (рис. 8.6). Последующее сильное, в основном диффузионное, травление наложило свой отпечаток, создав гранный шов со средним углом 4° на всех гранях додекаэдроида. На шагреновой поверхности граней алмаза гранный шов визуально не различим. С разных сторон кристалл демонстрирует немного различающиеся картины рефлексов, однако основные полярные признаки интенсивного износа и последующего травления сохраняются на обеих гномограммах (см. рис. 8.6). Вероятно, предельный случай хаотического истирания широко распространен среди алмазов россыпи Холомолоох, но такие кристаллы оказались отбракованными нами изначально.

Важно отметить, что хаотический износ кристаллов россыпи Холомолоох распространен и всегда предшествует этапу травления. Поэтому можно утверждать, что он связан с абразивными явлениями, сопровождающими вынос глубинных пород мантии, содержащих алмазный материал, на дневную поверхность, а широкое распространение травления свидетельствует об остановках этого процесса. Обсуждающиеся обычно в литературе явления механического износа алмаза на поверхности Земли при формировании и размыве россыпей для изученных кристаллов россыпи Холомолоох совершенно не характерны. Как было отмечено в главе 4, эффективный механический износ алмаза возможен при относительных скоростях движения минеральных зерен порядка 10 м/с и выше. Речным потокам свойственны меньшие скорости, которые не вызывают изменение формы поверхности алмаза, но могут производить селекцию и разрушать дефектные кристаллы. Вероятно, такой случай характерен для россыпи Холомолоох.

8.2. АЛМАЗЫ РОССЫПЕЙ р. БУЛКУР

Из 719 кристаллов россыпи р. Булкур в изученную на гониометре выборку попали 68 кристаллов, или 9,5%.

При изучении второй крупной коллекции россыпных алмазов р. Булкур кристаллы были разделены на две группы. В первую вошли гладкие ромбодекаэдрониды, кристаллы с шагреновым рельефом, а также комбинационные формы октаэдр–ромбодекаэдронид, простые сростки и двойники. Во вторую группу включены сложные формы с грубым рельефом, без ясно различимых признаков симметрии, множественные сростки, октаэдры всех видов, неправильные обломки, осколки, кристаллы с блочной поверхностью. Для инструментальных исследований отбирались алмазы только первой группы (табл. 8.4). Отдельно была изучена группа из 10 кристаллов, относящихся к V и VII разновидностям (табл. 8.5). Из исследованной группы алмазов россыпи Булкур только четыре кристалла сохранили первичную форму растворения, что составляет 7% (табл. 8.6). Можно утверждать, что во всей совокупности кристаллов данной россыпи доля алмазов с исходной поверхностью растворения ничтожно мала – менее 1%.

Рассмотрим серию характерных гномограмм алмазов россыпи Булкур.

Большую долю (74%) составляют кристаллы с полярными признаками диффузионного режима травления (рис. 8.7). При этом поверхности конуса травления формируются не так часто (9%), как у алмазов россыпи Холомолоох, и эффекты травления выражены в целом довольно слабо. Только 3 кристалла из 58 обладают признаками более значительного диффузионного и смешанного травления (рис. 8.8).

В отобранной для исследования группе кристаллов с наиболее «гладкими» поверхностями довольно большая часть алмазов (17%) имеют блочное строение (рис. 8.9). Причем блоки отделены друг от друга крупными трещинами, образованными в результате травления предварительно механически истертой поверхности. Так же, как и для кристаллов россыпи Холомолоох, хаотический механический износ алмазов россыпи Булкур обычно предшествует травлению. Заключительное нахождение алмазов в элювиальных, делювиальных и аллювиальных россыпях до стадии добычи их на участке Булкур практически не оставило следов механического истирания в морфологии кристаллов.

Существенно иными полярными и физиографическими характеристиками обладают кристаллы V (серия 17893.2) и VII (серия 17893.3) разновидностей по Ю.Л. Орлову (см. табл. 8.5). Алмазы V разновидности демонстрируют значительный ударный износ и последующее сильное смешанное травление поверхности (рис. 8.10). Интенсивный диффузионный режим травления, имевший место на большей части поверхности алмаза, сопровождается небольшим кинетическим травлением отдельных участков. Точное местоположение таких фрагментов на кристалле установить не удается. Блочная структура поверхности алмазов V разновидности проявляется через многочисленные серповидные рефлексии, обусловленные трещиноватостью поверхности монокристаллов немеханического происхождения, связанной, вероятно, с деформационными процессами в несовершенном крис-

Характеристики поверхностей алмазов россыпи р. Булкур

№ п.п.	Номер кристалла	Цилиндр	Октаэдр	Комб. рефл.	УИ	ПТ	Серп. рефл.	Мех. износ	Полигенез	Конус	Кин. травл.	Диф. травл.	Комб. травл.	Двойники	Шагрень	Штриховка	Регенерация
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	17870-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
2	17870-2	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
3	17870-3	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0
4	17870-4	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0
5	17870-5	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0
6	17877-1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
7	17877-2	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0
8	17877-3	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
9	17880-1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
10	17880-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
11	17880-3	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0
12	17880-4	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0
13	17893.1-1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0
14	17893.1-2	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
15	17893.1-3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0
16	17893.1-4	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	2	1	0	1	1	0
17	17893.1-5	0	1	0	0	2	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0
18	17893.1-6	0	1	0	1	2	0	1	1	1	1	2	1	0	0	1	0
19	17893.1-7	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
20	17893.1-8	0	0	0	2	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0
21	17893.1-9	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
22	17893.1-10	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0
23	17893.1-11	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0
24	17893.1-12	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0
25	17893.1-13	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0
26	17893.1-14	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0
27	17893.1-15	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
28	17893.1-16	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0
29	17893.1-17	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
30	17894-1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
31	17894-2	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
32	17894-3	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0
33	17894-4	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
34	17894-5	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
35	17894-6	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
36	17894-7	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0
37	17895-1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
38	17895-2	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
39	17895-3	1	1	0	1	2	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0
40	17896-1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
41	17896-2	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0

№ п.п.	Номер кристалла	Цилиндр	Октаэдр	Комб. рефл.	УИ	ПТ	Серп. рефл.	Мех. износ	Полигенез	Конус	Кин. травл.	Диф. травл.	Комб. травл.	Двойники	Шагрень	Штриховка	Регенерация
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
42	17896-3	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0
43	17897-1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0
44	17897-2	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
45	17897-3	1	1	0	2	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0
46	17897-4	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0
47	17898-1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0
48	17898-2	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0
49	17898-3	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
50	17898-4	1	1	0	2	0	0	1	1	1	1	2	1	0	1	1	0
51	17957-1	0	1	0	1	2	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0
52	17957-2	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0
53	17957-3	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0
54	17957-4	1	1	0	1	2	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0
55	17957-5	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
56	17957-6	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
57	17957-7	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
58	17957-8	0	0	0	2	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
	Σ	12	18	1	40	44	10	54	19	5	13	43	8	5	43	30	1
	Σ, %	21	31	2	69	76	17	93	33	9	22	74	14	9	74	52	2

Таблица 8.5

Алмазы россыпи р. Булкур V и VII разновидностей по Ю.Л. Орлову

№ п.п.	Номер кристалла	Цилиндр	Октаэдр	Комб. рефл.	УИ	ПТ	Серп. рефл.	Мех. износ	Полигенез	Конус	Кин. травл.	Диф. травл.	Комб. травл.	Двойники	Шагрень	Штриховка	Регенерация
1	17893.2-1	0	0	0	2	1	1	1	0	0	0	2	0	0	1	1	0
2	17893.2-2	1	1	0	2	0	1	1	1	1	1	2	1	0	1	1	0
3	17893.2-3	1	0	0	2	0	1	1	1	0	1	2	1	0	1	1	0
4	17893.2-4	1	0	0	2	1	1	1	1	0	1	2	1	0	1	1	0
5	17893.2-5	1	1	0	2	1	1	1	1	1	1	2	1	0	1	1	0
6	17893.2-6	1	1	0	2	1	1	1	1	0	1	2	1	0	1	1	0
7	17893.2-7	1	1	0	2	0	1	1	1	0	1	2	1	0	1	1	0
8	17893.3-1	1	1	0	1	2	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0
9	17893.3-2	1	0	0	1	2	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0
10	17893.3-3	1	1	0	2	1	1	1	1	0	0	2	0	0	0	0	0
	Σ	9	6	0	10	7	9	10	9	2	6	10	6	0	9	9	0
	Σ, %	90	60	0	100	70	90	100	90	20	60	100	60	0	90	90	0

Параметры эллипсоида растворения кристаллов р. Булкур

Номер строки в табл. 8.4	Номер кристалла	Параметры эллипсоида			
		A_2	A_3	α , град	Кол-во рефлексов
15	17893.1-3	1,33	1,62	5,50	4
23	17893.1-11	1,37	1,53	5,17	4
37	17895-1	1,40	1,61	6,00	3
55	17957-5	1,45	1,64	5,17	3
	МО (СКО) k	1,39 (0,05) 0,037	1,60 (0,05) 0,029	5,60 (0,40) 0,072	

талле на стадии роста. Для грушевидных кристаллов-сростков VII разновидности серии 17893.3 также характерна блочность строения поверхности, но степени их ударного износа и диффузионного травления не столь значительны (рис. 8.11). При этом пластические течения структуры отмечаются на всех трех сростках.

8.3. АЛМАЗЫ КИМБЕРЛИТОВЫХ ЖИЛ ТРУБКИ ИНТЕРНАЦИОНАЛЬНАЯ

Коллекция округлых кристаллов алмаза, имеющих облик додекаэдроида, из кимберлита второй генерации трубки Интернациональная насчитывает 26 кристаллов (табл. 8.7). Отличительной особенностью изученных алмазов являются ярко выраженные процессы травления, демонстрирующие комплекс полярных признаков в морфологии кристаллов. Причем на кристаллах преобладают признаки диффузионного режима травления, а максимальная степень отмечается у половины кристаллов. Одновременно с признаками диффузионного режима 12 кристаллов имеют признаки кинетического режима травления на отдельных участках поверхности и только один алмаз (Ж-23) показывает максимальную степень кинетического избирательного травления. На остальной поверхности этого кристалла отмечаются лишь последствия начальной стадии диффузионного режима травления (рис. 8.12). Процессы механического истирания, пластического течения структуры или растворения на кристалле отсутствуют или уничтожены травлением. Можно предположить, что при переходе к диффузионному режиму травления гранный шов формируется не сразу, а постепенно, и угол при нем является показателем длительности диффузионного режима травления. Например, у кристалла Ж-23 (см. рис. 8.12, б) угол при гранном шве составляет в среднем не более $2,5^\circ$, а у кристалла № 8-10 россыпи Холомолоох – 4° (см. рис. 8.6, б), что свидетельствует о начальной стадии перехода к диффузионному режиму травления на кристалле Ж-23. В таком случае вполне допустимо обнаружить смешанный режим травления алмаза.

На рис. 8.13 приведен ряд гномограмм алмазов из трубки Интернациональная. Фото поверхности некоторых алмазов приведены на рис. 8.14.

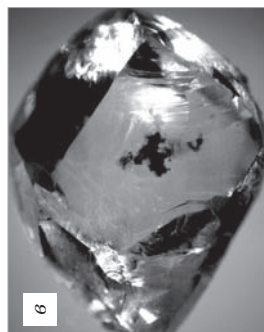
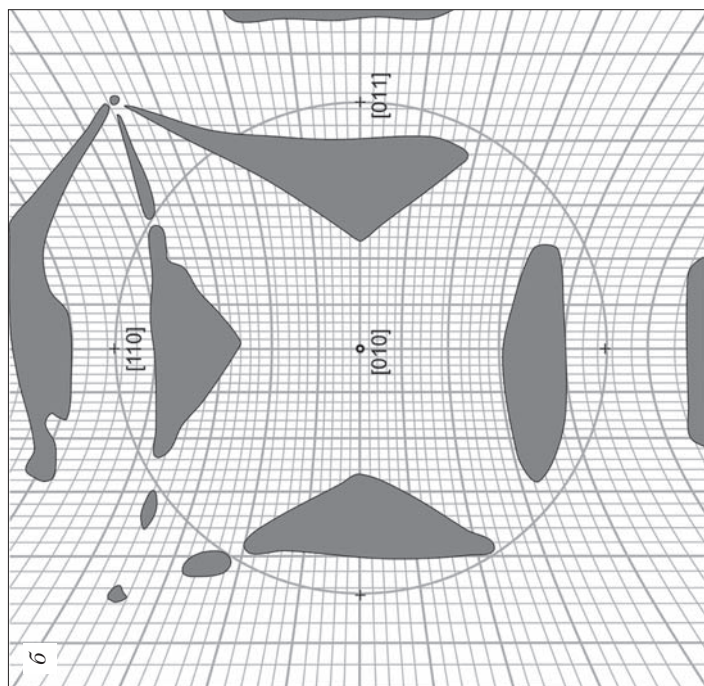
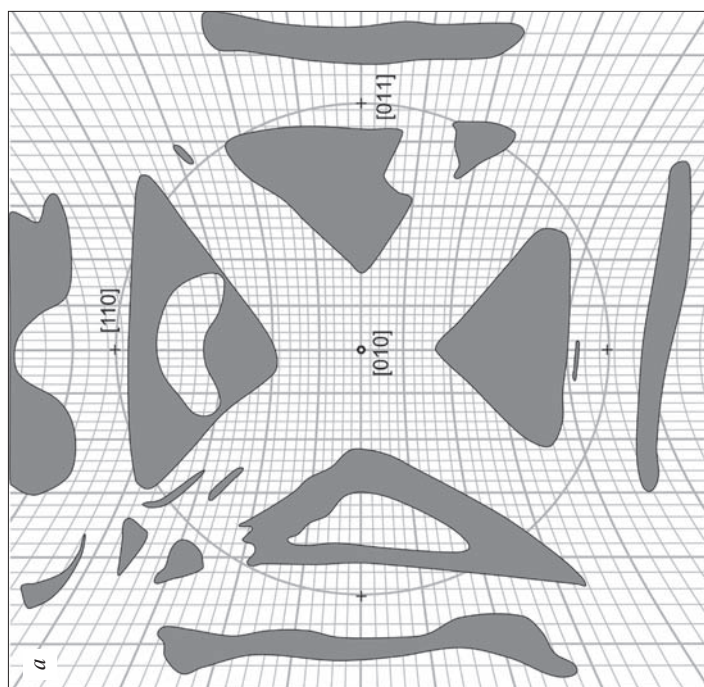


Рис. 8.7. Гномограммы алмазов № 17870-3 (а), 17893.1-1 (б) и поверхность алмаза № 17893.1-1 (а)

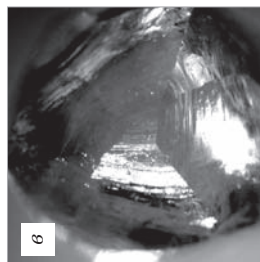
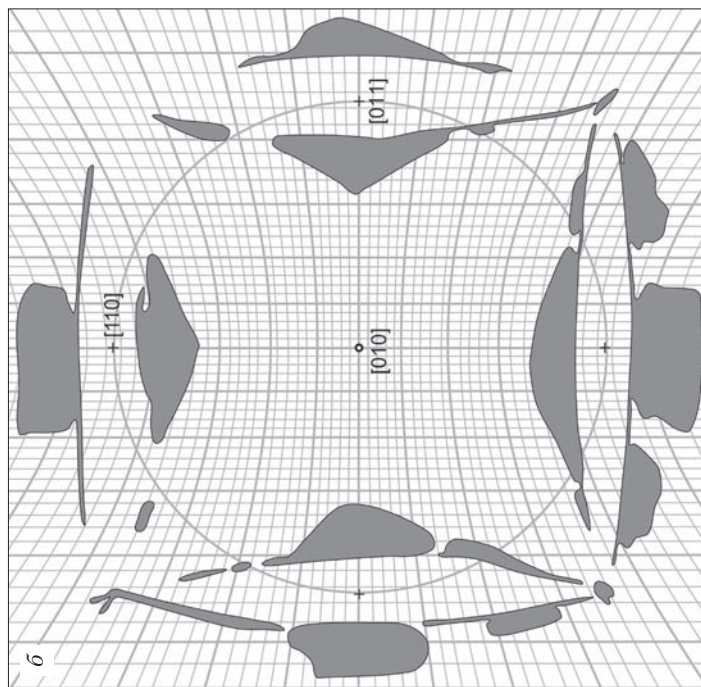
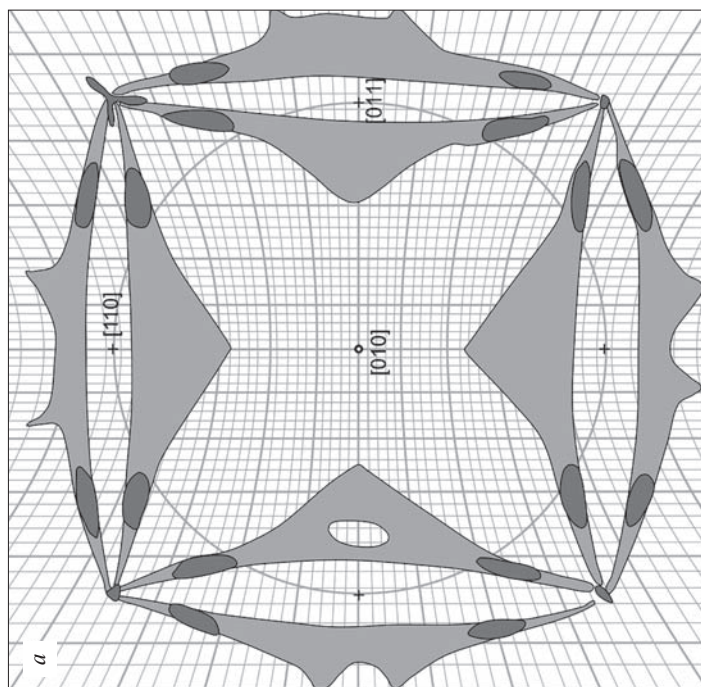


Рис. 8.8. Гномограммы кристаллов № 17893.1-1 (а), 17839.1-4 (б) с признаками сильного травления и поверхность алмаза № 17893.1-1 (в)

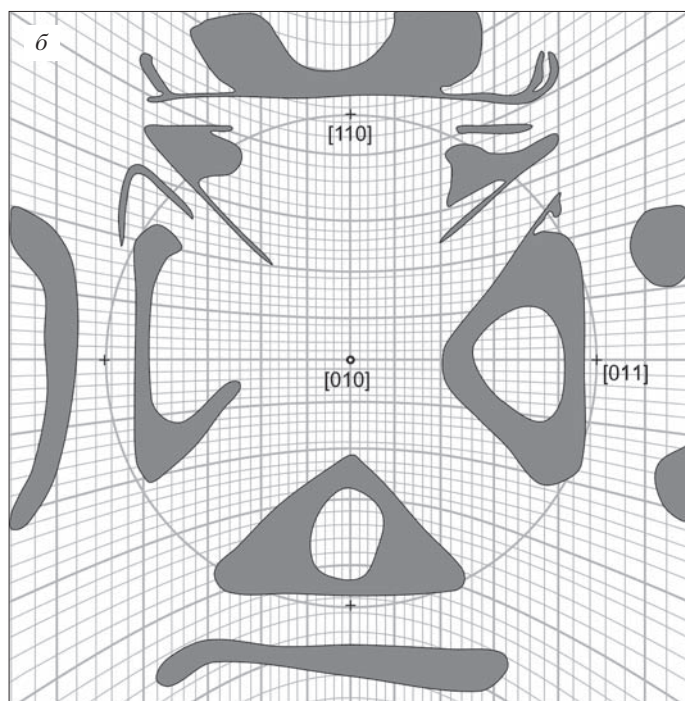
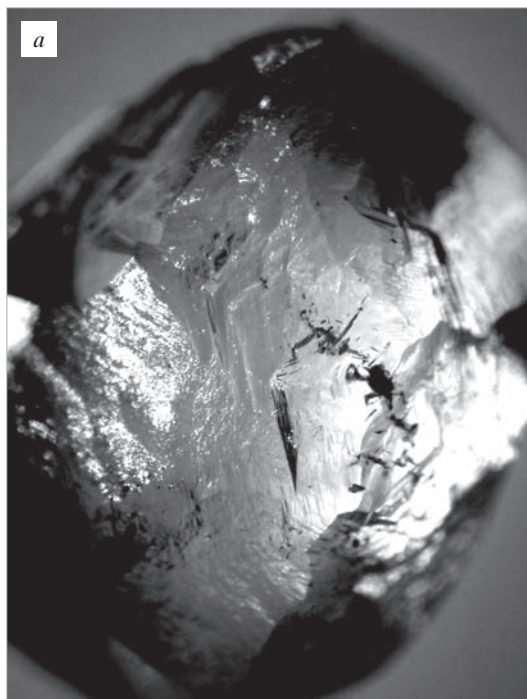


Рис. 8.9. Кристалл № 17893.1-8 (а) и его гномограмма (б)

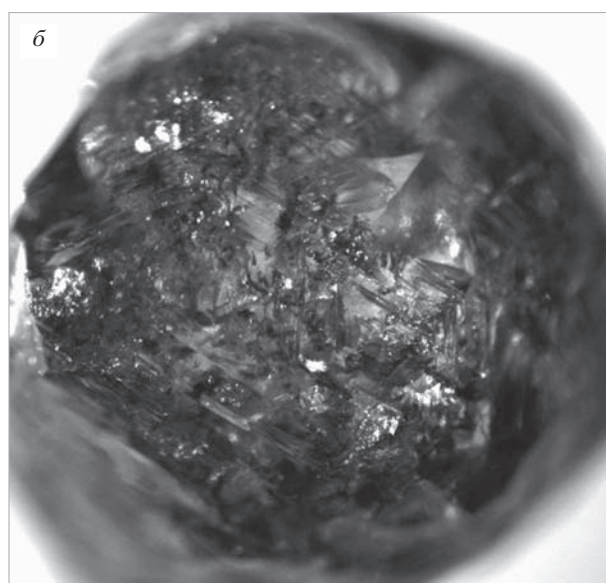
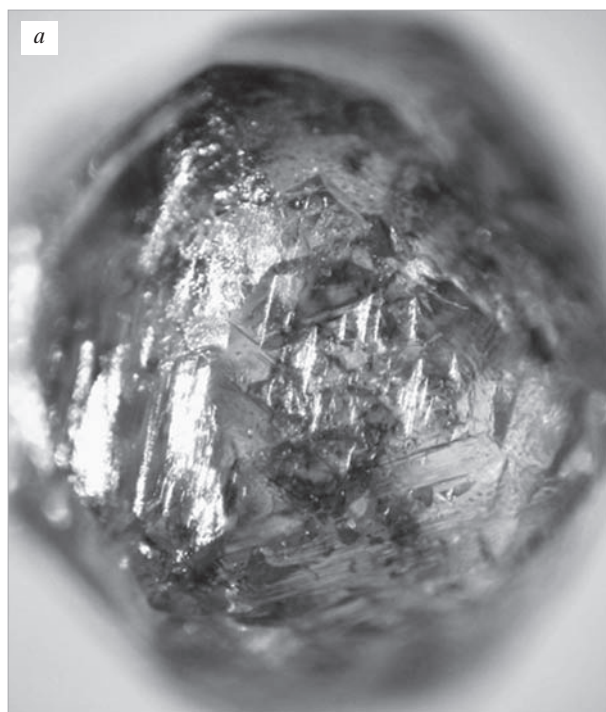
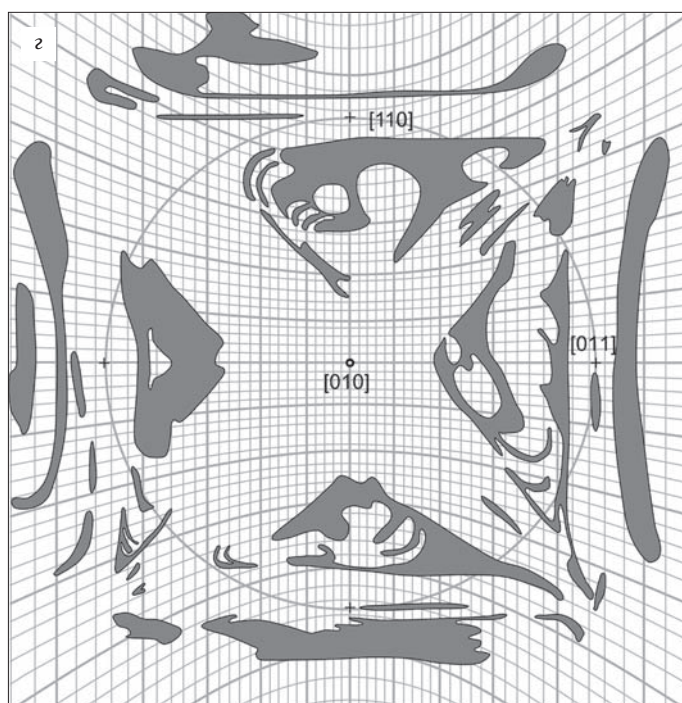
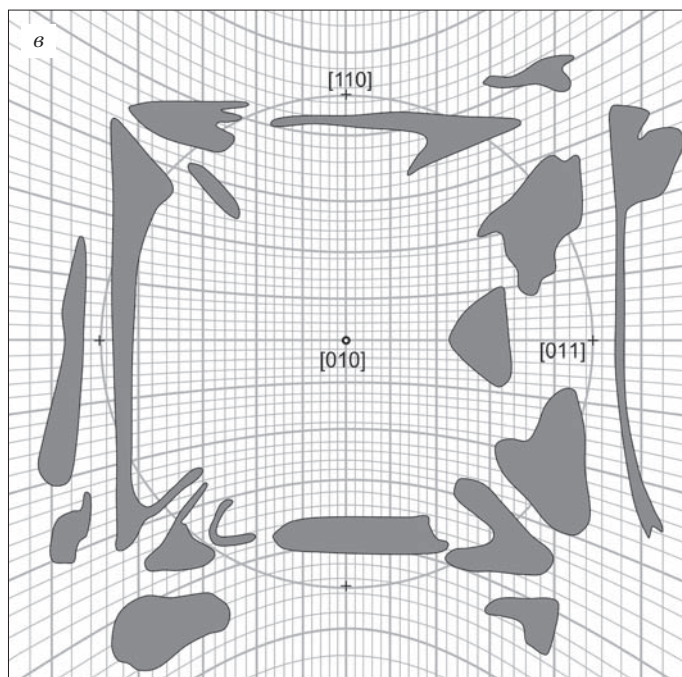


Рис. 8.10. Кристаллы V разновидности № 17893.2-1 (а), 17893.1-5 (б) и их гномограммы (соответственно в, з)



Окончание рис. 8.10

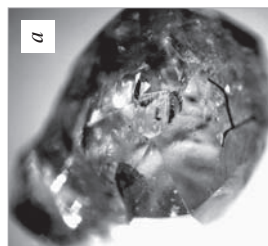
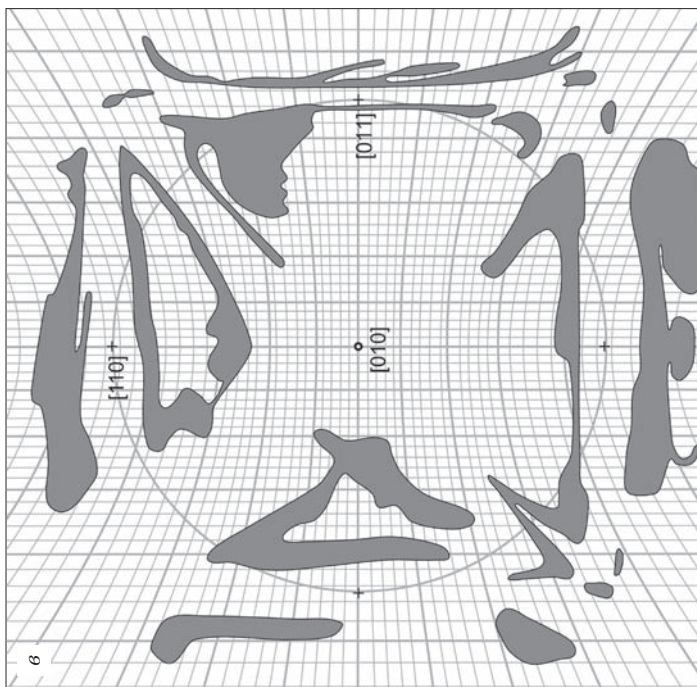
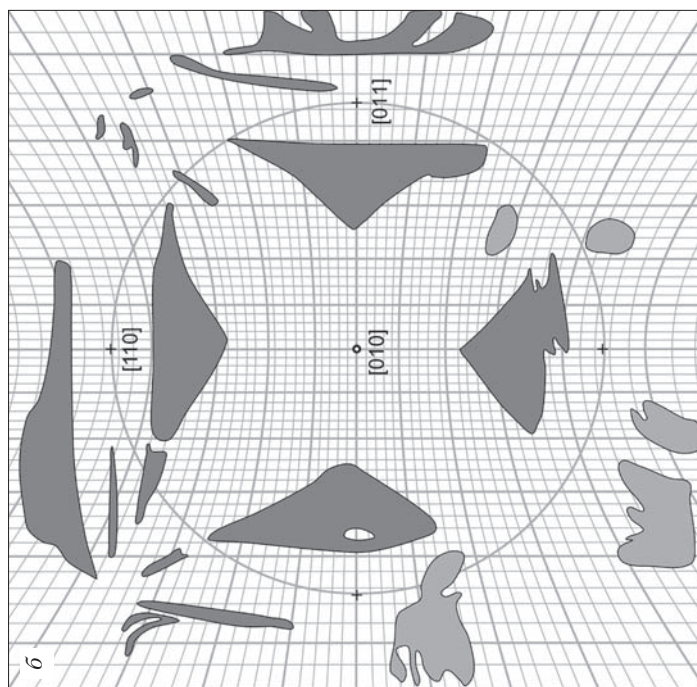


Рис. 8.11. Кристалл № 17893.3-1 (а) и гномограммы кристаллов
17893.3-1 (б), 17893.3-3 (в)



Алмазы кимберлитовых жил трубки Интернациональная

№ п.п.	Кристалл	Цилиндр	Октаэдр	Комб. рефл.	УИ	ПТ	Серп. рефл.	Мех. износ	Полигенез	Конус	Кин. травл.	Диф. травл.	Комб. травл.	Шарень	Штриховка	Регенерация
1	Ж-1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	2	0	1	1	0
2	Ж-2	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1
3	Ж-3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0
4	Ж-4	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
5	Ж-5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
6	Ж-6	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0
7	Ж-7	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
8	Ж-8	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0
9	Ж-9	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
10	Ж-10	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	2	0	1	1	0
11	Ж-11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0
12	Ж-12	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	2	0	0	1	0
13	Ж-13	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	2	0	1	1	1
14	Ж-14	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	1	1	0
15	Ж-15	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	0
16	Ж-16	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
17	Ж-17	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	0
18	Ж-18	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
19	Ж-19	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	2	0	1	1	0
20	Ж-20	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1
21	Ж-21	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	2	0	1	1	0
22	Ж-22	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
23	Ж-23	1	1	0	0	0	0	0	0	1	2	2	1	1	1	0
24	Ж-24	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	2	1	1	1	0
25	ж-25	1	1	0	2	1	1	1	1	1	0	2	0	0	1	0
26	ж-28	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	2	1	1	1	0
	Σ	15	19	0	20	13	6	19	14	16	12	26	12	22	25	4
	Σ, %	58	73	0	77	50	23	73	54	62	46	100	46	85	96	15

Почти на всех кристаллах по полярным признакам отмечается небольшой, но заметный хаотический износ поверхности, предшествовавший травлению. При этом заключительное полирующее истирание граней, приводящее обычно к диффузно рассеивающему эффекту на экране гониометра, наблюдается из всей совокупности только на одном кристалле Ж-3 (см. рис. 8.13, б). Кроме того, на многих кристаллах замечена эллипсоидная форма растворения алмаза, свидетельствующая о квазиравновесных условиях начального растворения (см. рис. 8.13, а, в).

Таким образом, можно сделать вывод, что растворение вторичных алмазов из трубки Интернациональная пришлось на период между двумя (или несколькими) активизациями кимберлитового вулканизма. В этот момент у половины кристаллов произошла пластическая деформация структуры. Ал-

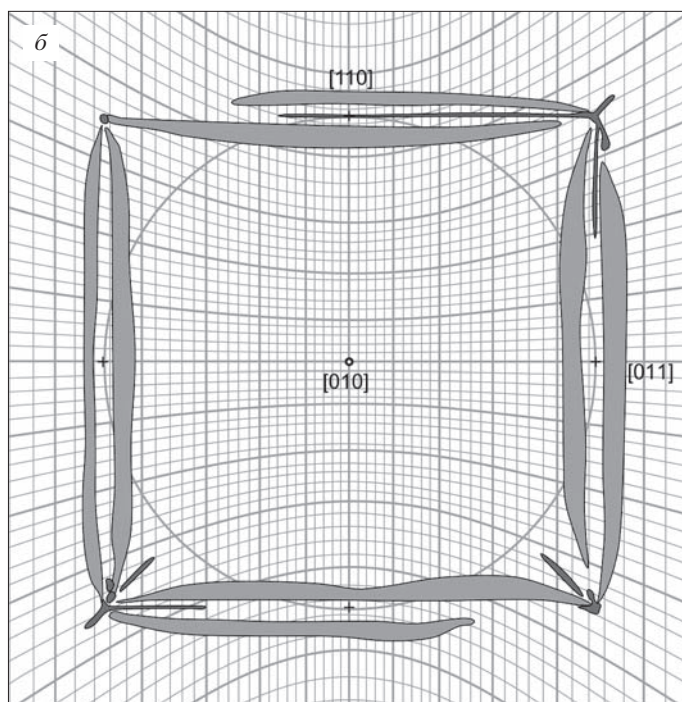
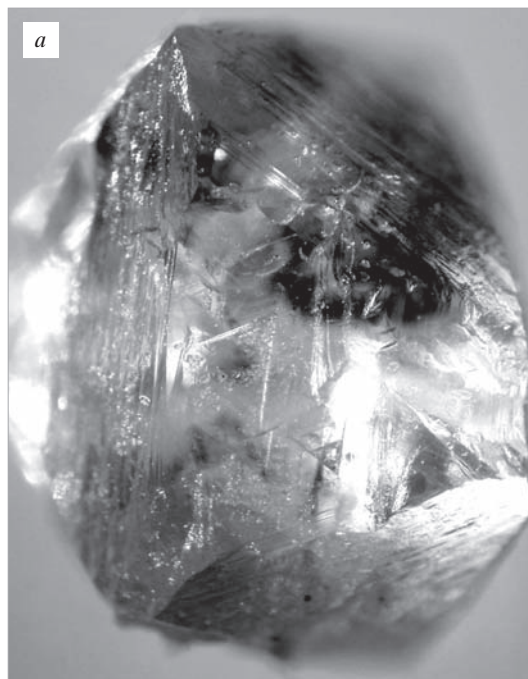


Рис. 8.12. Кристалл № Ж-21 (а) и его полярный комплекс (б)

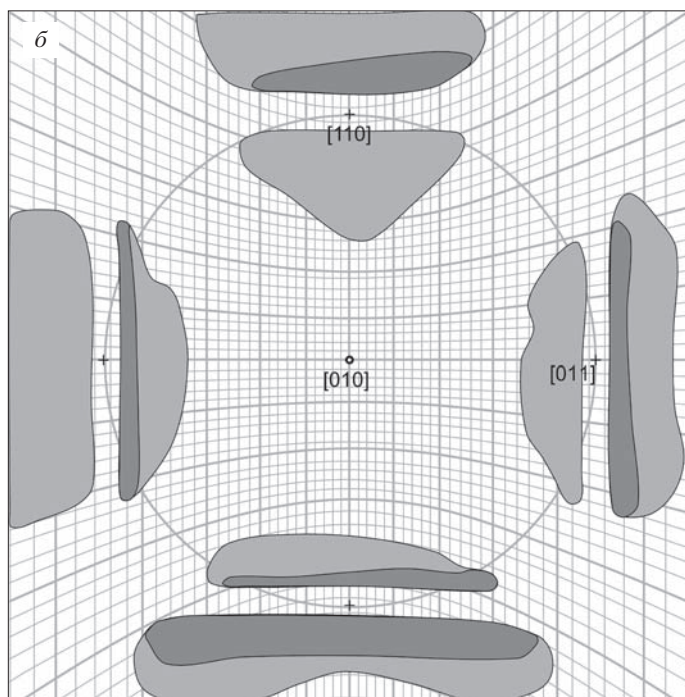
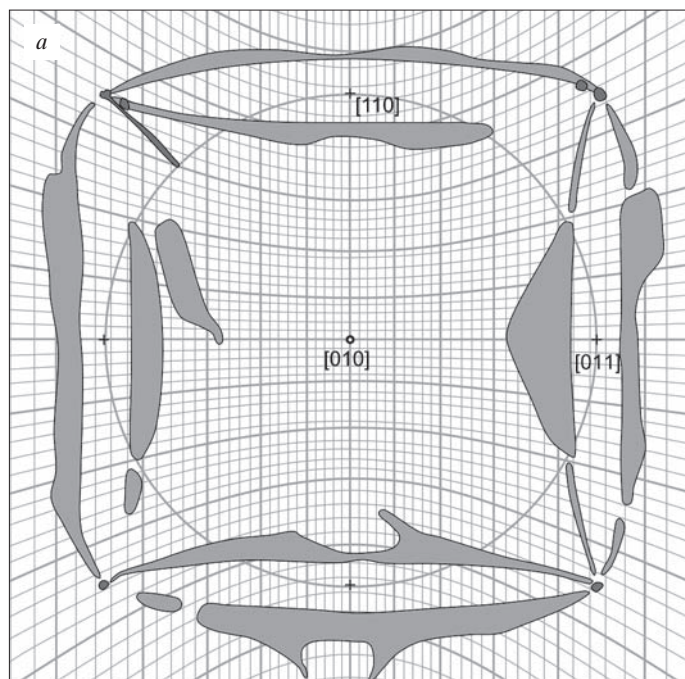
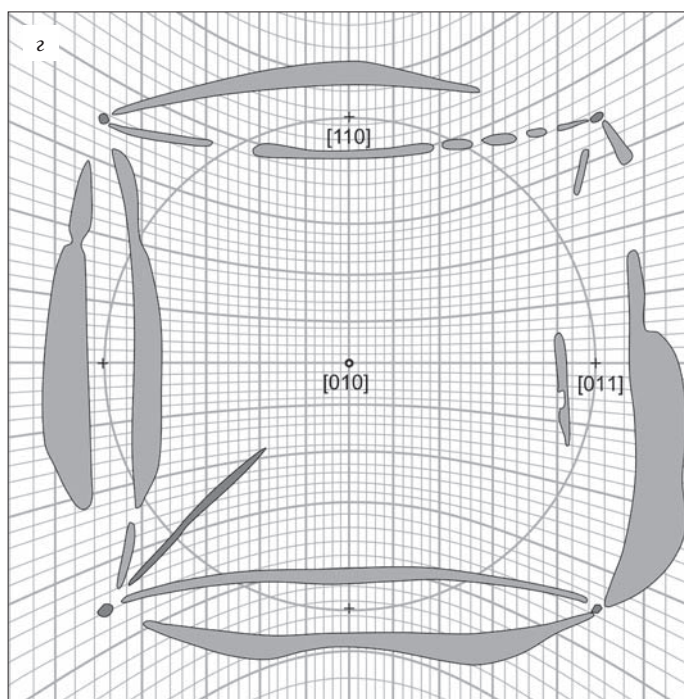
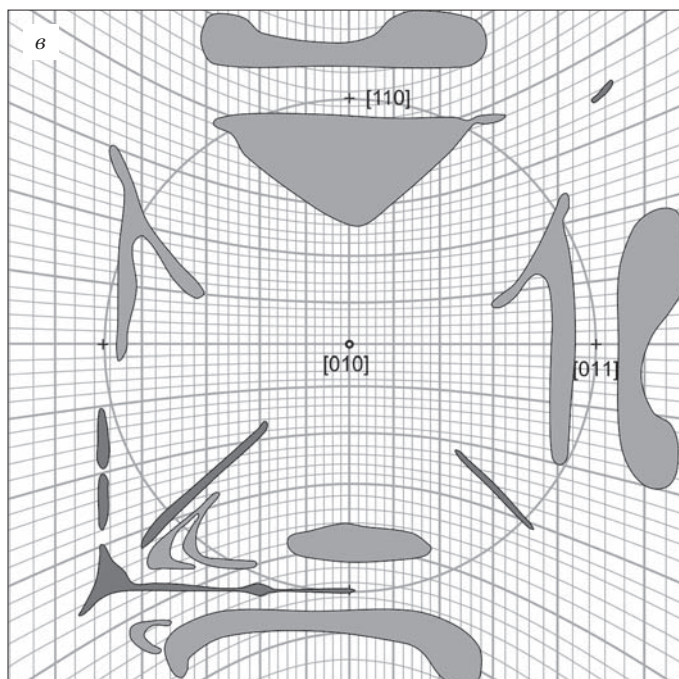
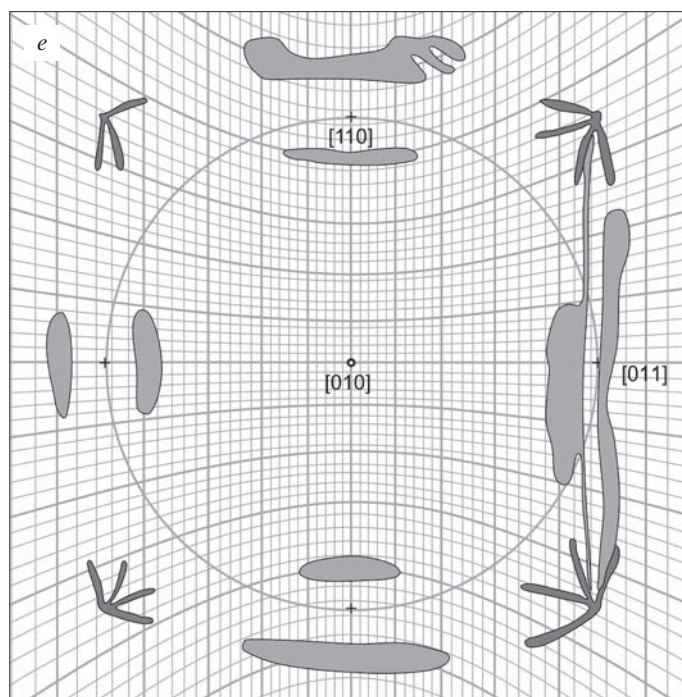
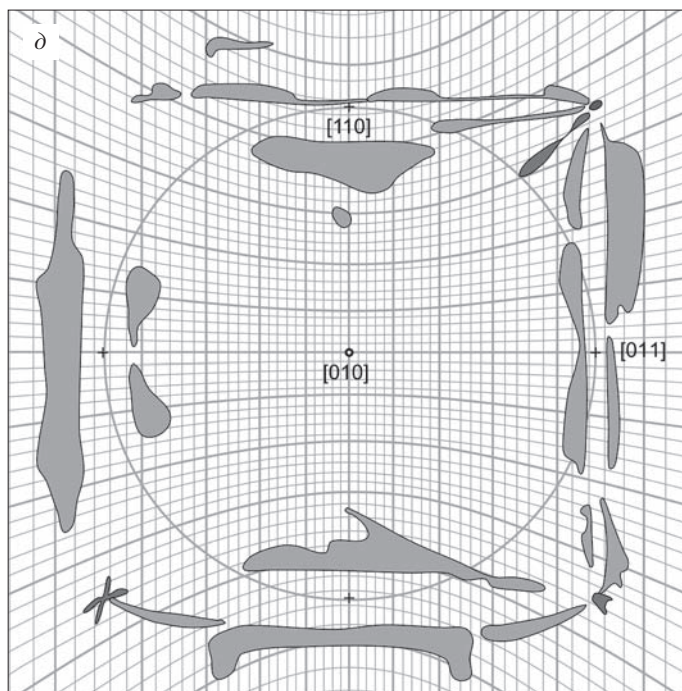


Рис. 8.13. Гномограммы алмазов Ж-1 (а), Ж-3 (б),



Ж-7 (в), Ж-10 (з), Ж-15 (д), Ж-19 (е), Ж-22 (ж), Ж-24 (з)



Окончание

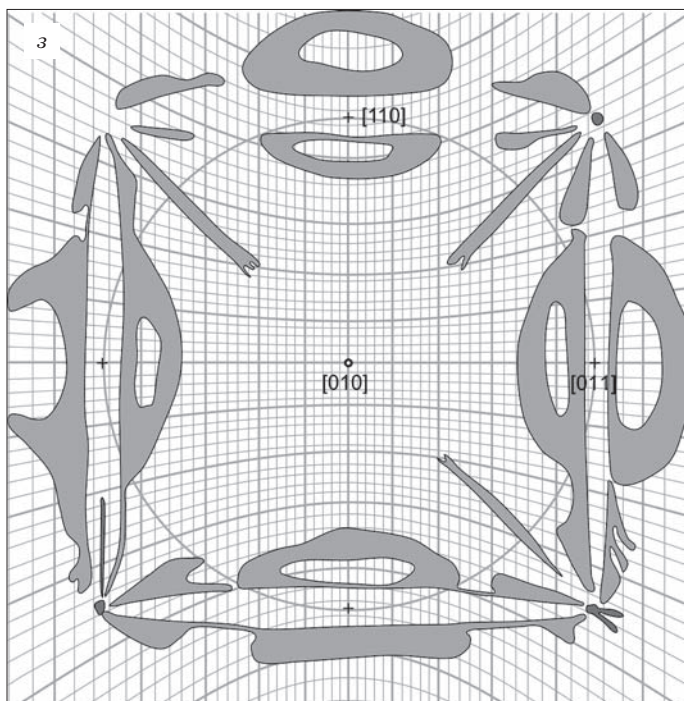
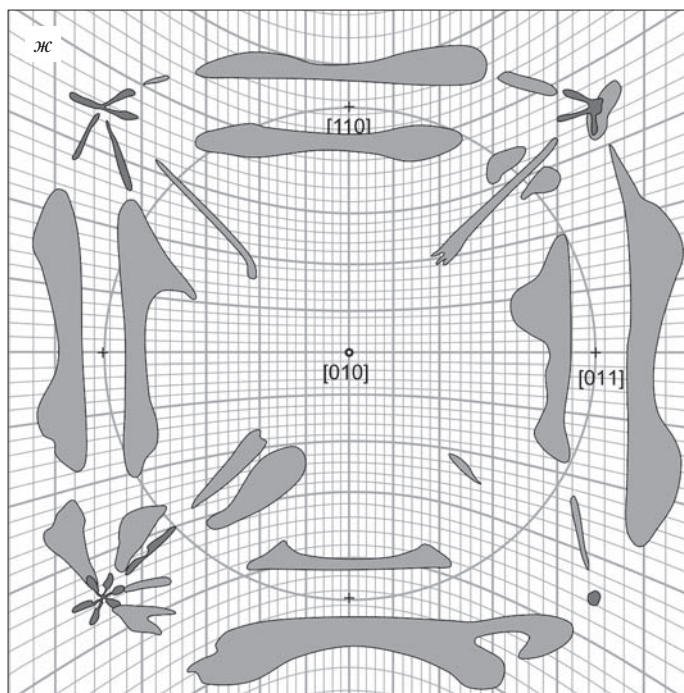


рис. 8.13

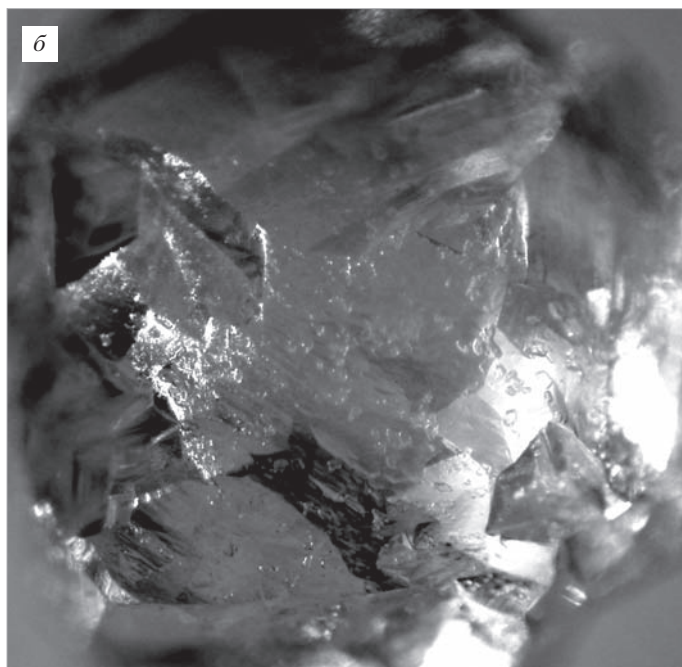
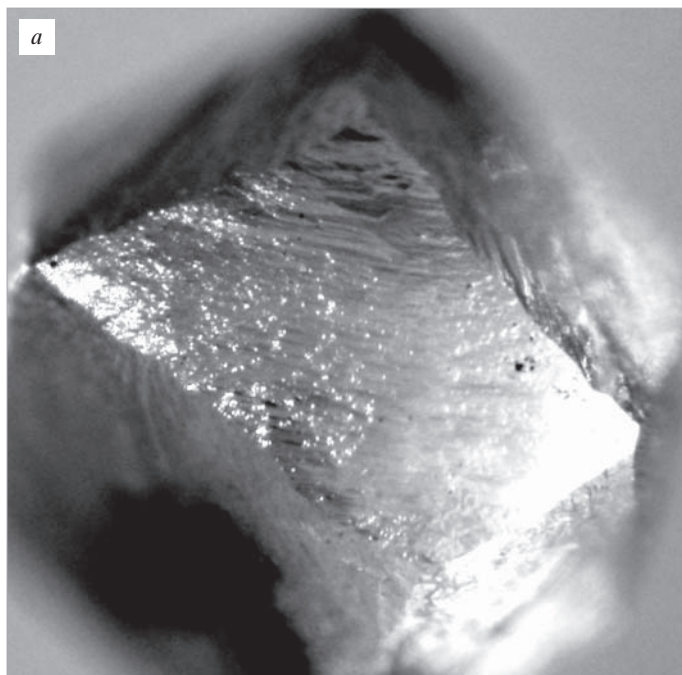
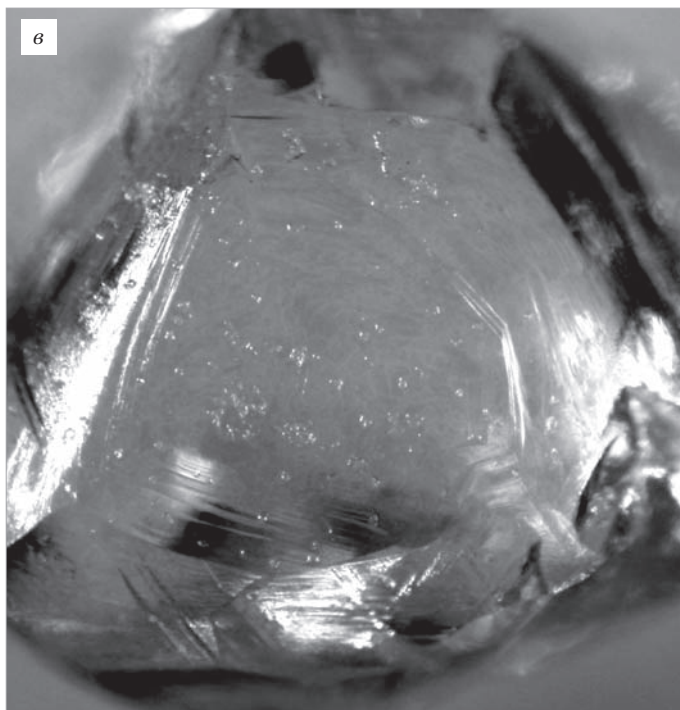


Рис. 8.14. Кристаллы Ж-3 (а),



Ж-15 (δ), Ж-22 (θ), Ж-24 (z)

мазоносный материал второй (или последующей) генерации имел, по крайней мере, одну остановку на пути выхода из глубин литосферы. На начальном, наиболее длинном отрезке движения, у слегка растворенных, не сцементированных в ксенолитах алмазах произошел механический износ поверхности. Для эффективного механического износа алмазов в составе среды кимберлита должно быть большое количество газовой фазы. Травление поверхности произошло, вероятно, во время остановки – диффузионный тип травления кристаллов свидетельствует о незначительной флюидной дегазации и однородных условиях травления в этот момент. Последний, короткий, отрезок переноса алмазосодержащего материала по жилам в теле первичного кимберлита и во вмещающих породах к поверхности Земли не привел к какому-либо значимому износу граней.

8.4. АЛМАЗЫ ТРУБКИ УДАЧНАЯ

Алмазы трубки Удачная представлены двумя коллекциями: первая коллекция – 29 алмазов из текущей механизированной добычи 2007 г., вторая коллекция – около 130 весьма несовершенных кристаллов, найденных и отобранных вручную из кимберлитовых жил второй и последующих генераций в разные годы геологами Якутии и оцененных как алмазы неясного генезиса.

8.4.1. Алмазы первой коллекции

Кристаллы 2007 г. были отобраны В.А. Петровским в целях изучения включений. При этом не ставилась задача подбора кристаллов с определенной морфологией, поэтому можно допустить, что выборка отражает практически весь спектр форм алмазов трубки Удачная, включая все генерации кимберлитового процесса, но о представительности коллекции говорить не приходится (табл. 8.8, 8.9).

Более половины кристаллов представляют собой октаэдры или комбинированные формы октаэдроидов с додекаэдроидом и кубоидом. Для кристаллов, насыщенных включениями и поэтому обладающих несовершенной структурой, характерна в целом сложная морфология (рис. 8.15, 8.16). Поскольку только небольшая часть кристаллов испытала стадию растворения и трансформировалась из октаэдра в додекаэдроид, пластические течения структуры, выявляемые по модифицированным рефлексам эллипсоида, отмечаются только у 10 кристаллов (34%). Одновременно признаки ударного износа замечены у 21 кристалла (72%), а максимальная степень – у 6 кристаллов (30%), что обычно свойственно россыпным кристаллам. Диффузионный режим травления наблюдается у 26 кристаллов (90%), у 14 алмазов (54%) зарегистрирована максимальная степень диффузионного травления, как и на алмазах кимберлитовых жил трубки Интернациональная.

Высокая степень травления, возможно, свойственна многим алмазам кимберлитового генезиса и указывает на прерывистый, многоэтапный процесс выноса алмазосодержащего материала из недр литосферы. Диффузи-

Алмазы первой коллекции из трубки Удачная

№ п.п.	Кристалл	Масса, кар	Описание
1	У-1	0,320	Октаэдронд-додекаэдронд. «Двуликий Янус»
2	У-2	0,432	Додекаэдронд с множеством ламелей и черных включений
3	У-3	0,339	Октаэдронд. Крупные включения графита (?) и розового граната
4	У-4	0,343	Куб–октаэдр–ромбододекаэдр, ямки травления, есть включение
5	У-5	0,380	Октаэдронд с ямками по L_4 . Два светлых включения и трещины от них. Тонкая шагрень
6	У-6	0,394	Додекаэдронд, грубые ступени по октаэдру, регенерация
7	У-7	0,448	Додекаэдронд, ППД и грубая штриховка
8	У-8	0,438	Октаэдронд с блочным рельефом
9	У-9	0,438	Уплощенный октаэдронд с трещиной и включением
10	У-10	0,334	Октаэдр, включение отрицательного октаэдра. Черные включения, в нескольких вершинах октаэдра двойники и сростки
11	У-11	0,422	Додекаэдронд, ППД, мелкая шагрень, трещины по границам блоков
12	У-12	0,333	Додекаэдронд, сноповидная штриховка
13	У-13	0,382	Октаэдронд, включение, фигуры травления. Спеклы
14	У-14	0,428	Додекаэдронд, мелкие ламели. Параллельный сросток, двойник (?)
15	У-15	0,381	Додекаэдронд–октаэдронд, сноповидная штриховка, крупное черное включение и трещины от него
16	У-16	0,382	Додекаэдронд блочный, шагрень
17	У-17	0,370	Додекаэдронд, ламели, ребра изношены
18	У-18	0,437	Додекаэдронд, ламели, ребра изношены, обломок
19	У-19	0,347	Октаэдронд, трещины, черные включения у поверхности, травление
20	У-20	0,351	Додекаэдронд, штриховка и мелкие ламели
21	У-21	0,366	Додекаэдронд, штриховка, ламели и трещина, включение
22	У-22	0,390	Октаэдронд–додекаэдронд, штриховка, ППД
23	У-23	0,448	Октаэдронд–додекаэдронд, желобы и ямы травления, регенерация
24	У-24	0,344	Блочный додекаэдронд, ламели, включение
25	У-25	0,429	Желтый октаэдронд, множество включений и трещины от них
26	У-26	0,330	Желтый октаэдр. Диффузные рефлексy
27	У-27	0,416	Октаэдронд–додекаэдронд желтый. «Двуликий Янус», ламели, ППД, черные включения
28	У-28	0,319	Куб–октаэдр–ромбододекаэдр, ППД
29	У-29	0,190	Сложный незакономерный сросток не менее трех индивидов, обломок

**Полярные и физиографические показатели поверхностей алмазов первой коллекции
из трубки Удачная**

№ п.п.	Кристалл	Цилиндр	Октаэдр	Комб. рефл.	УИ	ПТ	Серп. рефл.	Мех. износ	Полигенез	Конус	Кин. травл.	Диф. травл.	Комб. травл.	Шагрень	Штриховка	Регенерация
1	У-1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0
2	У-2	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0
3	У-3	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	2	1	0	1	1
4	У-4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	2	1	0	1	1
5	У-5	1	1	0	1	0	0	1	1	1	2	2	1	0	1	0
6	У-6	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	2	0	1	1	1
7	У-7	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0
8	У-8	1	1	0	2	0	1	1	1	1	2	1	1	0	1	0
9	У-9	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0
10	У-10	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
11	У-11	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	2	0	0	1	0
12	У-12	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0
13	У-13	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0
14	У-14	1	1	0	0	1	0	1	1	1	2	2	1	1	1	0
15	У-15	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0
16	У-16	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0
17	У-17	1	0	0	2	0	0	0	1	1	0	2	0	0	1	0
18	У-18	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0
19	У-19	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	2	1	0	1	0
20	У-20	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0
21	У-21	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	2	0	0	1	0
22	У-22	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	2	1	0	1	0
23	У-23	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	2	1	0	1	1
24	У-24	1	1	0	2	0	0	1	1	1	0	2	0	0	1	0
25	У-25	1	1	0	2	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0
26	У-26	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	1	0
27	У-27	1	1	0	2	0	0	1	1	1	1	2	1	1	1	0
28	У-28	1	1	0	2	1	0	1	1	1	0	2	0	0	1	0
29	У-29	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0
	Σ	26	26	0	21	10	4	22	23	18	20	26	18	7	29	4
	Σ, %	90	90	0	72	34	14	76	79	62	69	90	62	24	100	14

онный режим травления мог происходить на стадии остановки движения при ограниченной окислительной флюидной дегазации. На этапе движения кимберлитовой массы возможен только кинетический режим травления, если он реализуется. Но при механическом движении глубинного материала механический износ алмазов – основной, подавляющий фактор и травление не должно проявляться эффективно. В данном случае, вероятно, кинетический режим травления реализовался одновременно с диффузионным (18 из 20 кристаллов) на разных участках поверхности алмаза на стадии остановки.

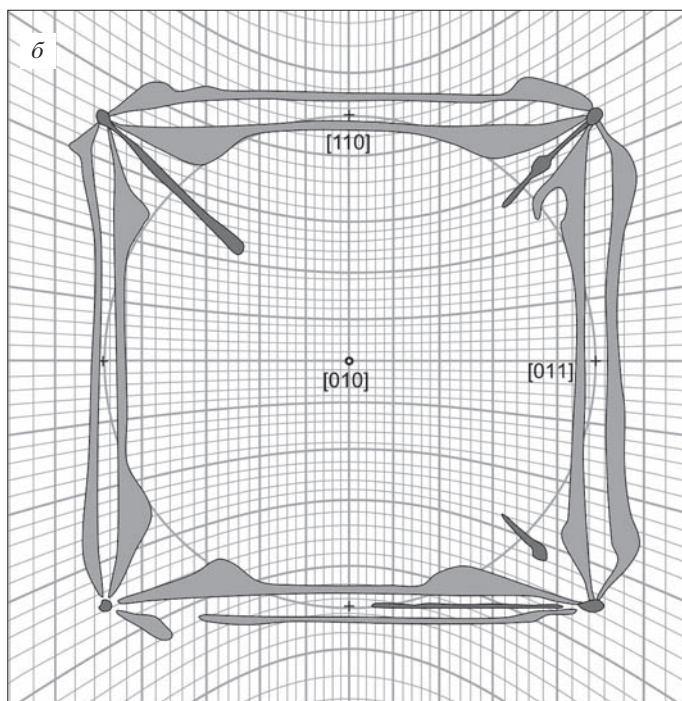
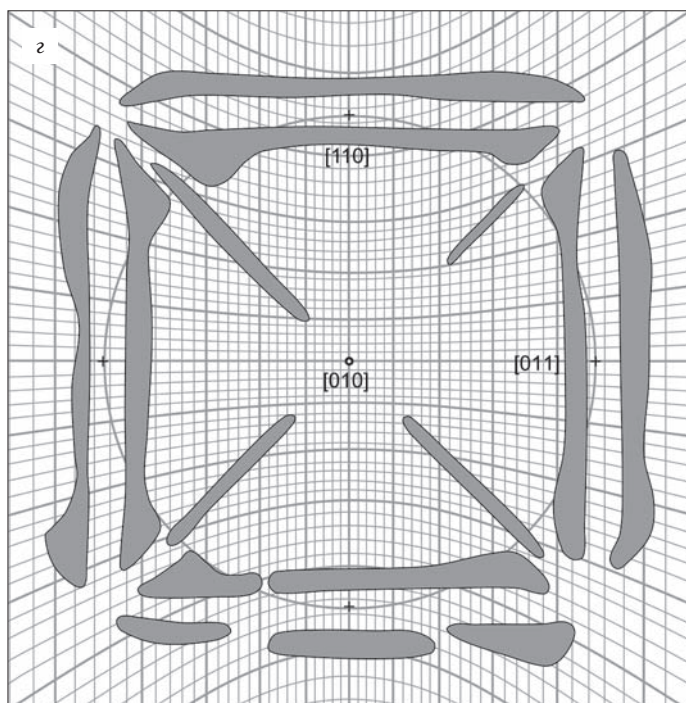
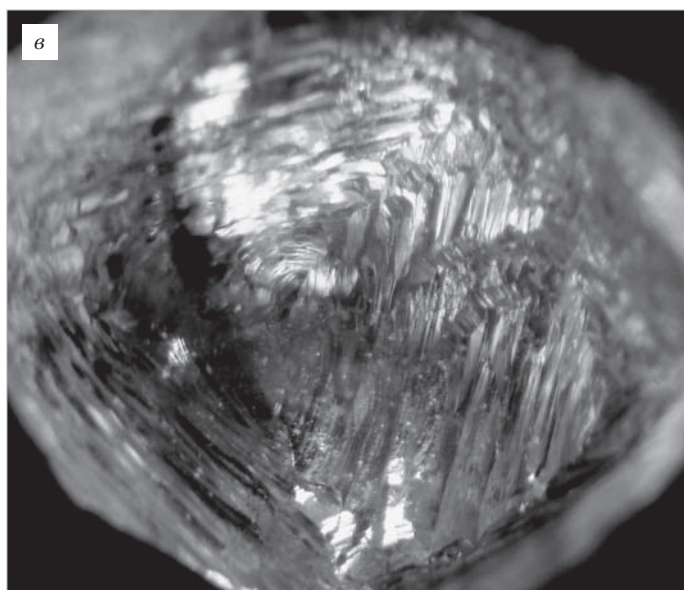


Рис. 8.15. Кристаллы У-3 (*a*), У-6 (*б*) и их гномограммы (соответственно *б*, *з*)



Окончание рис. 8.15

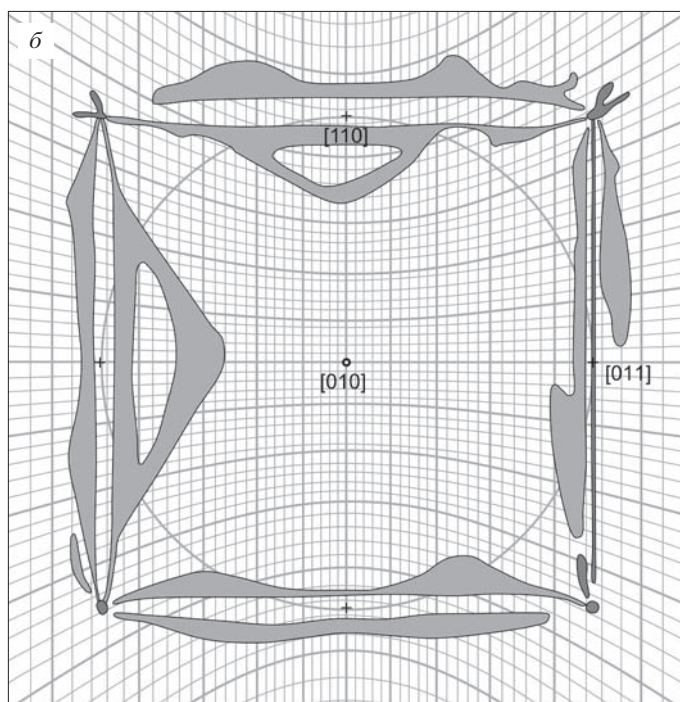
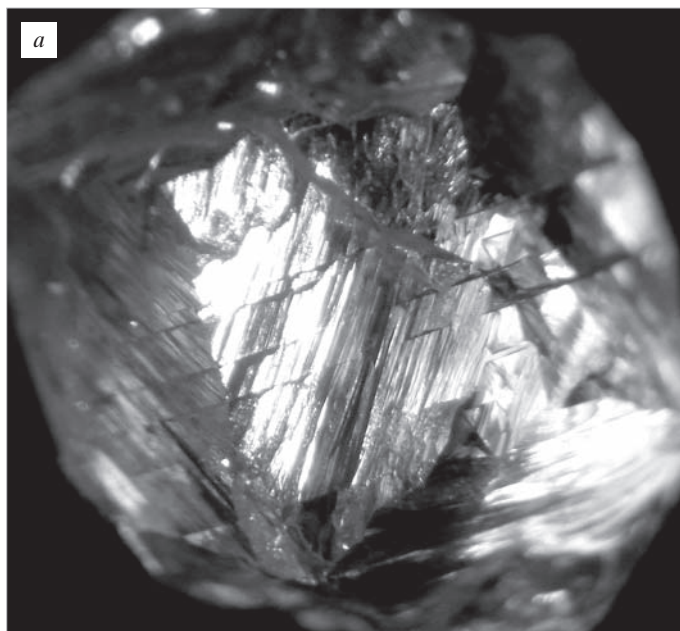
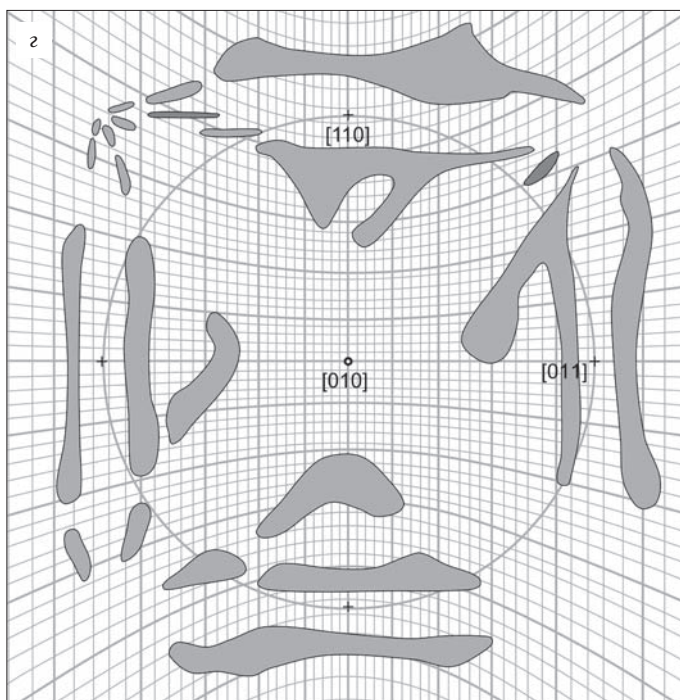
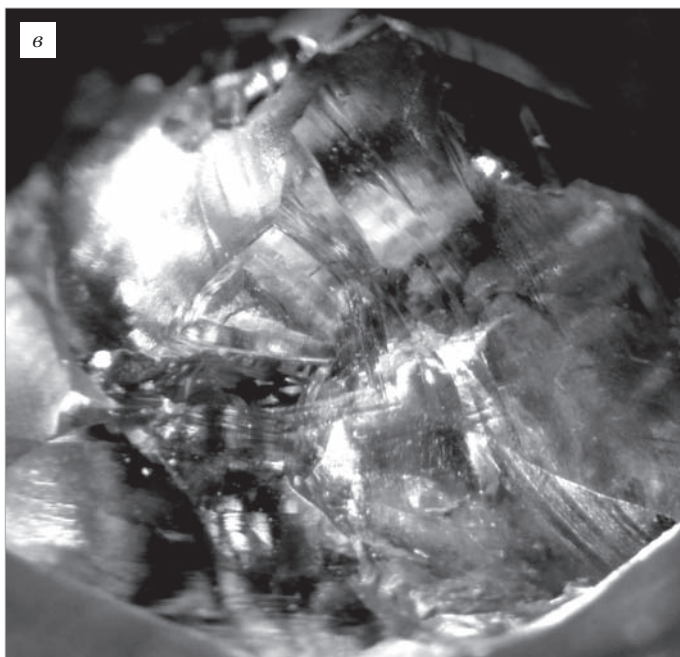


Рис. 8.16. Кристаллы и их гномограммы:
a, б – У-7; *в, з* – У-11; *д, е* – У-15



Окончание

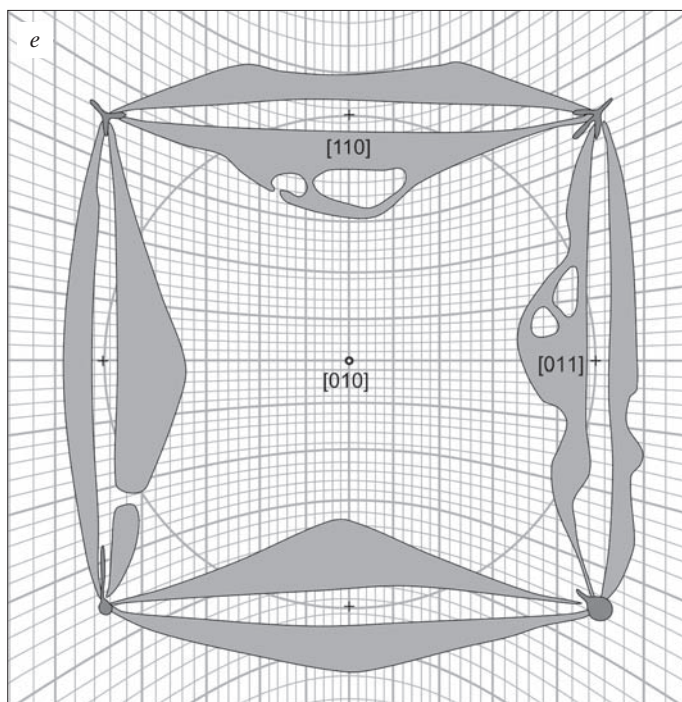
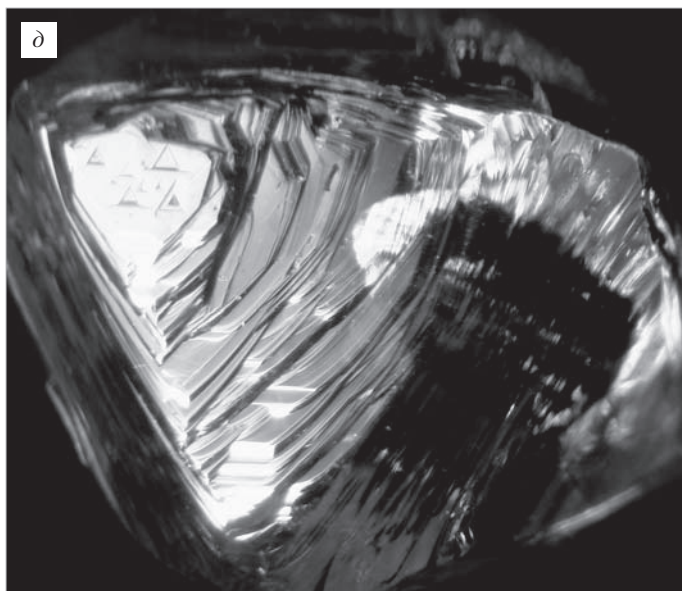


рис. 8.16

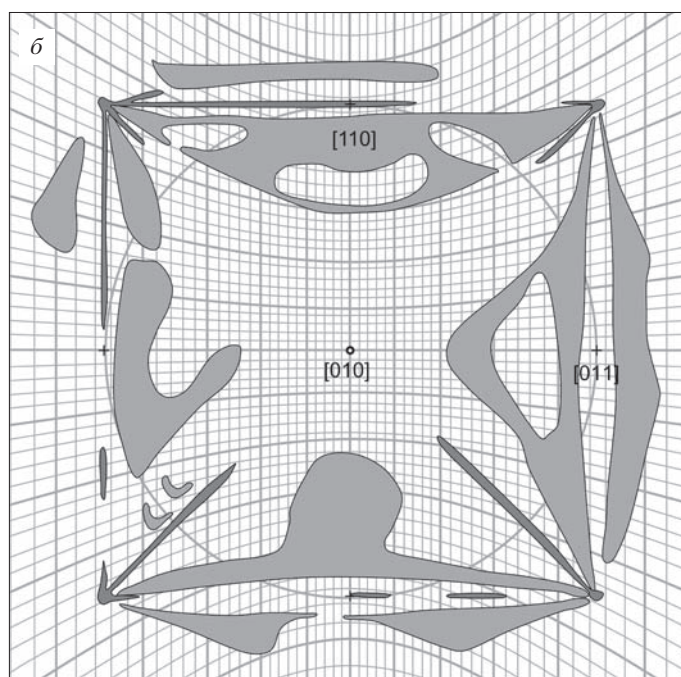
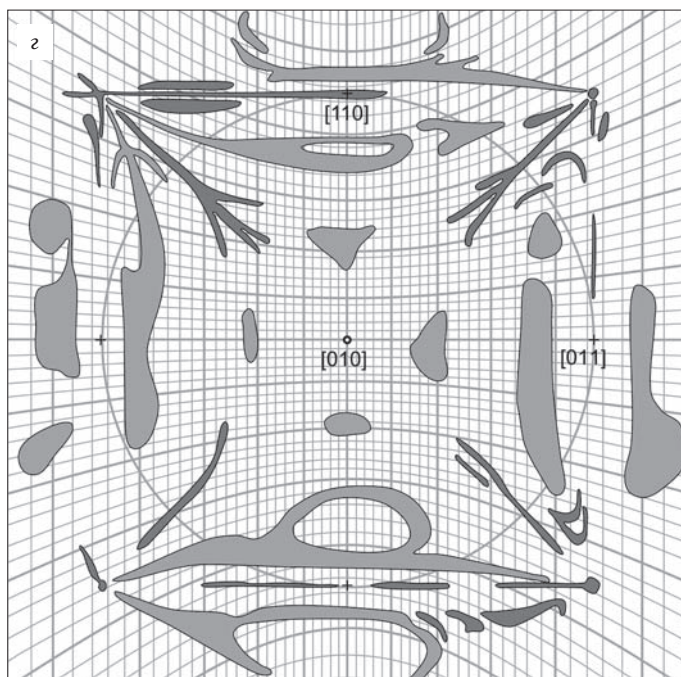
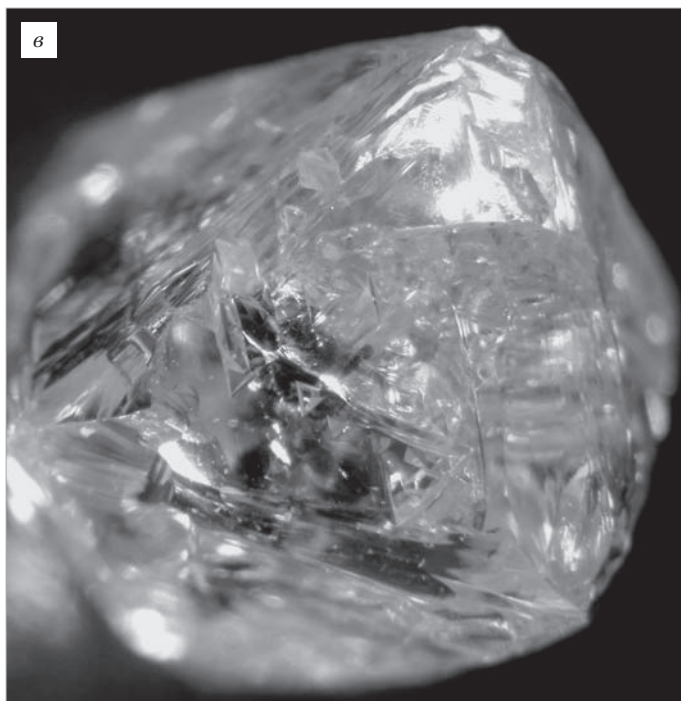
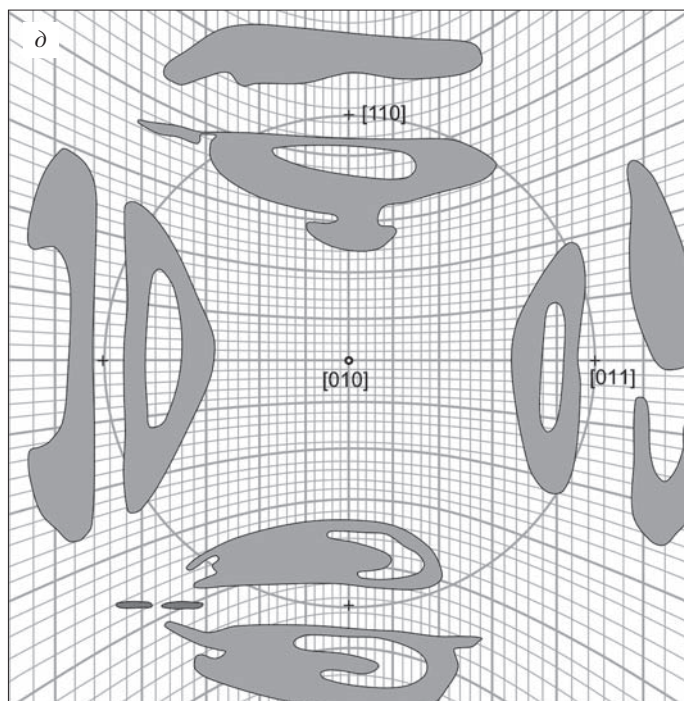


Рис. 8.17. Алмаз У-25 (а) и его полярный комплекс (б), алмаз



У-8 (в) и его гномограмма (з), гномограмма кристалла У-17 (д)



Окончание
рис. 8.17

На примерно 25% алмазах трубки Удачная отмечается интенсивный механический износ поверхности, что свидетельствует о значительной газовой составляющей кимберлитового вещества. Для сравнения: в трубке Интернациональная встречен только один такой кристалл (3%), вероятно, здесь доля газовой фазы была не столь значительна. Наблюдаемая закономерность согласуется с экспериментальными данными по составу первичного вещества кимберлита трубки Удачная (Шарыгин и др., 2013). Первичный кимберлитовый расплав трубки Удачная–Восточная был в основном кальциево-карбонатитовым (Там же). При достижении отметки 100 км и давлении менее 3 ГПа карбонатитовый расплав разлагается по реакции декарбонизации с выделением газовой фазы CO_2 . Нам представляется, что именно с этого момента алмазы начали испытывать активный механический износ в трехагрегатной газовой–жидкой–твердой среде кимберлитовой массы, непрерывно изменяющей свой фазовый состав, в котором по ходу подъема жидкая составляющая уменьшалась, а газовая росла.

На рис. 8.15 представлены два кристалла – октаэдроид и додекаэдроид, обладающие близким набором полярных характеристик. Им свойственно развитое диффузионное травление, но на октаэдроиде У-3 в центре граней октаэдра реализуется кинетический режим травления. Алмаз У-6 испытал этап полирующего механического износа после стадии травления.

В морфологии кристаллов У-7, У-11, У-15 сохранилась реликтовая поверхность эллипсоида растворения, хотя и модифицированная хаотическим

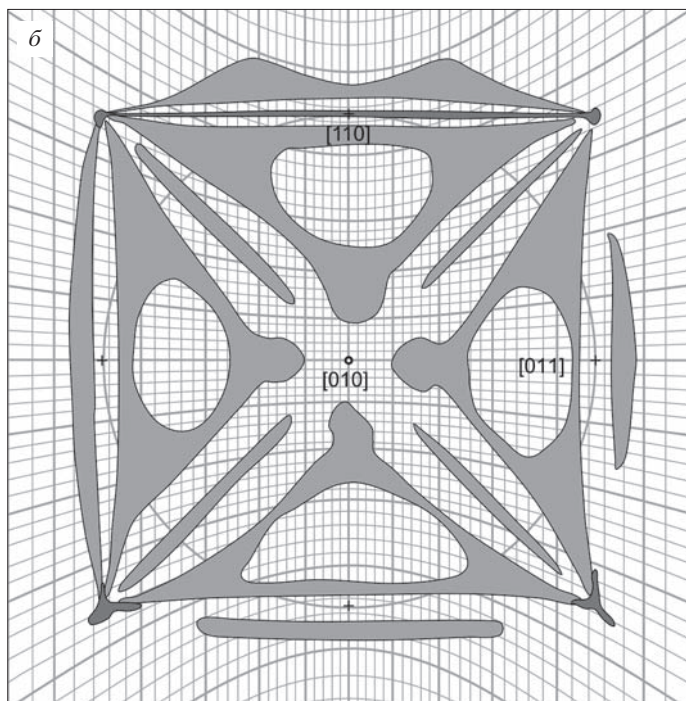
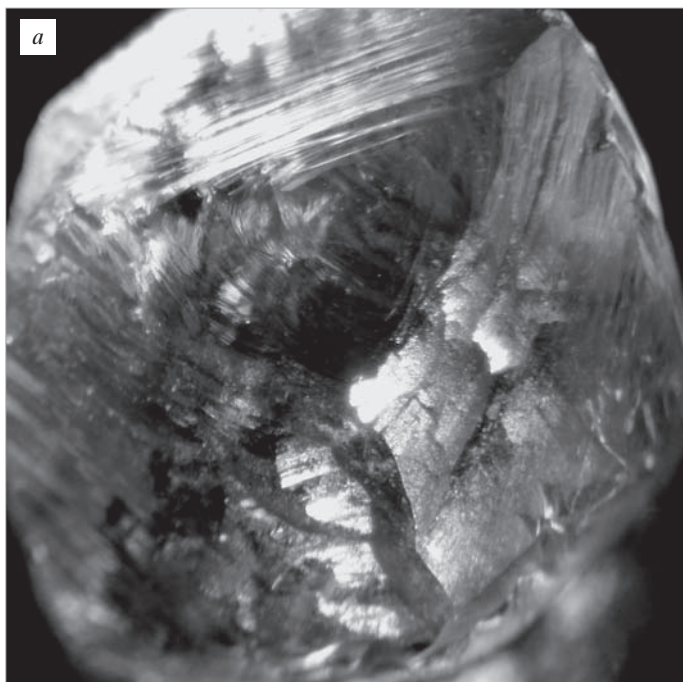


Рис. 8.18. Кристалл У-27 (*a*) и его гномограмма (*б*)

износом и небольшими пластическими деформациями (см. рис. 8.16). Предельная степень износа поверхности, предшествовавшая травлению, отмечается, например, на кристаллах У-8, У-17 и У-25 (рис. 8.17). На данных алмазах наблюдаются явные различия в химических реакциях травления, связанные с блочным строением (алмаз У-8 и часть поверхности алмаза У-25), смешанным режимом травления (У-25) и практически чистым диффузионным травлением поверхности (У-17).

На алмазах У-8 (см. рис. 8.17, в), У-18, У-24 и У-27 (рис. 8.18) замечено образование особых поверхностей травления, расположенных на гномограмме близко к точке гексаэдра (010). Угол отклонения нормалей от оси L_4 находится в пределах 10–20°. Можно предположить, что, во-первых, интенсивный хаотический износ привел к скалыванию некоторых четверных вершин додекаэдроидов (выходы осей четвертого порядка) и, во-вторых, смешанный нестационарный режим травления сформировал сателлитные поверхности вокруг F-граней алмаза – {111} и {100}. Таким образом, треугольные рефлексy на рис. 8.17, в, расположенные в области эллипсоида II типа, в данном случае обусловлены смешанным режимом травления механически сильно изношенных поверхностей додекаэдроидов алмаза.

8.4.2. Алмазы второй коллекции

Около 130 кристаллов, отобранных из кимберлитовых жил последней генерации, в основном представляют собой незакономерные сростки и двойники. Группа алмазов, насчитывающая 39 кристаллов, была изучена на гониометре (табл. 8.10). Из них 35 представляли собой сростки и 4 алмаза внешне и по гномограмме выглядели как монокристаллы. Закономерное двойникование по шпинелевому закону отмечается у 10 кристаллов, что близко к имеющимся 30% в сростках.

Жильные алмазы можно разделить на несколько морфологических типов.

1. Кристаллы с сильным ударным износом поверхности и небольшим травлением (рис. 8.19). Может быть проявлено как диффузионное (см. рис. 8.19, а), так и смешанное травление (рис. 8.19, б–г). Важно отметить, что основной износ кристаллов происходил до травления алмаза, но на некоторых кристаллах также отмечается заключительный этап полирующего травления (см. рис. 8.19, б). Алмазы данной группы хорошо представлены в изученной совокупности и составляют не менее 20%.

2. У алмазов, сильно модифицированных травлением, оказались стерты некоторые признаки предыдущих процессов (рис. 8.20). Например, на алмазе № 263-5 сохранился только один рефлекс, свидетельствующий о форме предельного хаотического механического износа поверхности (см. рис. 8.20, б). Остальные кристаллы утратили фрагменты соответствующих поверхностей в результате травления, но некоторые следы значительного механического износа алмазов сохранились в форме утолщений на линейных рефlekсах, расположенных параллельно линиям тригонтриоктаэдра. Такие кристаллы тоже составляют около 20%.

Таблица 8.10

**Полярные и физиографические показатели поверхностей алмазов второй коллекции
из трубки Удачная**

№ п.п.	Номер кристалла	Цилиндр	Октаэдр	Комб. рефл.	УИ	ПТ	Серп. рефл.	Мех. износ	Полигенез	Конус	Кли. травл.	Диф. травл.	Комб. травл.	Двойники	Шагрень	Штриховка	Регенерация
1	258	0	0	0	2	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
2	259	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0
3	260-1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1
4	260-2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
5	260-3	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1
6	261-1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
7	261-2	1	1	0	0	0	0	0	0	1	2	1	1	1	0	1	0
8	261-3	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0
9	261-4	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0
10	263-1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	2	1	0	1	1	0
11	263-2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	1	1
12	263-3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
13	263-4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
14	263-5	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	2	1	0	0	1	0
15	267-1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1
16	267-2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	1
17	267-3	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0
18	267-4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1
19	267-5	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
20	272-1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	2	2	1	0	0	1	1
21	272-2	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	2	0	0	0	1	1
22	272-3	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	2	1	0	1	0	0
23	272-4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
24	272-5	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	2	1	0	1	0	0
25	272-6	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
26	276-1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1
27	276-2	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
28	276-3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1
29	276-5	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
30	279-1	1	1	0	2	0	0	1	1	0	2	1	1	0	1	0	0
31	279-2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
32	279-3	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0
33	300-1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
34	300-2	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0
35	300-4	1	1	0	2	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0
36	300-5	1	1	0	2	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
37	300-6	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
38	300-7	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
39	300-8	1	1	0	2	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0
	Σ	31	27	0	25	10	3	25	18	12	25	28	19	10	17	25	15
	Σ, %	79	69	0	64	26	8	64	46	31	64	72	49	26	44	64	38

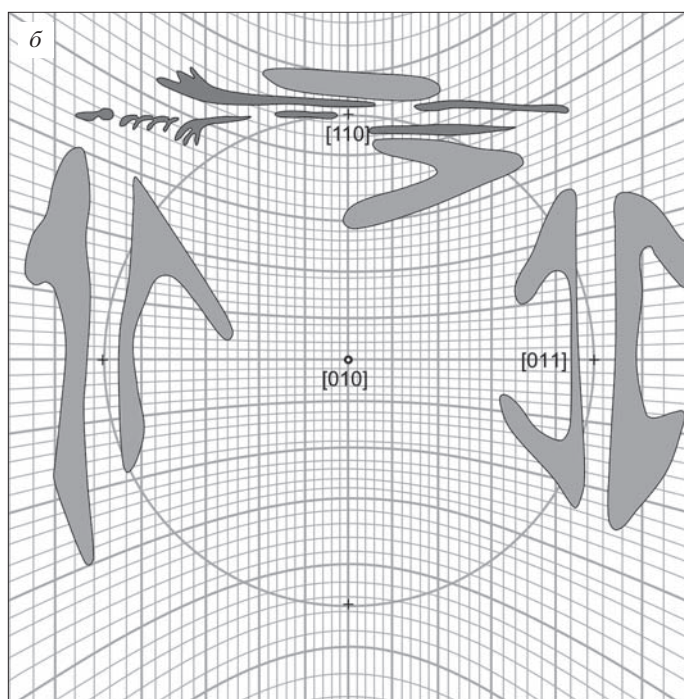
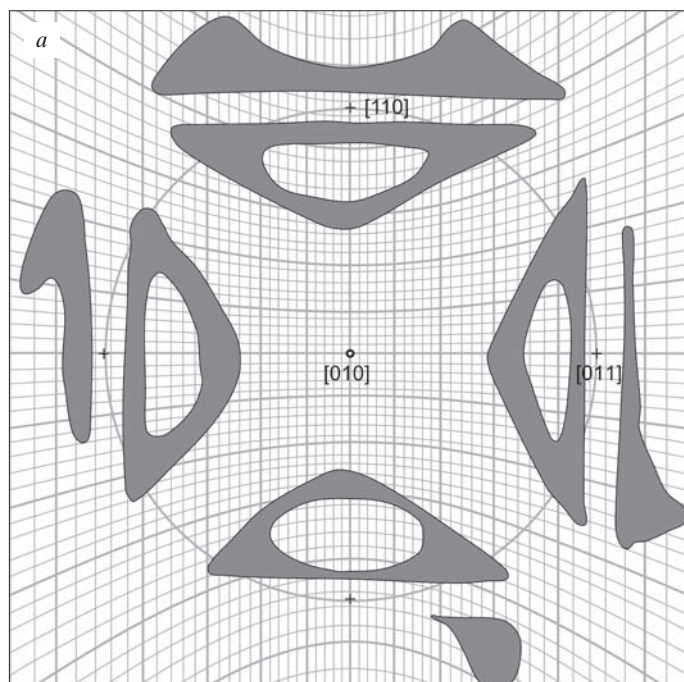
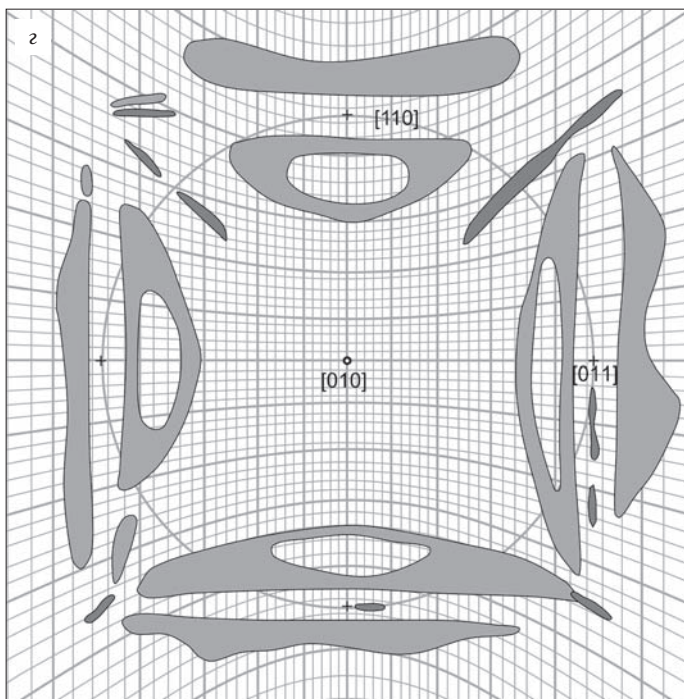
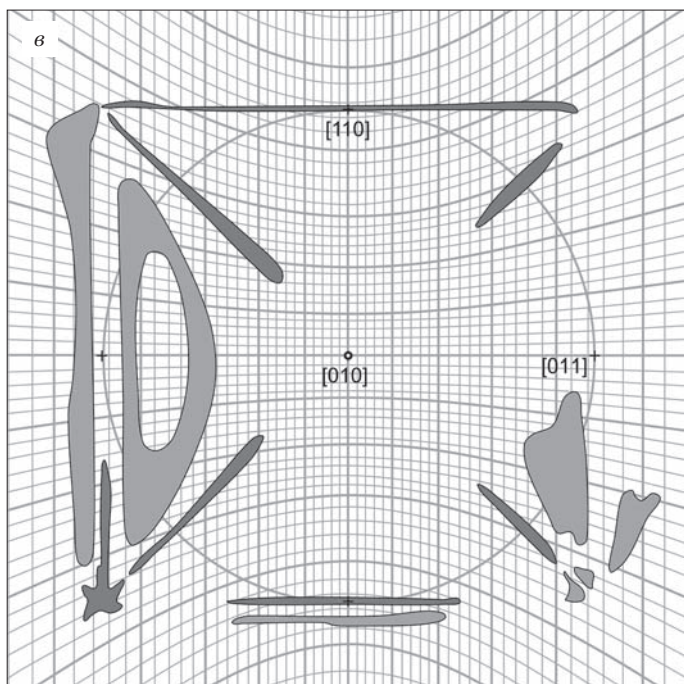


Рис. 8.19. Гномограммы алмазов № 258 (*a*),



261-3 (δ), 279-1 (θ), 300-4 (z)

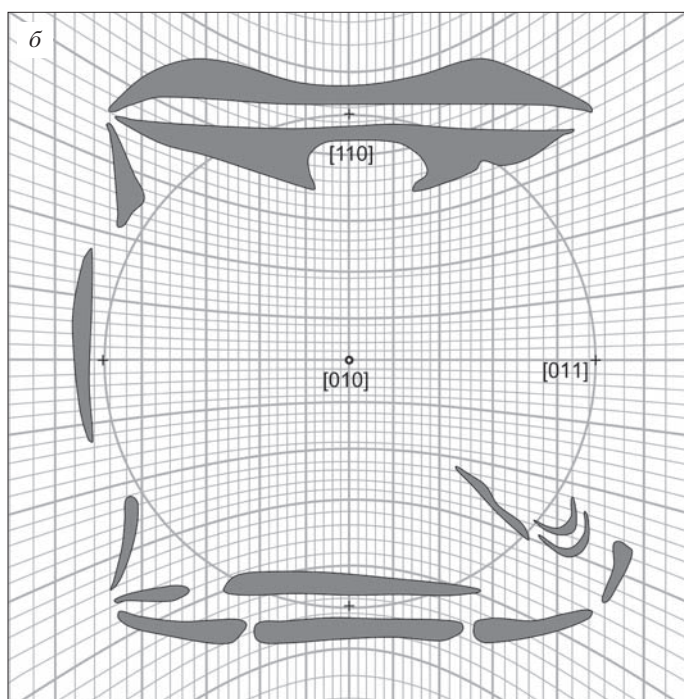
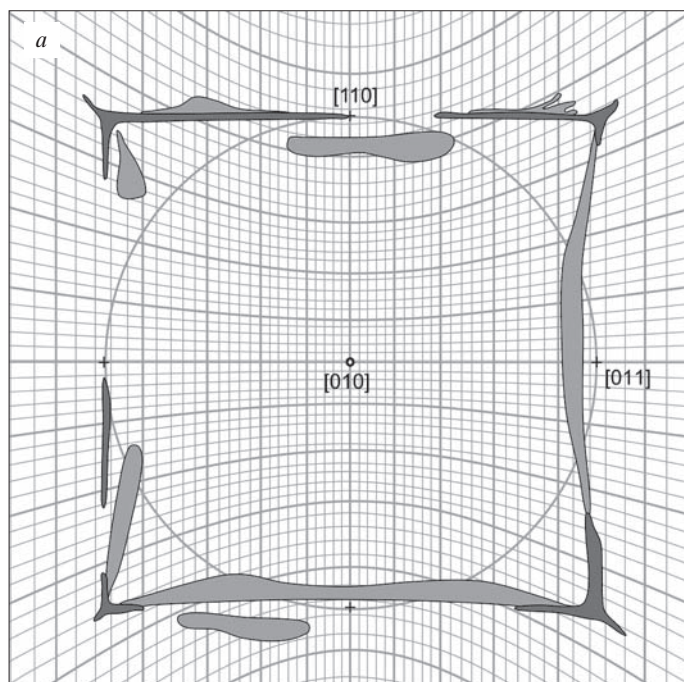
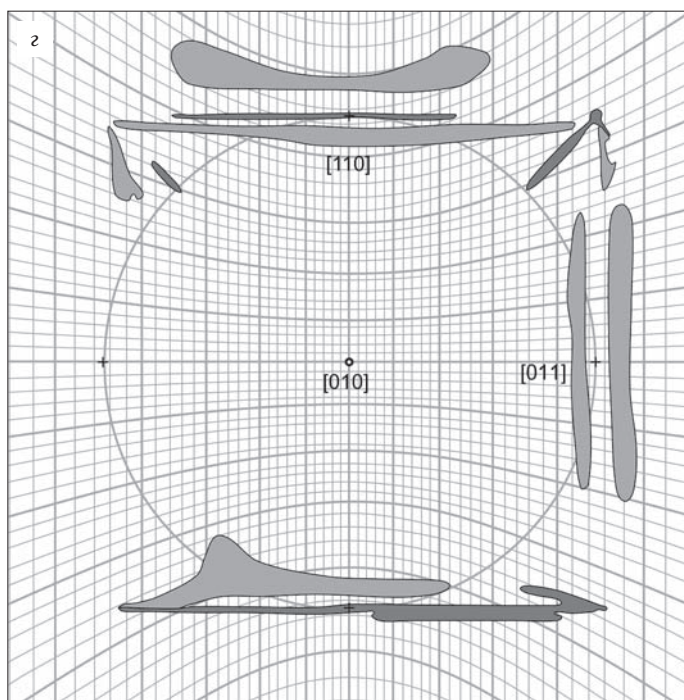
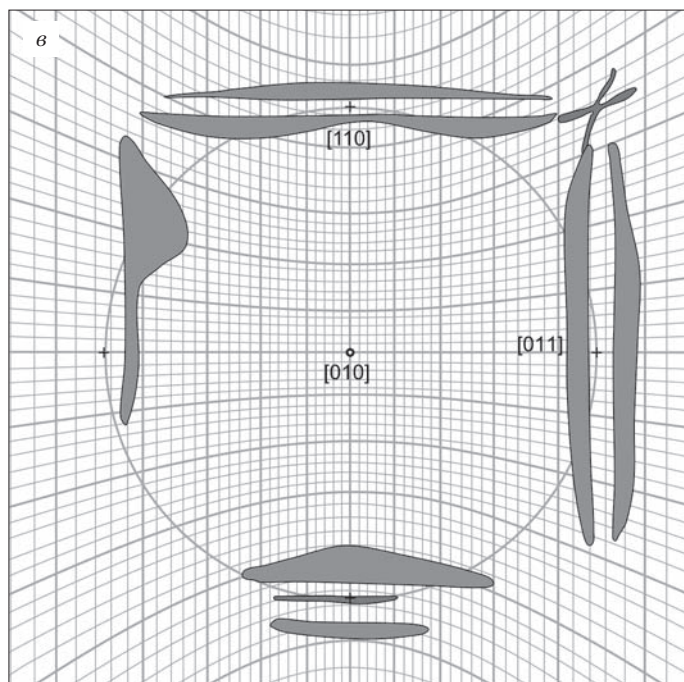


Рис. 8.20. Полярный комплекс алмазов



№ 261-2 (a), 263-5 (δ), 272-3 (ε), 276-2 (z)

3. Небольшой механический износ, предшествующий этапу травления, также встречается у некоторых алмазов (рис. 8.21). Особенно это заметно на кристаллах, испытавших небольшое травление в диффузионном режиме (см. рис. 8.21, б).

4. Большая доля кристаллов, около 40%, демонстрирует поверхности регенерации. Это главным образом алмазы с полицентрическим строением граней или алмазы комбинированной формы октаэдр–ромбододекаэдр с линейной штриховкой на гранях ромбододекаэдра (рис. 8.22). Регенерация наиболее эффективно уничтожает полярные признаки всех предыдущих процессов. Их следы остаются только в облике кристалла. Например, кристалл № 263-4 комбинированной формы сохраняет линейные очертания додекаэдроида, или, точнее, додекаэдроида с формой эллипсоида растворения максимально точно вписывается в кристалл октаэдр–ромбододекаэдр, что указывает на регенерационные процессы, в ходе которых масса кристалла увеличилась совсем незначительно (не более 1%), но форма и полярные признаки изменились радикально. На гномограмме сростка фиксируются рефлексы от трех субиндивидов: два – в двойниковом положении друг относительно друга и третий, с небольшим несогласием, – по полярному и азимутальному углам (см. рис. 8.22, б). Форма рефлексов вблизи точек октаэдра свидетельствует о следах кинетического травления, затронувшего ступени плоских сеток регенерационного рельефа. Механический износ, как правило, отсутствует на регенерированных кристаллах.

Для кристаллов неоктаэдрической формы трубки Удачная отмечается одно важное свойство: доля алмазов с признаками пластического течения структуры невелика и составляет около 30%. Причем это значение получено по наиболее точному полярному признаку. Полосы пластической деформации замечены на четырех кристаллах из первой коллекции и одном кристалле из второй, что составляет не более 15% кристаллов. Для сравнения: у кристаллов из вторичного кимберлита трубки Интернациональная признак пластического течения зарегистрирован в 50% случаев, что также немного, если сравнить с россыпными алмазами уч. Булкур – 76% случаев.

Ранее было замечено, что пластическое течение структуры обычно происходит одновременно с квазиравновесным растворением, когда алмаз приобретает облик додекаэдроида уральского типа. Если алмазы вторичных кимберлитовых жил пережили более сложную историю трансформации поверхности, то столь ранние процессы модификации поверхности могли быть стерты поздними событиями. К тому же для алмазов второй и последующих генераций кимберлита вся постростовая эволюция формы могла происходить на более высоких горизонтах в неравновесных условиях, когда сдвиговые деформации приводят только к раскалыванию кристалла, но не вязкому течению его структуры.

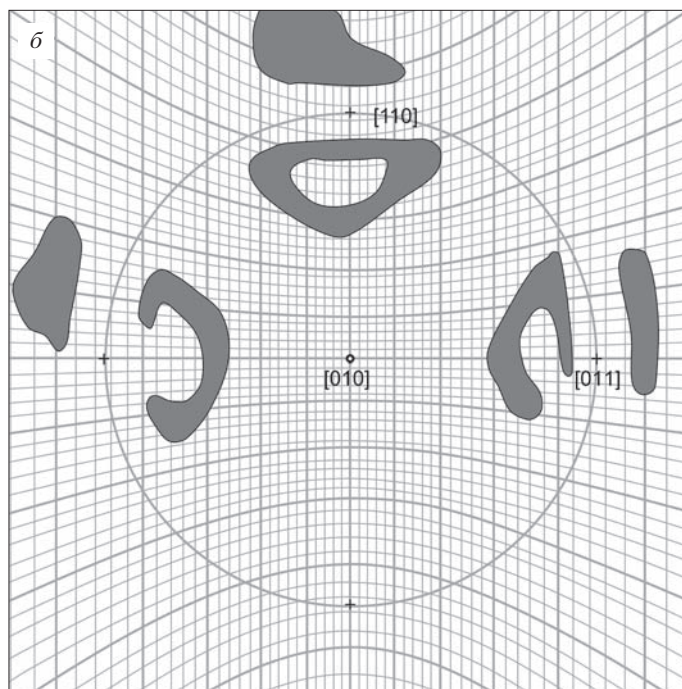
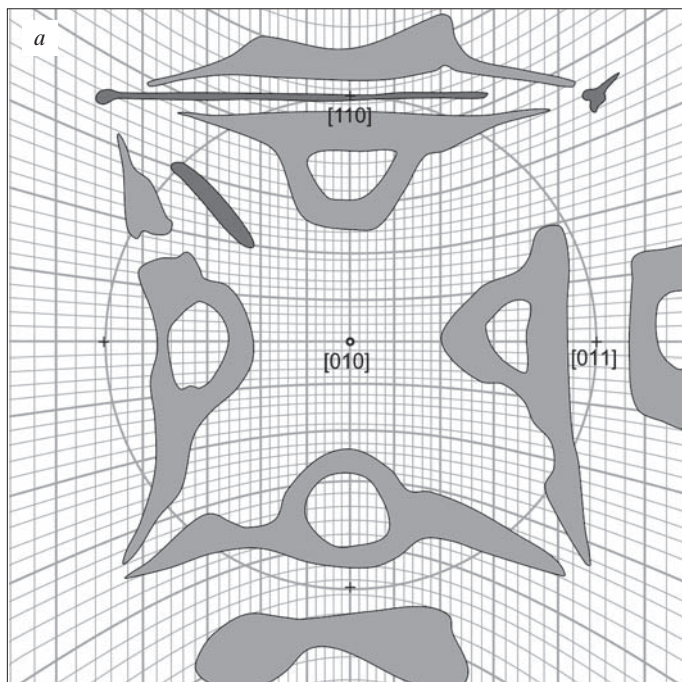


Рис. 8.21. Гномограммы кристаллов № 263-1 (а), 300-1 (б)

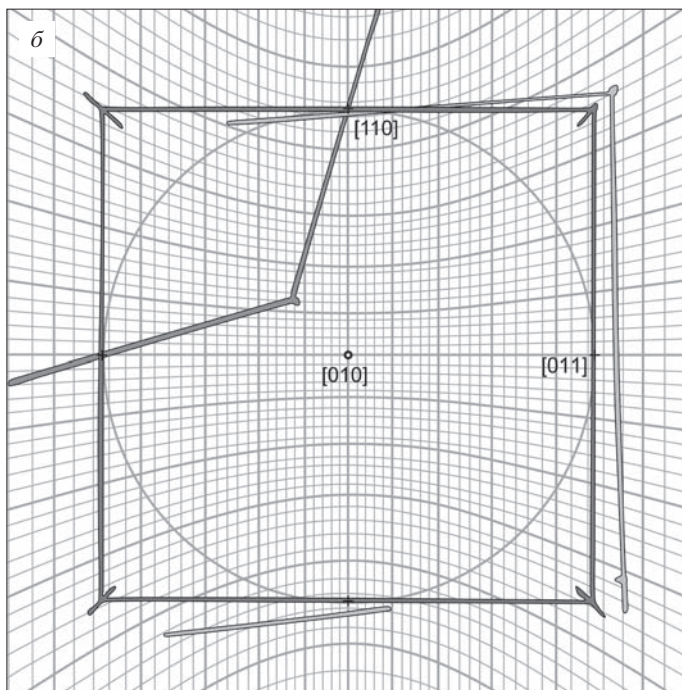
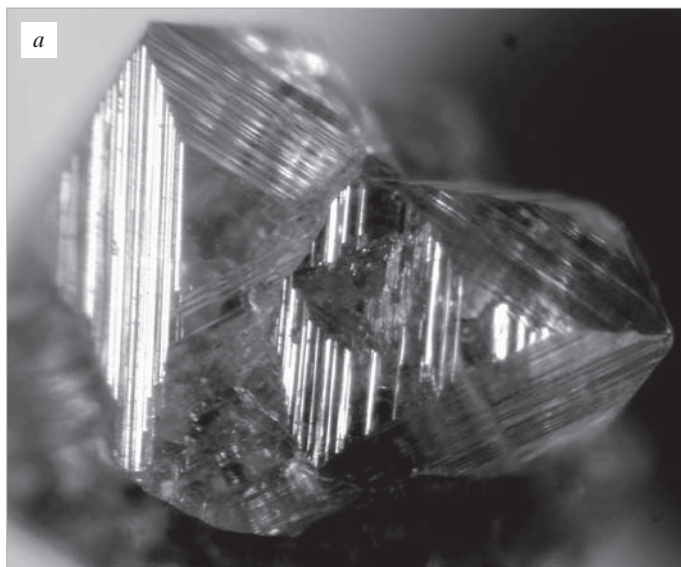


Рис. 8.22. Сrostок алмаза № 263-4 с признаками регенерации (а) и его гномограмма (б)

8.5. АЛМАЗЫ ДЕЛЮВИАЛЬНЫХ РОССЫПЕЙ ТРУБОК ИНТЕРНАЦИОНАЛЬНАЯ И МИР

В заключение рассмотрим несколько алмазов из делювиальных россыпей ближнего сноса трубок Интернациональная и Мир (табл. 8.11). Кристаллы были подобраны искусственно по признаку наличия макрограней тригонтриоктаэдров (см. рис. 3.31–3.33, 8.23). Если кристаллы россыпи Новинка (см. рис. 3.31–3.33) обладают достаточно необычными поверхностями регенерации, модифицированными хаотическим износом, то кристаллы россыпи Заря демонстрируют результат последнего травления (см. рис. 5.1–5.4). Завершающего механического износа поверхности алмазов россыпи Заря не наблюдается.

Особым набором полярных свойств обладает кристалл-додекаэдронд № 465 (см. рис. 8.23), случайно попавший в группу отобранных кристаллов. На кристалле замечены признаки ударного износа, пластического течения структуры и смешанного режима травления. Тонкий шагреневый рельеф, видимый на фото кристалла, обусловлен диффузионным травлением поверхности механического износа. Пластическое течение происходило по ограниченному набору систем скольжения.

Ограниченная группа алмазов, подобранная по одной физиографической характеристике, демонстрирует разные комплексы полярных признаков и, таким образом, служит иллюстрацией к главному тезису данной работы: полярные и физиографические характеристики морфологии кристалла не заменяют, а взаимодополняют друг друга и обеспечивают получение полной информации о макроморфологии кристалла.

8.6. АЛМАЗЫ РОССЫПЕЙ р. ЭБЕЛЯХ

В.А. Петровским случайным образом из текущей добычи сезонных обогатительных фабрик 2007 г. были отобраны 16 алмазов из разных россыпей р. Эбелях (правый приток р. Анабар) (см. табл. 8.12, 8.13). В частности, среди них присутствуют два кристалла описанной выше россыпи Холомолоох.

Таблица 8.11

Алмазы ближнего сноса трубок Интернациональная и Мир

№ п.п.	Номер кристалла	Цилиндр	Октаэдр	Комб. рефл.	УИ	ПТ	Серп. рефл.	Мех. износ	Полигенез	Конус	Кин. травл.	Диф. травл.	Комб. травл.	Шагрень	Штриховка	Регенерация
1	178*	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1
2	313*	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1
3	564	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
4	587	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	1	1	0
5	685	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	2	1	1	1	1
6	715	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	1	1	1
7	465	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0

*Кристаллы россыпи Новинка (трубка Интернациональная), остальные – кристаллы россыпи Заря (трубка Мир).

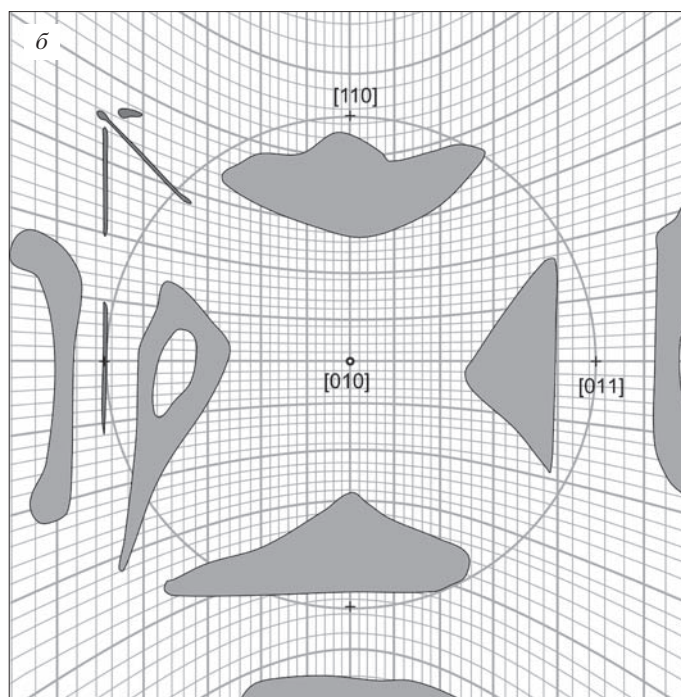
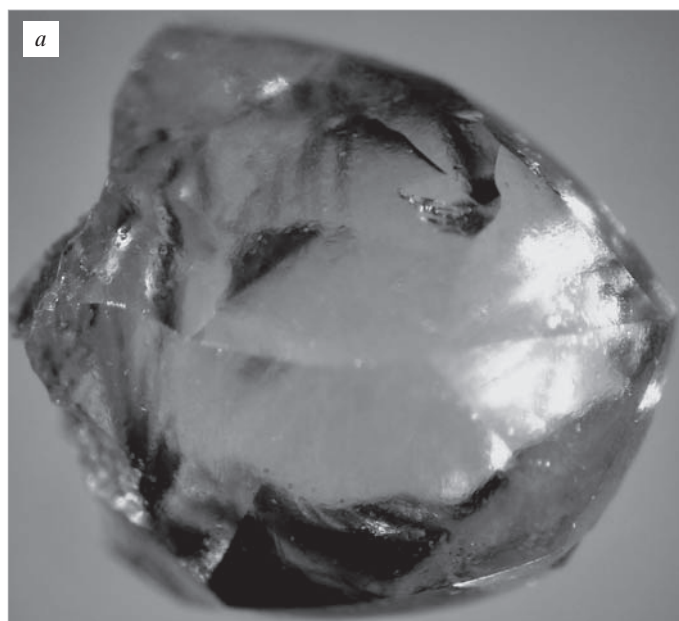


Рис. 8.23. Кристалл № 465 (*a*) и его гномограмма (*б*)

Таблица 8.12

Алмазы россыпей р. Эбелях

№ п.п.	Кристалл	Масса, кар	Описание
1	An-2	0,250	Уплощенный додекаэдройд, мелкие ламели. Есть включение и ППД
2	An-3	0,242	Додекаэдройд с легкой штриховкой и шагренью, ППД
3	An-4	0,228	Додекаэдройд, обилие ППД, включение
4	An-5	0,217	Додекаэдройд, шагрень, пирамиды регенерации
5	An-6	0,253	Коричневатый додекаэдройд, сноповидная штриховка, ППД, включение
6	An-7	0,241	Додекаэдройд, мелкая шагрень, штриховка, ППД, включение
7	An-8	0,254	Додекаэдройд, шагрень, бугорки регенерации, ППД, включения
8	An-9	0,322	Регенерационная форма октаэдра. Полицентрический рост
9	An-10	0,264	Додекаэдройд, шагрень и кольцевые структуры на поверхности
10	An-11	0,252	Октаэдройд, блоковая структура поверхности
11	An-13	0,337	Октаэдройд, регенерация. Полицентрический рост, включение
12	An-15	0,238	Желтый додекаэдройд, шагрень и ППД
13	An-16	0,354	Желтый додекаэдройд, ППД, шагрень
14	An-17	0,203	Желтоватый удлиненный додекаэдройд, шагрень и ППД,
15	An-18	0,214	Белый додекаэдройд. ППД, регенерация по полосам ПД
16	An-19	0,172	Желтый кубойд с пирамидами регенерации

Примечание. Полужирным шрифтом выделены те кристаллы, по которым рассчитаны параметры формы растворения (пояснения в тексте).

Таблица 8.13

Морфология алмазов р. Эбелях

№ п.п.	Номер кристалла	Цилиндр	Октаэдр	УИ	ПТ	Серп. рефл.	Мех. износ	Полигенез	Конус	Кин. травл.	Диф. травл.	Комб. травл.	Шагрень	Штриховка	Регенерация
1	An-2	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0
2	An-3	0	0	1	2	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
3	An-4	0	0	1	2	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
4	An-5	0	0	2	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1
5	An-6	0	0	1	2	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0
6	An-7	1	0	1	2	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0
7	An-8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
8	An-9	1	1	1	0	0	1	1	1	1	2	1	1	1	1
9	An-10	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0
10	An-11	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1
11	An-13	1	1	0	0	0	0	0	1	1	2	1	0	1	1
12	An-15	0	0	2	0	0	1	0	0	0	2	0	1	0	0
13	An-16	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0
14	An-17	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
15	An-18	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
16	An-19	1	1	0	0	0	0	0	0	2	1	1	1	0	1
	Σ	6	4	11	11	2	13	5	3	4	12	4	12	9	5
	Σ, %	38	25	69	69	13	81	31	19	25	75	25	75	56	31

Три кристалла – An-2, An-8 и An-18 – демонстрируют на гномограммах 1, 2 и 3 рефлекса неизмененного эллипсоида соответственно, по ним был произведен расчет средних параметров формы растворения: $a_2 = 1,37 \pm 0,06$, $a_3 = 1,58 \pm 0,08$, $\alpha = 5^\circ$. Средние арифметические значения параметров трех кристаллов россыпей р. Эбелях находятся в пределах доверительного интервала (σ) вариации форм растворения кристаллов руч. Холомолоох (см. п. 8.1). Два кристалла – An-2 и An-18 – имеют признаки пластического течения структуры на ограниченных участках поверхности. Мелкий шагреньевый рельеф и отдельные бугорки на выходах полос пластической деформации свидетельствуют о регенерационных процессах, затронувших поверхность кристалла после первичного этапа растворения, сопровождающегося небольшим пластическим течением структуры. Кроме того, два кристалла – An-2 и An-8 – имеют полярные признаки небольшого диффузионного травления поверхности. С учетом приведенных фактов указанные параметры форм растворения можно принимать весьма условно.

На некоторых кристаллах часто встречаются признаки хаотического механического износа и пластического течения структуры (рис. 8.24). Признаки небольшого диффузионного травления замечены более чем на половине алмазов. Смешанный режим травления наблюдается на трех кристаллах (рис. 8.25). Причем диффузионный режим травления преобладает. Конус травления с близкими параметрами встречен на всех трех кристаллах. Ось конуса направлена под углом около 21° к оси $[011]$ алмаза, а угол образующей составляет 17° .

На кристалле-додекаэдроиде An-10 замечены кольцеобразные структуры, свидетельствующие о травлении алмаза с конденсацией, вероятно, капель жидкой фазы на поверхности (рис. 8.26). Такие кристаллы встречались нам только в коллекциях вишерских алмазов Урала. В данном случае физиографический признак кольцевых образований на поверхности указывает на травление, которое по гномограмме можно квалифицировать как макроскопически диффузионный режим. Отсутствие главного признака хаотического механического истирания поверхности – понижения интенсивности света в центре треугольного рефлекса эллипсоида, но расширение площади рефлекса относительно обычных размеров, притупление вершин и искривление сторон светового треугольника ABC свидетельствуют о диффузионном травлении. Характерная деформация светового рефлекса у точек A и B указывает на произошедшее ранее пластическое течение структуры алмаза. Но полосы пластической деформации на алмазе не замечены.

Признаки завершающего хаотического износа кристаллов, который должен происходить, согласно известным представлениям, при формировании речных россыпей алмазов и особенно при дальнем переносе, в данной коллекции практически отсутствуют. Только два кристалла – An-5 и An-15 – на экране гониометра давали диффузно рассеивающие рефлексы, связанные с завершающим хаотическим износом.

Алмазы An-15 и An-19 представляют собой додекаэдроид и кубоид, но во многом обладают сходными полярными комплексами (рис. 8.27). Механически изношенная четырехгранная вершина додекаэдроида An-15 была подвергнута небольшому травлению, в результате чего проявился

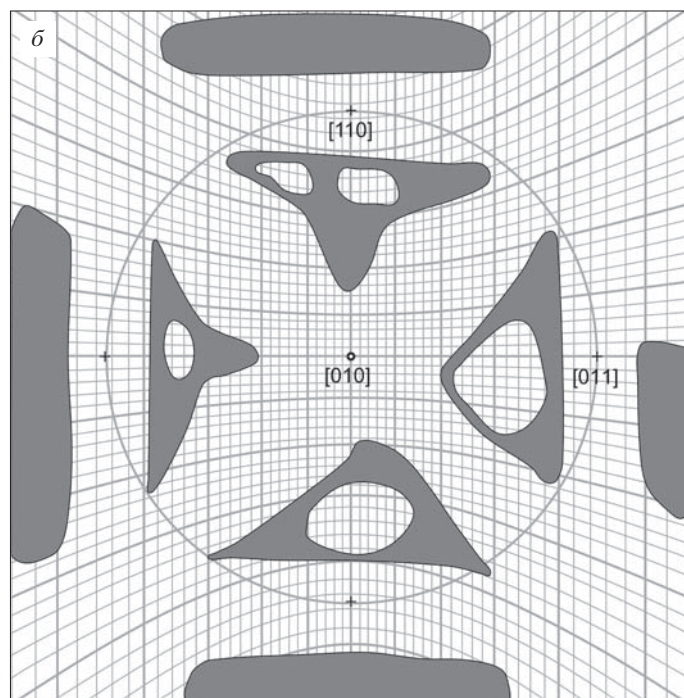
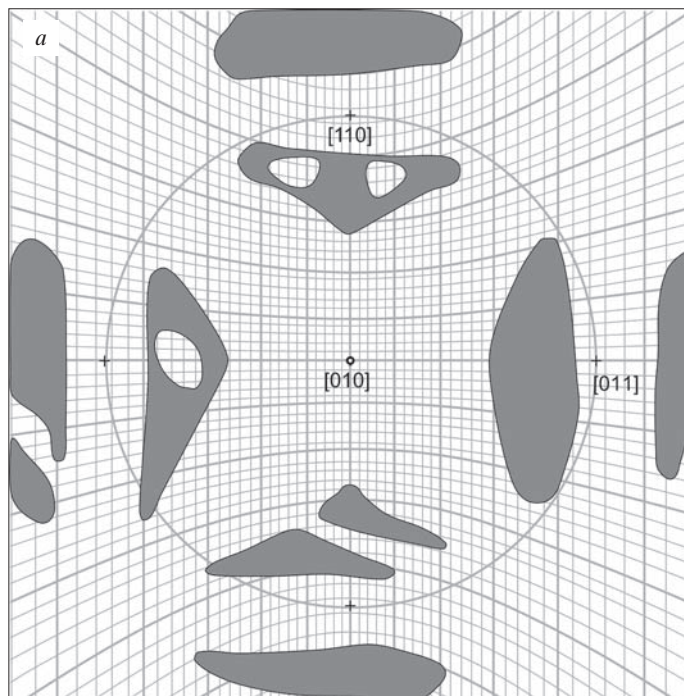
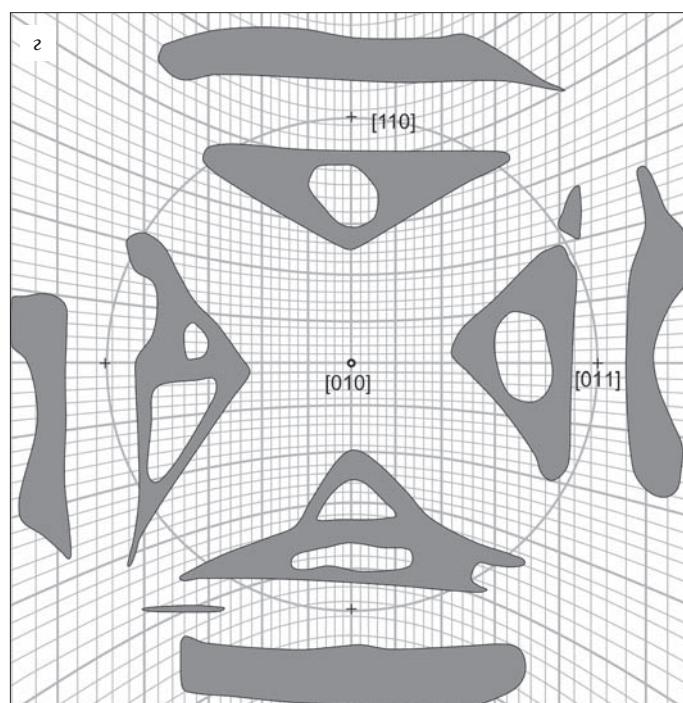
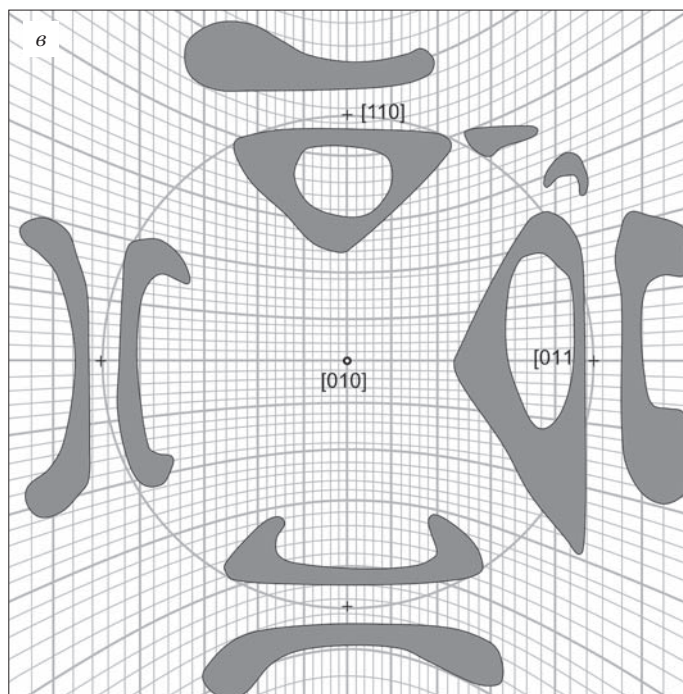
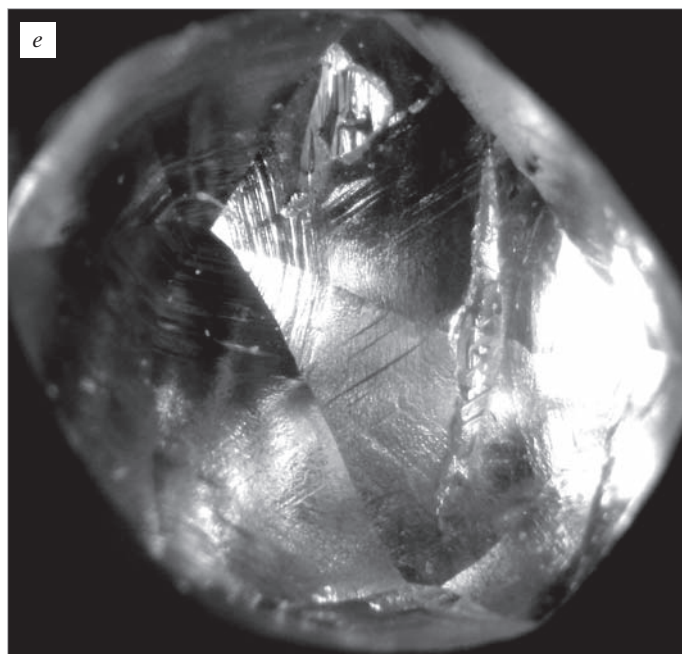
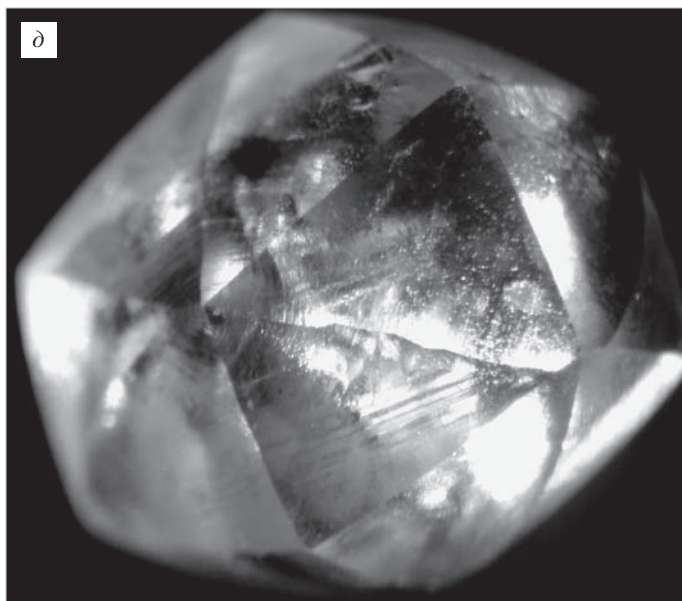


Рис. 8.24. Гномограммы алмазов An-3 (а), An-4 (б), An-5 (в), An-7 (г) и поверхность кристаллов An-3 (д), An-7 (е)



Окончание



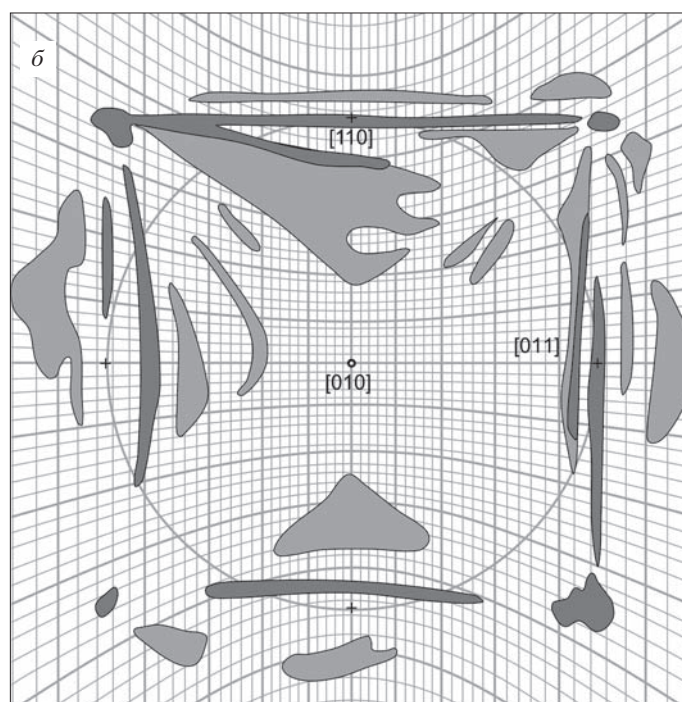
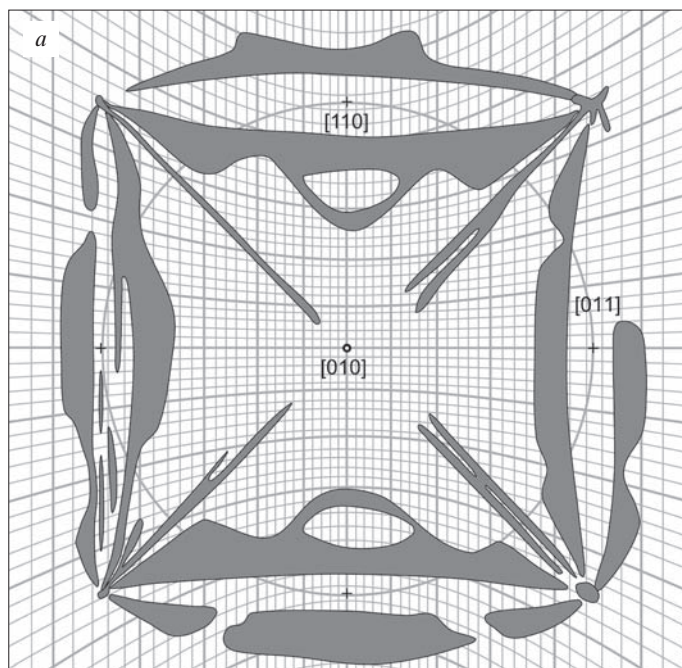
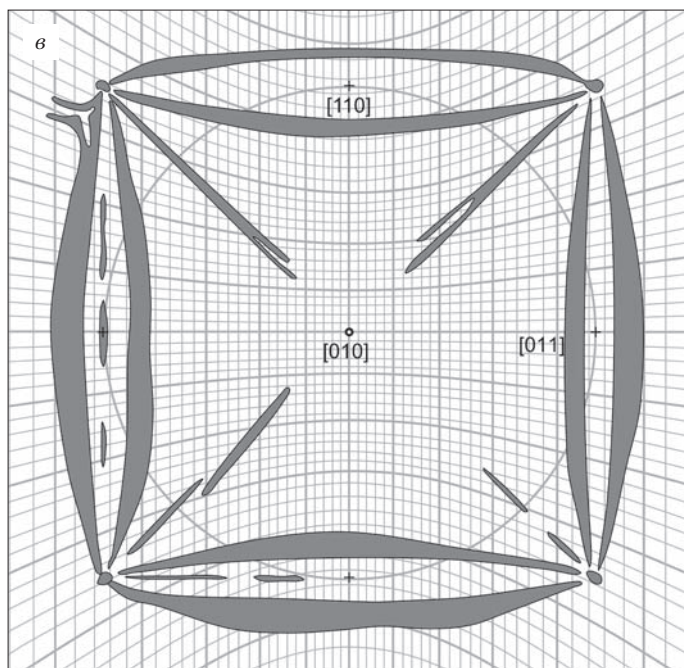


Рис. 8.25. Гномограммы алмазов An-9 (а), An-11 (б),



Ап-13 (6) и поверхность кристалла Ап-13 (2)

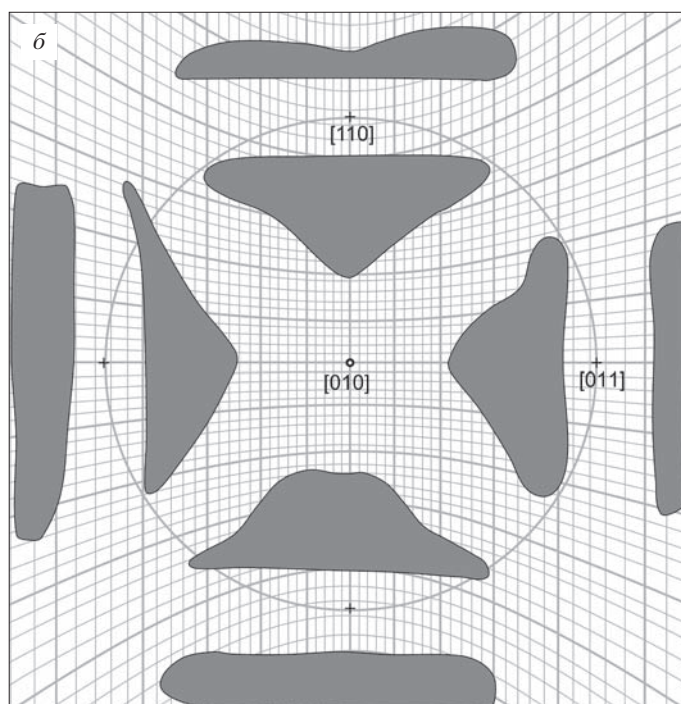
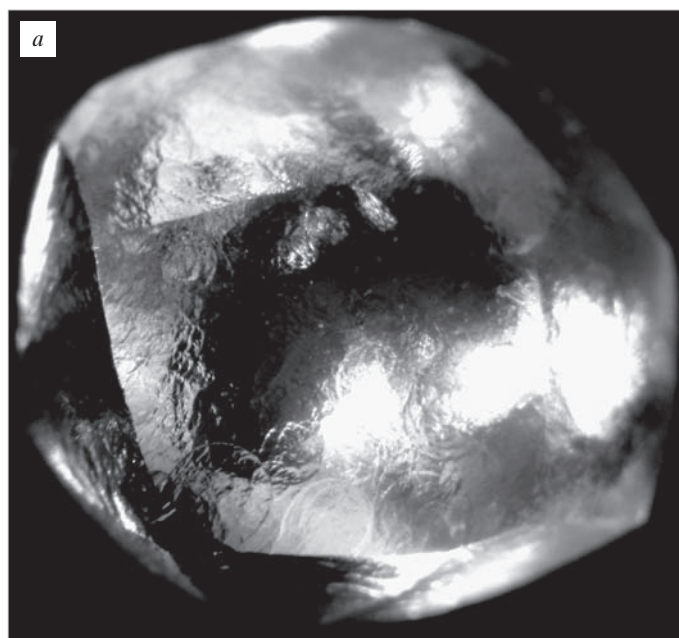


Рис. 8.26. Алмаз Ап-10 (а) и гномоническая проекция его полярного комплекса (б)

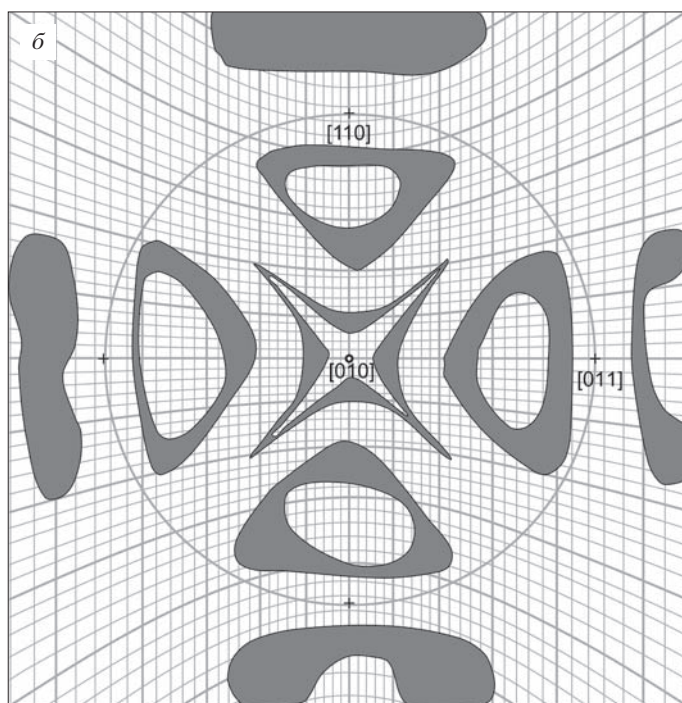
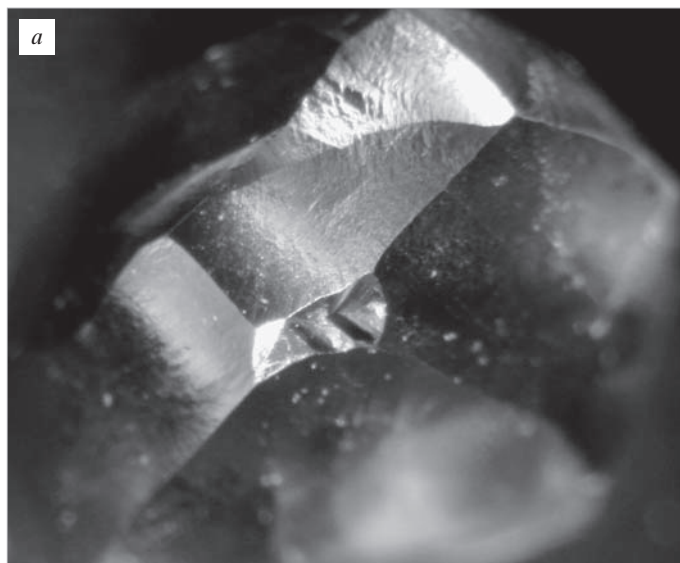
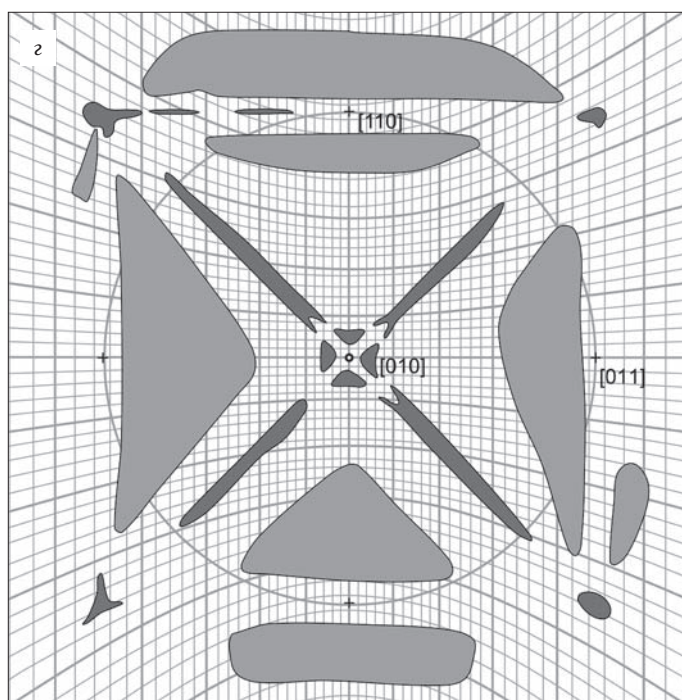
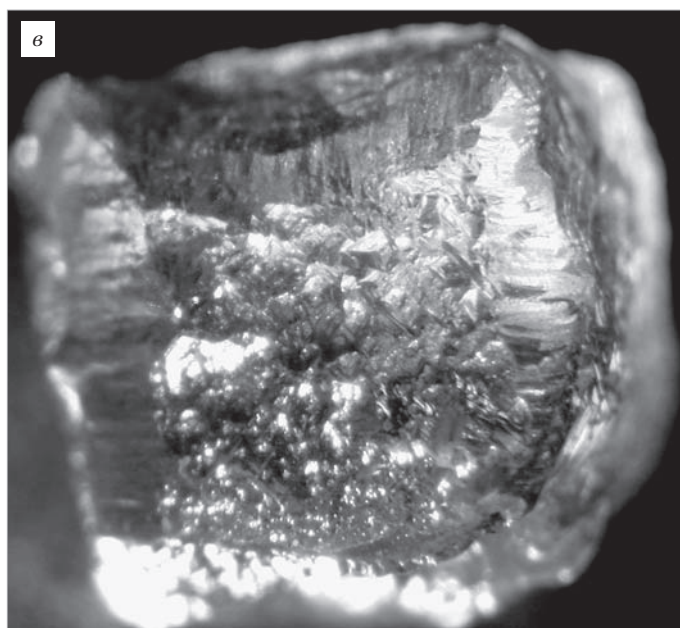


Рис. 8.27. Алмазы Ап-15 (а) и Ап-19 (б) и их гномограммы (б и з соответственно)



Окончание рис 8.27

особой формы рефлекс, окружающий ось четвертого порядка. Некоторые участки рефлекса по расположению и форме напоминают эллипсоид II типа, но обусловлены травлением. Аналогичные рефлексы, окружающие точку [010], но гораздо более яркие, замечены на кубоиде Ap-19. На обоих алмазах есть поверхности, попадающие в область эллипсоида растворения, но в первом случае (Ap-15) эллипсоид растворения был подвергнут активному хаотическому износу и затем небольшому травлению, а на кристалле-кубоиде Ap-19 треугольные рефлексы, вероятно, обусловлены травлением многочисленных пирамид регенерации, размещенных на «гранях» гексаэдра. Признаков механического износа кубоида не наблюдается. Травление кубического алмаза происходило в смешанном режиме: на выступающих частях кристалла – вершинах и ребрах гексаэдроида – кинетическое, а на «гранях» – диффузионное.

В целом по комплексу полярных признаков коллекция алмазов из россыпей р. Эбелях оказалась наиболее сходной с алмазами руч. Холомолоох (см. главу 9).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛМАЗОВ УРАЛА, БРАЗИЛИИ И ЯКУТИИ

Проведем сравнительный анализ исследованных коллекций неплоскогранных алмазов (см. табл. 9.1). Напомним, что инструментальные исследования осуществлялись с помощью параболического гониометра. Точность измерений угловых характеристик световых рефлексов позволяет делать выводы о морфологии алмазов в макроскопическом масштабе. Обсуждаемый размер объектов на поверхности алмаза – не менее 30 мкм по наименьшей стороне.

9.1. ФОРМА РАСТВОРЕНИЯ

Доля алмазов, сохранивших первичную эллипсоидную поверхность растворения, невелика. Среди кристаллов Урала, Бразилии (р. Макаубас) и Якутии (руч. Холомолоох, реки Эбелях, Булкур) они составляют от 7 до 12%. Исключением является коллекция Урал-1, где доля кристаллов с эллипсоидной поверхностью – 43%. Как отмечено в главе 6, первая уральская коллекция представляет собой специально отобранную группу алмазов, для которой фактор случайности при отборе наименьший. Аналогичным свойством обладают выборки алмазов Якутии. При работе с обширными коллекциями руч. Холомолоох (401 кристалл) и р. Булкур (719 кристаллов) нами была поставлена цель отобрать алмазы с визуально максимально гладкими гранями. Небольшой процент исследованных алмазов из обширных коллекций россыпей Холомолоох и Булкур обусловлен ограниченностью времени, отведенного для измерений. У алмазов кимберлитовых трубок Интернациональная и Удачная не обнаружены поверхности растворения.

По алмазам шести коллекций, сохранившим первичную поверхность растворения, проведены расчеты параметров усредненного эллипсоида (рис. 9.1). Считая совокупность алмазов в каждой коллекции единой выборкой, отражающей мантийные условия растворения, мы применили модель логнормального распределения для трех масштабнo-инвариантных параметров поверхности растворения: a_2 , a_3 , α . Полученные значения математического ожидания и среднеквадратичного отклонения (σ) для всех шести коллекций помещены на диаграммах форм растворения. Крайние положения занимают формы растворения алмазов р. Макаубас (точка 3) и коллекции Урала-2 (точка 2). Россыпи Якутии занимают промежуточное положение. Точка 5, отражающая средние арифметические значения параметров трех кристаллов россыпей р. Эбелях, находится в пределах доверительного ин-

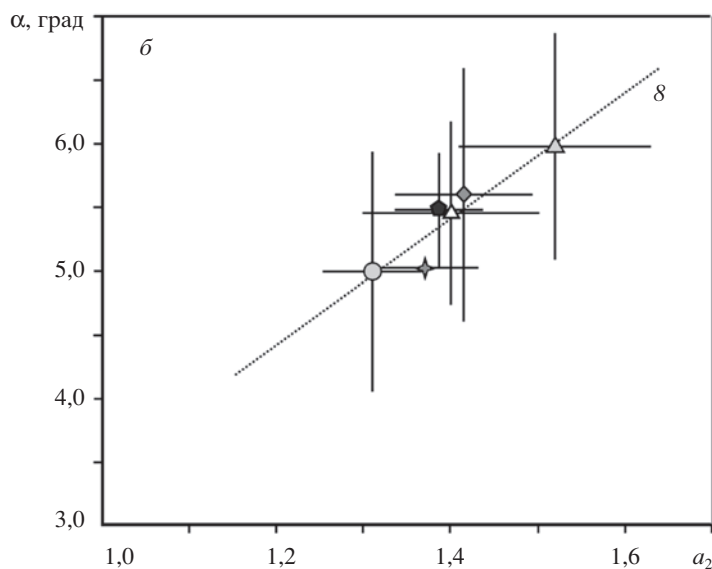
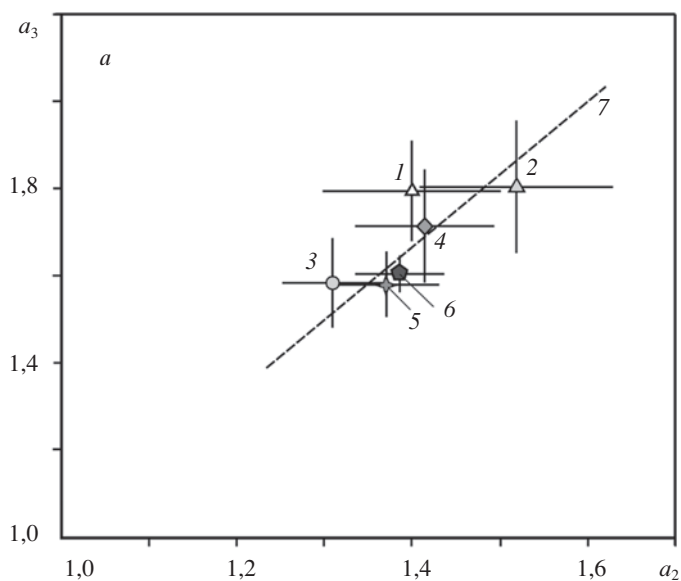


Рис. 9.1. Диаграммы форм растворения алмазов:
 1 – коллекция Урал-1; 2 – коллекция Урал-2; 3 – бассейн р. Макаубас; 4 – россыпь руч. Холомолоох; 5 – россыпи р. Эбелях; 6 – россыпь р. Булкур; 7 – тренд изменения параметров эллипсоида; 8 – зависимость угла разориентации α от параметра a_2 .
 Остальные пояснения см. в тексте

тервала вариации форм растворения кристаллов р. Холомолоох и не имеет самостоятельного значения ввиду весьма ограниченной выборки.

Стоит напомнить, что точка с параметрами $a_2 = 1$, $a_3 = 1$ при любом значении α в пространстве форм растворения представляет собой шар – максимально изометричный кристалл, структура которого не влияет на форму растворения, а поле диффузии полностью контролирует форму. Однако трудно представить неравновесные условия растворения, при которых не проявляется влияние структуры кристалла на кинетику процесса, поскольку растворение (как и рост) состоит, по крайней мере, из двух неразрывных частей: поверхностной реакции и переноса вещества в окружающей среде.

Теоретически при сверхвысокопараметрических условиях термодинамического равновесия, когда локальные флуктуации свободной энергии превышают поверхностную энергию кристалла алмаза (см. главу 1), форма алмаза может представлять собой сферу, а точнее, структурно независимый полиэдр, характерный для мыльной пены. Однако такие условия не реализуются в мантии Земли (см. главу 1). Для крупных кристаллов сохранность октаэдра как равновесной формы становится проблематичной. Равновесный алмаз в мантии может иметь любой облик, включая сферический, но фрагментированная поверхность кристалла должна быть представлена только плоскими сетками октаэдра с линейными размерами порядка долей миллиметра, что следует из значения локальной флуктуации свободной энергии, оцененной нами как $3 \cdot 10^{-3}$ Дж/моль для условий верхней мантии (см. главу 1).

Переходя к слабонеравновесным условиям растворения, отметим направленный фазовый переход, в результате которого поверхность сглаживается и появляется эллипсоидная форма поверхности. Нам представляется очевидным, что, чем дальше параметры эллипсоида растворения отклоняются от значений $a_2 = 1$, $a_3 = 1$, тем большее влияние структура алмаза оказывает на его форму. Одновременно при увеличении степени воздействия диффузионного поля растет параметр α , приближаясь к максимальному значению около 7° , согласно известным наблюдениям А.А. Кухаренко (1955), подтвержденным нами. Важно отметить, что степень влияния структуры кристалла на кинетику топохимических реакций растет одновременно с увеличением влияния диффузионного поля: они находятся в тесной связи из-за соблюдения баланса потоков вещества в открытой системе (см. главу 3). Корреляция между параметрами a_2 и α отмечается для всех коллекций алмазов. Таким образом, отклонение параметров обобщенного эллипсоида от предельных значений $a_2 = 1$, $a_3 = 1$ и рост угла α являются указанием на степень неравновесности процесса растворения алмаза.

В таком случае большие отклонения от равновесия свойственны условиям растворения алмазов коллекции Урал-2, а наименьшие – алмазам бассейна р. Макаубас.

Заметим, что диффузионный режим травления, выделенный нами, характеризуется условиями, весьма похожими на обсуждаемое растворение. Отличие заключается не только в необратимости процесса травления в отличие от растворения, но и в значительной степени неравновесности такой системы. Замечено, что в результате травления форма треугольного ре-

флекса изменяется, что связано с влиянием неоднородности приповерхностных свойств алмаза, но, и это главное, площадь рефлекса уменьшается (см. рис. 5.5, б). Аппроксимируя такую элементарную поверхность додекаэдроида эллипсоидом, получим значения параметров, существенно превышающие обычные значения для форм растворения: $a_2 > 1,7$ и $a_3 > 2$, что согласуется с высказанной гипотезой о влиянии степени неравновесности системы на параметры поверхности растворения.

На рис. 9.1, а замечен основной тренд разнообразия форм растворения, протянувшийся из точки с параметрами $a_2 = 1$, $a_3 = 1$. По шести фигуративным точкам и начальной (1,1) построен тренд разнообразия обобщенных параметров эллипсоида. Он описывается в линейном приближении уравнением

$$a_3 = 1,667a_2 - 0,667,$$

которому строго принадлежит начальная точка (1,1) (рис. 9.1, а, линия 7). Зависимость угла разориентации α от параметра a_2 эллипсоида, очевидно, должна быть нелинейной, но в пределах небольшого интервала вариаций аргумента может быть аппроксимирована также линейной зависимостью вида

$$\alpha = 4,853a_2 - 1,403$$

(рис. 9.1, б, линия 8). Обе линейные зависимости получены методом наименьших квадратов отклонений.

Параметры СКО пяти основных совокупностей (см. рис. 9.1) достаточно велики и поля форм практически перекрываются, что свидетельствует о близости термодинамических условий растворения алмазов в низах литосферы во всех изученных провинциях. Главным определяющим параметром, вероятно, является небольшая степень неравновесности высокотемпературной системы, находящейся на стадии формирования очага кимберлитового (или иного) вулканизма, выносящего алмазы на дневную поверхность. Химический и минералогический состав пород и P – T -параметры среды в данных обстоятельствах для квазиравновесных условий растворения не играют существенной роли. Главное, что темпы созревания кимберлитовой магмы определяются физико-химическими, тектоническими и геологическими закономерностями развития очагов вулканизма. Тем не менее бразильские алмазы характеризуются наиболее медленным процессом развития.

Обратим внимание на одно важное обстоятельство – отсутствие истинных форм растворения на округлых кристаллах трубок Интернациональная и Удачная. Додекаэдронидный облик многих алмазов косвенно указывает на прошедшее растворение алмазов, но вторичные процессы механического износа и травления полностью стерли признаки первичного растворения.

Вероятно также, что алмазы, сохранившие формы эллипсоида растворения, не попали в изученные коллекции трубочных алмазов ввиду их ограниченности. Известно, что 50–62% алмазов этих трубок составляют октаэдры, 7–11% – додекаэдрониды (Аргунов, 2005). Учитывая многие факты,

можно сделать вывод, что доля кристаллов, сохранивших форму растворения, среди всех алмазов додекаэдронидного облика в кимберлитовых трубках Якутии Интернациональная и Удачная составляет не более 1%.

Повышенная представительность форм растворения отмечается на алмазах россыпей Якутии и Бразилии (7–12%). С одной стороны, это может объясняться бóльшей механической устойчивостью додекаэдронидной формы алмаза уральского типа к растрескиванию и естественным потерям, а с другой – иным соотношением между додекаэдроидами и октаэдрами в коренных породах, ставших источником рассматриваемых россыпей. Источником якутских россыпей Анабарской и Приленской провинций предположительно послужили кимберлиты мезозойского возраста, в которых доля додекаэдронидов доходила уже до 60% (Там же).

Аномально высокие содержания алмазов с первичными формами растворения, как, например, в коллекции Урал-1 (43%), связаны главным образом с естественной селекцией и искусственным отбором.

9.2. ФОРМЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ДЕГРАДАЦИИ АЛМАЗА

К формам механической деградации алмаза отнесены нами пластические течения структуры и хаотический механический износ. Причем пластические течения алмаза связаны, как правило, с первичным процессом растворения при формировании облика алмаза уральского типа. Пластические течения происходят или одновременно с растворением или сразу после него. Полярный признак ПТ наблюдается обычно на значительно большем числе кристаллов по сравнению с кристаллами, у которых физиографические зарегистрированы полосы пластических деформаций, также свидетельствующие о течениях структуры алмаза.

Хаотический ударный износ алмаза начинается в условиях, когда газовая фаза выносимого из глубин Земли вещества становится существенной. Например, кальциево-карбонатитовая магма испытывает реакцию разложения при давлении ниже 3 ГПа, достижении отметки 100 км с выделением в газовую фазу диоксида углерода (Шарыгин и др., 2013). Основной износ изученных нами алмазов может быть связан с их выносом на дневную поверхность в транспортёре. Формирование речных и делювиальных россыпей практически не оставляет следов на поверхности алмазов изученной гранулометрической размерности (0,01–0,5 кар). Количественные оценки, выполненные нами, подтверждают неморское происхождение всех изученных россыпей.

В табл. 9.1 приведена сводка основных полярных и физиографических признаков алмазов большинства коллекций. Заметим, что коллекция р. Эбелях мала, хотя собрана по принципам «равной представительности» всех типов алмазов, а коллекция Урал-1 является, по-видимому, результатом искусственного отбора.

В целом кристаллы всех коллекций характеризуются высокими индексами механической деградации поверхности. При этом россыпные кристаллы превышают показатель 80%, а коренные всегда имеют меньшие показатели.

Полярные и географические показатели алмазов, %

Показатель	Коллекция								
	Урал-1	Урал-2	р. Макаубас	руч. Холо-молоох	р. Эбелях	р. Булкур	Трубка Интернациональная	Трубка удачная-1	Трубка удачная-2
Кол-во кристаллов	23	280	189	83	16	58	26	29	39
Эллипсоид растворения	43	10	7	12	19	7	0	0	0
Цилиндр	61	69	53	29	38	21	58	90	79
Октаэдр	61	69	71	34	25	31	73	90	69
Комб. форма растворения	13	4	1	4	0	2	0	0	0
Ударный износ	74(13)	76(6)	70(8)	55(1)	69(13)	69(7)	77(4)	72(21)	64(13)
Пластическое течение	57(4)	69(8)	53(9)	59(12)	63(19)	76(10)	50(0)	34(0)	26(0)
Серповидный рефлекс	9	14	5	0	13	17	23	14	8
Механическая деградация	87(39)	88(58)	80(58)	81(42)	81(50)	93(52)	77(50)	76(31)	64(26)
	0,45/0,20	0,66/0,07	0,72/0,21	0,52/-0,04	0,62/0,07	0,56/-0,07	0,65/0,35	0,41/0,50	0,41/0,59
Полигенез	70	75	68	33	31	33	54	79	46
Конус	9	10	24	13	19	9	62	62	31
Кинетическое травление	48(17)	55(15)	42(6)	25(2)	25(6)	22(0)	46(4)	69(17)	64(13)
Диффузионное травление	43(0)	38(5)	73(11)	69(12)	75(19)	74(5)	100(50)	90(48)	72(15)
Травление	65(26)	72(21)	84(31)	76(18)	75(25)	83(14)	100(46)	97(62)	87(49)
	0,40/0,07	0,29/0,23	0,37/-0,36	0,24/-0,57	0,33/-0,67	0,17/-0,62	0,46/-0,54	0,64/-0,21	0,56/-0,09
Двойники	22	4	8	1	0	9	0	3	26
Шагреновый рельеф	35	60	49	47	75	74	85	24	44
Штриховка	57	72	47	24	56	52	96	100	64
Регенерация	22	8	17	6	31	2	15	14	38
Сколы	70	60	25	-	-	-	-	-	-
Индукционные грани	22	20	2	-	-	-	-	-	-

Примечание. Прочерк означает, что данные отсутствуют. В скобках указана встречаемость (%) максимальной степени признака – 2, измеряемого по трюичной системе оценки. В числителе – отношение количества случаев комбинированного воздействия факторов, например «УИ+ПТ» или «КТ+ДТ», к общему количеству кристаллов с признаками механического износа или травления ($k_1 = (УИ+ПТ)/МЭХ$ и $k_2 = (КТ+ДТ)/ТРАВЛ$), в знаменателе – отклонение от «баланса» между факторами ($k_3 = (УИ+ПТ)/МЭХ$ и $k_4 = (КТ+ДТ)/ТРАВЛ$).

Главное различие касается пластического течения структуры алмаза. Наименьшие показатели у коренных алмазов, а среди них – у алмазов трубки Удачная. Максимальная степень пластического течения структуры на алмазах якутских кимберлитовых трубок не отмечалась ни разу. Эта закономерность указывает на связь процессов растворения алмазов и пластического течения их структуры. Расшифровка полярного комплекса алмазов показывает, что в большинстве случаев течение структуры происходит на стадии растворения, и если растворение встречается редко, как в коллекциях коренных алмазов Якутии, то и показатель пластического течения будет невысоким.

У россыпных якутских алмазов максимум пластических деформаций структуры отмечается наиболее часто. Уральские и бразильская коллекции алмазов по этому признаку незначительно отличаются от якутских алмазов.

Хаотический ударный износ кристаллов из россыпей Якутии выражен наименее слабо среди всех коллекций. Соответственно максимальная степень УИ проявляется в единичных случаях. Замечена асимметрия: алмазы из коллекций Урала и Бразилии более изношены, а якутские россыпные алмазы чаще испытывали максимальные пластические течения структуры на стадии растворения.

Индекс k_1 имеет случайные вариации по всем коллекциям в пределах от 0,41 до 0,72 без аномалий по той или иной группе кристаллов, но индекс k_2 весьма показателен. У коренных алмазов баланс между механическими факторами нарушен в пользу ударного износа (0,35–0,59), а для россыпей Якутии баланс выполняется (от –0,04 до +0,07). Россыпи р. Макаубас также демонстрируют небольшое отклонение в сторону перевеса хаотического ударного износа (0,21). Коллекция Урал-2 практически не отличается по индексу k_2 от якутских россыпей.

Наличие серповидного рефлекса свидетельствует о блочности строения, по крайней мере, приповерхностных областей алмаза. Поэтому нулевой показатель для россыпи Холмолово свидетельствует только об искусственном отборе наиболее совершенных алмазов, произведенном до начала исследований. Остальные группы имеют обычный показатель серповидного рефлекса от 5 до 23%, характерный также и для доли несовершенных алмазов (сростков и двойников), встречающихся в коренных месторождениях Якутии (Аргунов, 2005).

9.3. ФОРМЫ ТРАВЛЕНИЯ

Формы травления подразделяются также на два крайних вида: травление в диффузионном и травление в кинетическом режимах. Признаки травления отмечаются на большинстве кристаллов алмаза во всех девяти коллекциях (см. табл. 9.1).

Встречаемость травления у коренных алмазов более 87%. Причем диффузионный режим травления наблюдается в 72–100% случаев, а кинетический заметно реже – от 46 до 69% случаев. Максимальная степень диффузионного травления также чаще отмечается на трубчатых кристаллах.

Показатель кинетического травления реже обнаруживается на россыпных алмазах Якутии. Естественно, что максимальная степень кинетического травления наблюдается на единичных алмазах. Россыпи Урала и Бразилии приближаются по признаку кинетического травления к коренным алмазам Якутии. Диффузионный режим травления на россыпных алмазах Якутии и Бразилии встречается одинаково часто – в 69–75% случаев. Алмазы Урала заметно реже – в 1,5–2 раза – имеют признаки диффузионного травления.

Конус служит главным образом признаком диффузионного режима травления. Причем он образуется вблизи крупных граней октаэдра, на ребрах макроступеней так называемого полицентрического рельефа (см. рис. 8.25, в, г). Когда облик алмаза додекаэдронный и граней октаэдра нет, то диффузионный режим травления выявляется по другим признакам (см. главу 5).

Как было показано в главе 3, эволюция формы растворения при переходе от эллиптического цилиндра к эллипсоиду осуществляется через переходную форму, напоминающую конус. При этом грани октаэдра преобладают в облике алмаза. При травлении, как разновидности необратимого растворения, происходит то же самое, но конус травления является долгоживущим типом поверхности в отличие от редко встречающегося конуса растворения.

Индекс k_3 для коренных алмазов также высок (0,46–0,64), превышает все значения этого индекса для россыпей (0,17–0,40). Различия между алмазами россыпей Бразилии, Якутии и Урала по индексу k_3 не наблюдаются. Иная ситуация с индексом баланса k_4 . У алмазов россыпи Якутии он имеет аномально высокие значения – от –0,67 до –0,57. Коренные алмазы Якутии демонстрируют сходную закономерность, но с меньшими по модулю значениями. Учитывая, что травление алмазов, вероятнее всего, происходит в толще земной коры в поле стабильности структуры графита и каждый раз в своей особой геологической обстановке, то разброс наиболее чувствительного к физико-химическим условиям показателя баланса k_4 в коллекциях из кимберлитовых трубок от –0,54 до –0,09 вполне закономерен. В связи с этим алмазы россыпи р. Макаубас, особенно коллекции Урал-2, демонстрируют важные различия в условиях эволюции поверхности алмаза.

9.4. ФИЗИОГРАФИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ МОРФОЛОГИИ КРИСТАЛЛОВ

Комплекс физиографических признаков, выделенных нами, насчитывает шесть показателей, из которых наличие двойников, сколов и индукционных поверхностей устанавливаются достаточно надежно. Три других признака – шагреневый рельеф, штриховка и регенерация – имеют высокую степень субъективности. Некоторые физиографические и полярные признаки тесно коррелируют друг с другом. Например, штриховка на алмазах часто связана с поверхностями цилиндра или является результатом пластического течения структуры алмаза уральского типа, особенно вблизи выхода осей третьего порядка. Шагреневый рельеф иногда связан с травлением механически изношенной поверхности алмаза. Явления регенерации, диагностированные по мелким пирамидам определенного облика, на округлых

поверхностях алмаза могут в результате травления трансформироваться в шагреньный рельеф.

В целом названные физиографические признаки обладают свойством полигенеза и не могут быть приняты в качестве надежного свидетельства в пользу того или иного фактора морфологической эволюции алмаза уральского типа.

Справедливости ради стоит заметить, что выделенный нами признак полигенеза в рамках полярного комплекса признаков также является индикатором неопределенности при интерпретации генезиса поверхностей октаэдра, цилиндра и пирамид регенерации при наличии механических процессов деградации поверхности. Наименьшие значения этого показателя имеют коллекции якутских россыпей (31–33%), а россыпи Бразилии и Урала характеризуются вдвое большими значениями (68–75%). Алмазы коренных месторождений Якутии сильно различаются, но занимают промежуточное положение.

9.5. СХЕМА ПОЛЯРНЫХ ПРИЗНАКОВ

На рис. 9.2 на одной гномонической проекции в четырех секторах условно сведены основные поля рефлексов, обусловленных воздействием на форму алмаза уральского типа различных природных факторов. Рассмотрим их последовательно.

Наиболее распространенная ростовая и равновесная форма природного алмаза – октаэдр – занимает только одну точку (111). Быстрый рост природного алмаза иногда приводит к образованию граней куба {100} и ромбододекаэдра {110}, проявляющихся в анатомии кристаллов, но на изученных нами алмазах такие плоские грани, обусловленные исключительно ростом, не были встречены ни разу.

Сектор «растворение». Растворение алмаза в высокопараметрических квазиравновесных условиях начинается, вероятно, вместе с формированием очага глубинного вулканизма, очага расплава и приводит к образованию поверхностей второго порядка – плоскостей (точка октаэдра (111)), эллиптического цилиндра (линии I), трехосного эллипсоида (треугольное поле ABC). К поверхности растворения нами условно отнесена также поверхность, названная нами эллипсоидом II типа (область 2). Однако она может быть исключена из группы поверхностей растворения, если будет экспериментально доказана невозможность ее существования. Длительное квазиравновесное растворение алмаза в условиях верхней мантии – условиях стабильности структуры алмаза – приводит к выживанию единственной предельной формы растворения – эллипсоида ABC , параметры которого легко могут быть рассчитаны по формулам (3.23). Облик такого кристалла принято называть додекаэдроидом (ромбододекаэдроидом) уральского (бразильского) типа. Такой алмаз насчитывает 12 округлых выпуклых ромбических граней, по короткой диагонали которых часто, но не всегда наблюдается особое ребро, называемое гранным швом.

Сектор «пластические деформации». В ходе высокопараметрического растворения алмаза, сопровождающегося часто движениями вмещающих

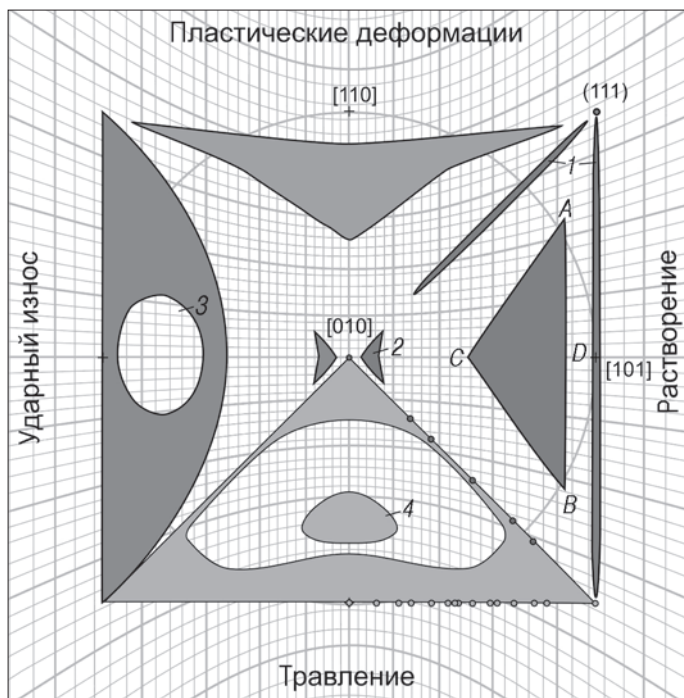


Рис. 9.2. Рефлексы растворения, механического износа и травления алмаза.

Пояснения см. в тексте

кристаллических пород литосферы, алмаз подвергается пластическим деформациям – течениям структуры. В результате форма эллипсоида растворения модифицируется должным образом и возникают закономерные искажения треугольного рефлекса. Точки *A* и *B* устремляются к ближайшим точкам выхода осей третьего порядка. При этом точки *C* и *D* остаются неподвижными. Треугольный рефлекс приобретает вогнутые стороны. По характеру искажения рефлекса можно выделить две степени деформаций – слабую и сильную. На схеме приведена максимальная степень пластического течения структуры, произошедшая по двум системам скольжения в алмазе. Модифицированная в результате течения структуры поверхность уже не может быть описана уравнением второго порядка.

Сектор «ударный износ». Хаотический ударный износ алмаза начинается вместе с мобилизацией вещества в очаге вулканизма и началом выноса глубинного алмазоносного вещества в дневную поверхность. В этом процессе возможны остановки и возобновление движения. Механический износ поверхности алмаза наиболее часто происходит в кимберлитовом транспортёре, что характерно и для алмазов уральского типа. В результате выветривания коренных пород алмазы продолжают подвергаться ударному износу в делювиальных и аллювиальных отложениях. Но наибольшее механическое воздействие на алмаз на дневной поверхности может оказать прибойная зона моря. Модификация поверхности додекаэдроида алмаза начинается с понижения освещенности в центральной части треугольного рефлекса *ABC* эллипсоида растворения (область 3).

Форма рефлекса также закономерно изменяется, превращаясь в предельном случае в криволинейный сегмент, ограниченный с одной стороны линией, совпадающей с проекцией описанного выше эллиптического цилиндра, а с другой – с гиперболой, проходящей через точки $\langle 111 \rangle$ и часто $\langle 021 \rangle$. Таким образом, в предельном случае ударного износа краевые части элементарной грани алмаза можно аппроксимировать цилиндрической поверхностью и конусом со следующими параметрами: ось конуса близка к направлению $\langle 025 \rangle$, что составляет угол 22° к ближайшей четверной оси кристалла, угол образующей 49° . Выделяются также две степени ударного износа. На начальной стадии в центре треугольника ABC регистрируются понижения интенсивности света. Крайняя степень износа приведена на рис. 9.2. Участки поверхности алмаза, образованные в результате сколов и близкие по ориентации к плоским сеткам куба, при хаотическом ударном износе могут формировать выпуклые поверхности, напоминающие описанный нами эллипсоид II типа. Поверхность износа также не может быть описана уравнением второго порядка. В результате исследований нами выделена форма предельного ударного износа алмаза, похожая по облику на шероховатый додекаэдронид уральского типа. Но небольшие отличия от додекаэдроида растворения отмечаются в областях выхода тройных осей в виде исчезновения криволинейных ребер.

Сектор «травление». Травление, как разновидность необратимого растворения алмаза, происходит в существенно неравновесных условиях, когда кинетика поверхностных процессов может существенно влиять на форму кристалла. Тем не менее можно выделить два предельных режима травления – кинетический и диффузионный. В кинетическом режиме травления большую роль играет энергия образования элементарной ступени на поверхности кристалла, поэтому периодические цепи сильных связей структуры алмаза могут иметь решающее значение. Поверхность травления оказывается тесно связанной с плоскими сетками октаэдра $\{111\}$, куба $\{100\}$, ромбододекаэдра $\{110\}$, 5 разновидностями тетрагонтриоктаэдра и 13 видами тригонтриоктаэдра (показаны фигуративными точками на рис. 9.2 в секторе «травление»). Вблизи этих плоских сеток, особенно у граней куба и октаэдра, формируются участки криволинейной поверхности причудливой формы, попадающие в выделенные цветом поля на гномонической проекции. Диффузионный режим травления алмаза-додекаэдроида уральского типа приводит к трансформации треугольного рефлекса эллипсоида с уменьшением площади и закруглением вершин ABC (поле 4). Если в габитусе алмаза присутствуют грани октаэдра, то диффузионный режим травления вызывает формирование криволинейного дугообразного рефлекса, протянувшегося между точками смежных граней октаэдра (на рис. 9.2 в пределах нижней части отмеченного поля рефлексов травления). Такая поверхность травления может быть описана поверхностью конуса с параметрами, приближающимися в среднестатистическом случае к следующим: ось конуса направлена под углом 19° к ближайшей четверной оси (направление вектора $[093]$), угол образующей 21° . Важнейшим отличием диффузионного режима травления от кинетического является обязательное присутствие особого ребра

на кристалле – гранного шва. На кристалле алмаза может одновременно выполняться режим диффузионного травления одних участков поверхности, чаще вблизи выходов двойных осей симметрии структуры, и кинетического травления поверхности у выходов тройных осей или участков, субпараллельных плоским сеткам куба.

Таким образом, световые рефлексy на экране параболического гониометра от кристалла алмаза, находящегося в правильной кристаллографической установке с осью симметрии четвертого порядка, совпадающей с осью вращения параболоида, всегда закономерным образом связаны со структурой алмаза и отражают действие деструктивных факторов – растворения, механической деградации и травления, разрушающих алмаз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате изучения морфологии алмазов уральского (бразильского) типа различных месторождений и проявлений Якутии, Урала и Бразилии разработан новый метод кристалломорфологии округлых форм минералов и установлен ряд новых признаков форм растворения алмазов, включающий выделенные нами формы как «истинного», обратимого, растворения, так и необратимого (травления), а также механической деградации структуры алмаза и его поверхности. Выявлены закономерности эволюции формы природных алмазов в ходе растворения и смены этапов растворения, механического износа и травления, связанные с глубинным процессом созревания очага вулканизма, переносом алмазоносного материала к дневной поверхности и выветриванием коренных пород.

Метод кристалломорфологии неравновесных кристаллических поверхностей основан на инструментальных гониометрических исследованиях полярного комплекса нормалей к поверхности кристалла в макроскопическом масштабе. Создана инструментальная база метода, включающая параболический гониометр, юстируемый кристаллодержатель, систему оптической регистрации гномонической проекции полярного комплекса, а также разработана универсальная настраиваемая градусная сетка, позволяющая повысить надежность и сократить время измерений.

В теоретической основе метода лежат разработанная автором кристаллофизическая теория динамического тензора устойчивости химических связей на поверхности кристалла, классическая кристаллофизическая теория механической прочности кристалла, неравновесная термодинамика фазовых переходов, теории роста кристаллов и классическая статистика. В рамках теории механической прочности Я.И. Френкеля построены распределения фактора Шмида, определяющие главные пластические течения структуры алмаза. Выполнены расчеты по теории периодических цепей сильных связей П. Хартмана и В.Г. Пердока для структуры алмаза и установлены все F- и S-границы алмаза, возникающие в той или иной мере в природных процессах роста, растворения и механического износа.

Основным результатом наших исследований является разработка метода кристалломорфологии округлых природных монокристаллов. Представленное исследование коллекций алмазов разных провинций мира в большей мере служит иллюстрацией применения разработанного нами метода.

- Абезгауз Г.Г., Тронь А.П., Копенкин Ю.Н., Коровина И.А.* Справочник по вероятностным расчетам. М.: Воен. изд-во, 1970. 536 с.
- Анфилов В.Н.* Условия зарождения и роста кристаллов алмаза // ЗВМО, 2004. № 1. С. 111–116.
- Анфилов В.Н.* Проблемы генезиса кимберлитов и кимберлитовых алмазов // Проблемы прогнозирования и поисков месторождений алмазов на закрытых территориях: Мат-лы конф., посвященной 40-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА». Якутск, 2008. С. 7–11.
- Аргунов К.П.* Обзор характеристик алмазов из месторождений Урала, Красноярского края, Иркутской и Архангельской областей. Якутск: Изд-во Якут. ун-та, 2001. 206 с.
- Аргунов К.П.* Алмазы Якутии: физические, морфологические, геммологические особенности. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2005. 402 с.
- Асхабов А.М.* Регенерация кристаллов (кинетические и морфологогенетические аспекты). Л.: Наука, 1979. 176 с.
- Атлас типоморфных свойств алмазов Восточно-Европейской платформы (месторождение им. М.В. Ломоносова) / Сост. О.Д. Захарченко, А.И. Махин, Г.К. Хачатрян; отв. ред. В.И. Ваганов. М.: ЦНИГРИ, 2002. 76 с.*
- Афанасьев В.П., Ефимова Э.С., Зинчук Н.Н., Коптиль В.И.* Атлас морфологии алмазов России. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 2000. 298 с.
- Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Похиленко Н.П.* Морфология и морфогенез индикаторных минералов кимберлитов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001. 276 с.
- Бартошинский З.В.* Минералогическая классификация природных алмазов // Минерал. журн., 1983. Т. 5, № 5. С. 83–93.
- Бартошинский З.В., Квасница В.Н.* Кристалломорфология алмаза из кимберлитов. Киев: Наук. думка, 1991. 172 с.
- Бетехтин А.Г.* Курс минералогии. М.: КДУ, 2007. 722 с.
- Бескровнов В.В.* Онтогенез алмаза. М.: Наука, 1992. 166 с.
- Богданов Г.Е.* Кристаллогенезис серы. Л.: Наука, 1990. 104 с.
- Варшавский А.В.* Аномальное двупреломление и внутренняя морфология алмаза. М.: Наука, 1968. 92 с.
- Варшавский А.В., Буланова Г.П.* Микрокристаллы природного алмаза // Докл. АН СССР, 1974. Т. 217, № 10. С. 1069–1072.
- Войтеховский Ю.Л.* Лорд Кельвин, пивная пена, «ячейки Коксетера» и лавинная опасность // Природа, 2012. № 7. С. 39–42.
- Вульф Ю.В.* Избранные работы по кристаллографии и кристаллофизике. М.; Л.: Гостехиздат, 1952. 250 с.
- Выращивание кристаллов из растворов / Т.Г. Петров, Е.Б. Трейвус, Ю.О. Пунин, А.П. Касаткин. Л.: Недра, 1983. 200 с.*
- Гаранин В.К., Дигонский С.В., Кудрявцева Г.П.* Модели образования природного алмаза в аспекте его синтеза // Изв. вузов, 2006. № 2. С. 8–14.
- Гаранин В.К., Зильберман А., Кудрявцева Г.П. и др.* Внутреннее строение и спектроскопические характеристики алмаза из месторождения им. М.В. Ломоносова // Докл. РАН, 1997. Т. 353. С. 223–227.
- Глазов А.И.* Методы морфометрии кристаллов. Л.: Недра, 1981. 146 с.
- Глазов А.И., Трейвус Е.Б., Михайлов В.В.* Световые фигуры от граней роста кристаллов и их использование в онтогенетических исследованиях // Зап. Всерос. минерал. о-ва, 2000. Т. 129, № 5. С. 95–102.
- Гликин А.Э., Глазов А.И.* Проблема генетической интерпретации формы кристаллов // ЗВМО, 1979. Вып. 5. С. 536–551.
- Гневушев М.А., Бартошинский З.В.* К морфологии якутских алмазов // Тр. Якутского филиала СО АН СССР. Сер. геол., 1959. № 4. С. 74–92.

- Гневушев Г.А., Бартошинский З.В. Несколько замечаний по поводу статьи Ю.Л. Орлова «К доказательству образования округлых кристаллов алмаза в процессе растворения» // Минерал. сб. Львов. ун-та, 1966. № 20. (Вып. 2.)
- Гневушев М.А., Шеманин В.И., Шеманина Е.И. Еще раз о происхождении округлых алмазов (по поводу книги Ю.А. Орлова «Морфология алмаза») // Минерал. сб. ЛГИ, 1964. № 18. (Вып. 3.) С. 361–367.
- Григорьев Д.П. Онтогенез минералов. Львов: Изд-во Львов. ун-та, 1961. 284 с.
- Григорьев Д.П., Жабин А.Г. Онтогенез минералов (индивиды). М.: Наука, 1975. 338 с.
- Дьярматти И. Неравновесная термодинамика. Теория поля и вариационные принципы. М.: Мир, 1974. 302 с.
- Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа. Справочник / Под ред. О.А. Банных и М.Е. Дрица. М.: Металлургия, 1986. 438 с.
- Евзикова Н.З. К вопросу об изменении формы кристаллов минералов в процессе их роста // Зап. ВМО, 1958. Ч. 87. С. 647–656.
- Евзикова Н.З. Практический аспект кристалломорфологии касситерита // Зап. ВМО, 1972. Ч. 101, вып. 2. С. 237–249.
- Жихарева В.П. Кристалломорфология мелких кристаллов природных алмазов // Минерал. сб. Львов. ун-та, 1979. № 33. (Вып. 1.) С. 75–78.
- Захарченко О.Д. Типоморфные особенности алмазов Юго-Восточного Поморья и их поисковое значение: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М.: ЦНИГРИ, 1994. 18 с.
- Захарченко О.Д., Махин А.И., Хачатрян Г.К. Атлас типоморфных свойств алмазов Восточно-Европейской платформы (месторождение им. М.В. Ломоносова). М.: ЦНИГРИ, 2002. 76 с.
- Зедгенизов Д.А., Реутский В.Н., Шацкий В.С., Федорова Е.Н. Примесный и изотопный состав микроалмазов с дополнительными гранями из кимберлитовой трубки «Удачная» // Геология и геофизика, 2003. Т. 44, № 9. С. 872–878.
- Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. М.: Недра-Бизнесцентр, 2003. 602 с.
- Илиел Э., Вайлен С., Доил М. Основы органической стереохимии. М.: Бином, Лаборатория знаний, 2007. 702 с.
- Инденбом В.Л., Орлов А.Н. Физическая теория пластичности и прочности // УФН, 1962. Т. 76, вып. 3. С. 557–591.
- Кадиц А.А. Режим летучести кислорода в верхней мантии как отражение химической дифференциации планетарного вещества // Геохимия, 2006. № 1. С. 63–79.
- Квасница В.Н., Харьков А.Д., Вишневецкий А.А. и др. Мелкие алмазы из кимберлитов и россыпей // Минерал. журн., 1980. № 3. С. 40–52.
- Козлова О.Г. Рост и морфология кристаллов. 2-е изд. М.: Изд-во МГУ, 1972. 302 с.
- Коттрелл А.Х. Дислокации и пластическое течение в кристаллах / Пер. с англ. М.: Металлургиздат, 1958. 266 с.
- Краснова Н.И., Петров Т.Г. Генезис минеральных индивидов и агрегатов. СПб.: Невский курьер, 1997. 228 с.
- Кристалломорфологическая эволюция минералов / Д.П. Григорьев, Н.З. Евзикова, Б. Зидарова и др. Сыктывкар, 1981. 28 с. (Сер. препр. «Науч. докл.» / Коми филиал АН СССР; Вып. 76).
- Куракевич А.А. Сверхтвердые фазы простых веществ и двойных соединений системы В–С–N–O: от алмаза до последних результатов (обзор) // Сверхтвердые материалы, 2009. № 3. С. 3–25.
- Кухаренко А.А. О двух типах округлых кристаллов алмаза // Докл. АН СССР, 1945. Т. 50. С. 437–410.
- Кухаренко А.А. О генезисе округлых кристаллов алмазов // Докл. АН СССР, 1946. Т. 51, № 8. С. 629–632.
- Кухаренко А.А. Об округлых кристаллах алмаза // Уч. зап. ЛГУ, 1954. № 178. (Вып. 4). С. 96–136.
- Кухаренко А.А. Алмазы Урала. М.: Госгеолиздат, 1955. 510 с.
- Кюри П. Избранные труды. М.; Л.: Наука, 1966. С. 95–113.
- Лейпунский О.И. Об искусственных алмазах // Успехи химии, 1939. Т. VIII. Вып. 10. С. 1519–1534.
- Маракушев А.А. К проблеме флюидного режима образования алмазоносных пород // Геология рудных месторождений, 1981. Т. 203, № 4. С. 3–17.

- Мартюшев Л.М., Селезнев В.Д. Принцип максимальности производства энтропии в физике и смежных областях. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2006. 82 с.
- Махин А.И. Кристалломорфология и физические свойства алмаза из месторождения М.В. Ломоносова (Архангельская алмазоносная провинция): Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Львовский ГУ, 1991.
- Махин А.И., Бартошинский З.В., Бекеша С.Н. и др. Кристалломорфология алмазов из кимберлитов Архангельской Алмазоносной провинции // Минерал. сб. Львов. ун-та, 1992. № 46. (Вып. 2.) С. 64–68.
- Мокиевский В.А. Морфология кристаллов. Л.: Недра, 1983. 160 с.
- Най Дж. Физические свойства кристаллов / Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1960. 386 с.
- Новиков Н.В., Федосеев Д.В., Шульженко А.А., Богатырева Г.П. Синтез алмазов. Киев: Наук. думка, 1987. 160 с.
- Орлов Ю.Л. Морфология алмаза. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 230 с.
- Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. М.: Наука, 1973. 224 с.
- Палажченко О.В. Комплексные исследования алмаза из месторождений архангельской кимберлитовой провинции: обобщение, генетические и практические следствия // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология, 2008. № 2. С. 68–75.
- Петровский В.А., Ракин В.И., Карфункель И. и др. Алмазы в современных россыпях бассейна реки Макаубас (Бразилия) // Сыктывкар. минерал. сб., 2003. № 33. С. 13–40.
- Помазанский Б.С., Богуш И.Н., Васильев Е.А., Данилова О.В. Особенности внутреннего строения алмазов типа IAB1 // Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века. Воронеж, 2003. С. 237–240 с.
- Попов В.А., Попова В.И. Парагенезисы форм кристаллов минералов. Миасс: ИГЗ УрО РАН, 1996. 102 с.
- Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. М.: Мир, 2002. 462 с.
- Пушаровский Д.Ю. Глубинные минералы Земли // Природа, 1980. № 11. С. 119–120.
- Разозин А.Л., Шацкий В.С., Зедгенизов Д.А. Новые данные о составе среды кристаллизации алмазов V разновидности из россыпей Северо-Востока сибирской платформы // Докл. РАН, 2009. Т. 425, № 4. С. 527–531.
- Разозин А.Л., Шацкий В.С., Зедгенизов Д.А., Митюхин С.И. Свидетельства эволюции среды кристаллизации алмазов в ксенолите эколита из кимберлитовой трубки Удачная (Якутия) // Докл. РАН, 2006. Т. 407, № 5. С. 660–663.
- Ракин В.И. Голографометрия кристаллообразующих сред. Л.: Наука, 1990. 96 с.
- Ракин В.И. Пространственные неоднородности в кристаллообразующей системе. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 370 с.
- Ракин В.И. Форма неплоскогранных алмазов // Докл. РАН, 2004. Т. 394, № 6. С. 808–811.
- Ракин В.И. Производство энтропии растущим кристаллом как мера неравновесности в кристаллогенезисе // Электронный журнал «Исследовано в России», 89, 855–861, 2006. <http://zhurnal.apr.relarn.ru/articles/2006/089.pdf>
- Ракин В.И. Введение в термодинамику кристаллогенезиса: Учеб. пособие по спецкурсу. Сыктывкар: Сыктывкар. гос. ун-т. Рег. № 50201000067 от 22.01.2009 ВНИИЦ, 2009. 46 с.
- Ракин В.И. Формирование криволинейных поверхностей кристаллов алмаза при их растворении // Докл. РАН, 2010. Т. 432, № 4. С. 528–532.
- Ракин В.И. Криволинейные поверхности растворения как отражение физико-химических свойств структуры кристалла // Кристаллография, 2011а. Т. 56, № 2. С. 314–323.
- Ракин В.И. Настраиваемая (универсальная) градусная гномоническая сетка // Вестн. ИГ Коми НЦ Уро РАН, 2011б. № 11. С. 16–19.
- Ракин В.И. Лонсдейлит в двойниковых сростках алмазов уральского–бразильского типа // Вестн. ИГ Коми НЦ Уро РАН, 2012а. № 4. С. 18–22.
- Ракин В.И. Поверхности механического износа на кристаллах алмаза // Докл. РАН, 2012б. Т. 442, № 2. С. 228–232.
- Ракин В.И., Пискунова Н.Н. Морфология искусственных алмазов // Изв. Коми НЦ, 2012. № 3 (11). С. 61–67.
- Сангвал К. Травление кристаллов: Теория, эксперимент, применение. М.: Мир, 1990. 492 с.
- Силаев В.И., Чайковский И.И., Ракин В.И., Тетерин И.П. Признаки осколкообразующей фации алмазов в уральских месторождениях // Литосфера, 2008. № 6. С. 54–62.
- Соболев Н.В. Глубинные включения и проблема состава верхней мантии. Новосибирск: Наука, 1974. 264 с.

- Современная кристаллография (в 4 т.). Т. 3. Образование кристаллов / А.А. Чернов, Е.И. Гиваргизов, Х.С. Багдасаров и др. М.: Наука, 1980. 408 с.; Т. 4. Физические свойства кристаллов / Л.А. Шувалов, А.А. Урусовская, И.С. Желудев и др. М.: Наука, 1981. 496 с.
- Степанов А.В. Основы практической прочности кристаллов. М.: Наука, 1974. 132 с.
- Странский И.Н., Каишев Р. К теории роста кристаллов и образования кристаллических зародышей // Усп. физ. наук, 1939. Т. 21, вып. 4. С. 408–465.
- Ткачев Ю.А. Проблема процентных величин в минералогии, петрографии и геохимии. Сыктывкар: Геопринт, 1999. 26 с.
- Успенская К.С., Урусов В.А., Дерягин Б.В. и др. Окисление алмаза и графитизированной сажи кислородом воздуха // Теор. и эксперимент. химия, 1969. Т. 5, вып. 1. С. 133–134.
- Ферсман А.Е. Кристаллография алмаза. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 566 с.
- Хайманн Р.Б., Евсюков С.Е. Аллотропия углерода // Природа, 2003. № 8. С. 66.
- Хачатрян Г.К., Палажченко О.В., Гаранин В.К. и др. Генезис «неравновесных» кристаллов алмаза из кимберлитовой трубки им. Карпинского-1 по данным катодной люминесценции и ИК-спектроскопии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4, геология, 2008. № 2. С. 38–45.
- Хейман Р.Б. Растворение кристаллов. Теория и практика / Пер. с нем. Л.: Недра, 1979. 272 с.
- Хохряков А.Ф., Пальянов Ю.Н. Морфология кристаллов алмаза, растворенных в водосодержащих силикатных расплавах // Минерал. журн., 1990. Т. 12, № 1. С. 14–23.
- Хохряков А.Ф., Пальянов Ю.Н., Соболев Н.В. Кристалломорфология как индикатор окислительно-восстановительных условий растворения природного алмаза при мантийных P – T -параметрах // Докл. РАН, 2002. Т. 384, № 5. С. 670–673.
- Циглер Г. Экстремальные принципы термодинамики необратимых процессов и механика сплошной среды. М.: Мир, 1966. 136 с.
- Чепуров А.И., Жимулев Е.И., Елисеев А.П. и др. О генезисе малоазотных алмазов // Геохимия, 2009. № 5. С. 551–555.
- Шарыгин И.С., Литасов К.Д., Шацкий А.Ф. и др. Экспериментальное исследование плавления кимберлита трубки Удачная–Восточная при 3–6.5 ГПа и 900–1500 °C // Докл. РАН, 2013. Т. 448, № 4. С. 452–457.
- Шаскольская М.П. Кристаллография: Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1984. 376 с.
- Шафрановский И.И. К кристаллографии алмазов бразильского типа // ДАН СССР, 1940а. Т. 26, № 7. С. 670–673.
- Шафрановский И.И. К кристаллографии уральских алмазов // Зап. ВМО, 1940б. Ч. 69, № 2–3. С. 185–196.
- Шафрановский И.И. Результаты статистического исследования округлых уральских алмазов // Докл. АН СССР, 1941. Т. 31, № 8. С. 787–789.
- Шафрановский И.И. Кристаллография округлых алмазов. Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1948. 132 с.
- Шафрановский И.И. Алмазы. М.: Изд-во АН СССР, 1953. 154 с.
- Шафрановский И.И. Кристаллы минералов. Ч. 1. Плоскогранные формы. Л.: Изд-во ЛГУ, 1957. 224 с.
- Шафрановский И.И. Кристаллы минералов. Ч. 2. Кривогранные, скелетные и зернистые формы. М.: Госгеолтехиздат, 1961. 332 с.
- Шмид Е., Боас В. Пластичность кристаллов, в особенности металлических. М.; Л.: ГОНТИ НКТП, 1938. 316 с.
- Элуэлл Д. Искусственные драгоценные камни / Пер. с англ.; 2-е изд. М.: Мир, 1986. 160 с.
- Юшкин Н.П. Минералогия и парагенезис самородной серы в экзогенных месторождениях. Л.: Наука, 1968. 186 с.
- Юшкин Н.П. Теория и методы минералогии (избранные проблемы). Л.: Наука, 1977. С. 291.
- Arima M., Kozai Y. Diamond dissolution rates in kimberlitic melts at 1300–1500 °C in the graphite stability field // Eur. J. Mineral., 2008. No. 20 (3). P. 357–364.
- Bundy F.P. Direct conversion of graphite to diamond in static pressure apparatus // J. Chem. Phys., 1963. V. 38, No. 3. P. 618–631.
- Bundy F.P., Basset W.A., Weathers M.S. et al. The pressure-temperature phase and transformation diagram for carbon; updated through 1994 // Carbon, 1996. V. 34, No. 2. P. 141–153.
- Cabrera N. Kinematic theory of crystal dissolution and its application to etching // Proc. Intern. Symp. Reactivity Solides, 4, Amsterdam, 1960. P. 345–351.

- Donnay I.D.H., Harker D.* A new law of crystal morphology extending the law of Bravais // *Amer. Mineral.*, 1937. V. 23. P. 446–467.
- Fedortchouk Y., Canil D.* Diamond oxidation at atmospheric pressure: development of surface features and the effect of oxygen fugacity // *Eur. J. Mineral.*, 2009. V. 21. P. 623–635.
- Fersmann A., Goldschmidt V.* *Der Diamant*. Heidelberg, 1911.
- Frank F.C.* On the kinematic theory of crystal growth and dissolution processes // *Growth and perfection of crystal* / Ed. R.H. Doremus, B.W. Roberts, D. Turnbull. N. Y., 1958. P. 411–419.
- Haggerty S.E.* Diamond genesis in a multiply-constrained model // *Nature*, 1986. V. 320. No. 6057. P. 34–38.
- Haggerty S.E., Sautter V.* Ultradeep (>300 km) ultramafic, upper mantle xenoliths // *Sci.*, 1990. V. 248. P. 993–996.
- Hartman P., Perdok W.G.* On the relation between structure and morphology of crystal // *Acta Crystallogr.*, 1955a. V. 8. P. 49–52; 525–529.
- Jandacka P., Hlavac L.M., Madr V. et al.* Measurement of specific fracture energy and surface tension on brittle materials in powder form // *Int. J. Fract.*, 2009. V. 159. P. 103–110.
- Khokhryakov A.F., Pal'yanov Y.N.* Influence of the fluid composition on diamond dissolution forms in carbonate melts // *Am. Mineral.*, 2010. V. 95. P. 1508–1514.
- Kozai Y., Arima M.* Experimental study on diamond dissolution in kimberlitic and lamproite melts at 1300–1420 °C and 1 GPa with controlled oxygen partial pressure // *Amer. Mineralogist*, 2005. V. 90 (11–12). P. 1759–1766.
- Niggli P.* Kristallization und morphologie des rhombischen Schwefels // *Zs. Kristallographie*, 1923. Bd 58. S. 490–521.
- O'Neill H.St.C., Wall W.J.* The olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer, the nickel precipitation curve and the oxygen fugacity in the Earth's Upper Mantle // *J. Petrol.*, 1987. V. 28. P. 1169.
- Pierson H.O.* *Handbook of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes. Properties, Processing and Applications*. New Jersey: Noyes Publications, 1993. 416 p.
- Properties, growth and applications of diamond / Ed. A.J. Neves, Maria Helena Nazaré, INSPEC. EMIS Group, Institution of Electrical Engineers, 2001. 418 p.
- Rakin V.I.* The shape of a growing crystal: a numerical study // *J. Crystal Growth*, 1995. V. 155. P. 260–265.
- Ringwood A.E.* Phase transformations and their bearing on the constitution and dynamics of the mantle // *Geoch. Cosmochim. Acta*, 1991. V. 55. P. 2083–2110.
- Robinson D.N., Scott J.A., Van Niekerk A., Anderson V.G.* The sequence of events reflected in the diamonds of some southern African kimberlites // *Geol. Soc. Australia. Sp. Publ.*, 1989. V. 14. P. 990–1000.
- Sautter V., Haggerty S.E., Field S.* Ultradeep (greater than 300 kilometers) ultramafic xenoliths – petrological evidence from the transition zone // *Sci.*, 1991. V. 252. P. 827–830.
- Stachel T., Brey G.P., Harris J.W.* Inclusions in Sublithospheric Diamonds: Glimpses of Deep Earth // *Elements*, 2005. V. 1, No. 2. P. 73–78.
- Sunagawa I.* Morphology of natural and synthetic diamond crystals // *Materials Science of the Earth's Interior*. Tokyo, 1984. P. 303–330.
- Swain M.V., Atkinson B.K.* Fracture surface energy of olivine // *Paleoph.*, 1978. V. 116. P. 866–872.
- van Enckevort W.J.P.* Morphology of diamond surfaces // *Property, growth and applications of diamond* / Ed. A.J. Neves, Maria Helena Nazaré. INSPEC. EMIS Group, Institution of Electrical Engineers, 2001. P. 95–100.
- Wu B.R.* Structural and vibrational properties of the 6H diamond: First-principles study // *Diamond and Related Materials*, 2007. V. 16. P. 21–28.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Естественные поверхности монокристалла алмаза	7
1.1. Форма поверхности монокристалла	7
1.1.1. Классические представления о поверхности кристалла	7
1.1.2. Мера неравновесности кристаллообразующей системы	13
1.2. Кристаллические формы алмаза	17
1.2.1. Основные определения	18
1.2.2. Равновесная форма	20
1.2.3. Стационарная форма	21
1.2.4. Предельная форма	23
1.2.5. Среднестатистическая форма	23
1.3. Условия роста и теоретическая форма кристалла алмаза	24
1.3.1. Химический состав среды алмазообразования	24
1.3.2. Теория периодических цепей сильных связей и структура алмаза	26
1.4. Формы кристаллов и флуктуации свободной энергии	29
1.4.1. Минералы глубинных пород	29
1.4.2. Гранулометрия природных алмазов	31
1.5. Метод описания криволинейных форм алмазов И.И. Шафрановского и А.А. Кухаренко	37
1.5.1. Исследования И.И. Шафрановского	38
1.5.2. Исследования А.А. Кухаренко	44
1.5.3. Поправки Ю.Л. Орлова	48
Глава 2. Инструментальная морфометрия алмаза	49
2.1. Метод параболической гониометрии	50
2.1.1. Параболический гониометр	50
2.1.2. Градусные сетки и измерения на гониометре	52
2.1.3. Принцип отбора кристаллов для гониометрии	56
2.1.4. Получение гномонической проекции рефлексов	56
2.2. Двойникование алмаза. Лонсдейлит	58
2.2.1. Диагностика двойников алмаза	58
2.2.2. Срастание алмаза с лонсдейлитом и другими поли типами	62
2.3. Формы роста искусственных алмазов	71
Глава 3. Формы растворения и роста природного алмаза	84
3.1. Тензор устойчивости химических связей на поверхности кристалла	84
3.1.1. Модель диффузионного растворения	84
3.1.2. Свойства тензора устойчивости	88
3.2. Поверхности растворения на кристалле алмаза	89
3.2.1. Параллельные плоскости	90
3.2.2. Эллиптический цилиндр	93
3.2.3. Эллипсоид	95
3.2.4. Особые поверхности растворения	102
3.2.5. Простые формы растворения алмаза	110
3.3. Эволюционная модель растворения алмаза	113
3.4. Комбинированные формы растворения кристаллов алмаза	117
3.5. Формы растворения в условиях понижения внешней симметрии	118
3.6. Статистические модели формы растворения алмазов	123
3.6.1. Расчет параметров обобщенного эллипсоида алмаза	123
3.6.2. Среднестатистический эллипсоид для выборки алмазов	126

3.7. Регенерация алмаза	129
3.7.1. Регенерация в условиях стабильности структуры алмаза	129
3.7.2. Регенерация метастабильного алмаза	142
Глава 4. Формы механического износа алмаза уральского типа	147
4.1. Взаимоотношения поверхностей растворения, травления и механического износа на кристаллах алмаза	147
4.2. Физические закономерности механической деградации поверхности алмаза. Анизотропия механических свойств кристалла	149
4.3. Квазистатическая деформация кристалла	153
4.3.1. Механизм течения кристалла при квазистатическом сжатии	153
4.3.2. Формы рефлекса кристалла алмаза при квазистатической нагрузке	160
4.4. Хаотический ударный износ кристалла	163
4.4.1. Условия хаотического ударного износа поверхности кристалла	163
4.4.2. Трансформация поверхности алмаза при хаотической механической обработке	165
4.4.3. Изменения светового рефлекса при ударном износе кристалла	168
4.5. Особенности трансформации рефлексов алмаза уральского типа в результате механического износа поверхности	176
4.5.1. Смешанные и переходные режимы износа поверхности кристалла	177
4.5.2. Износ кристаллов с блочной структурой. Серповидный рефлекс	182
4.5.3. Механический генезис поверхностей эллипсоида II типа	186
4.5.4. Волосовидные рефлексы и спеклы	187
Глава 5. Формы травления алмаза	188
5.1. Травление алмаза. Лимитирующие неравновесные процессы	188
5.2. Поверхности травления алмаза уральского типа	191
5.3. Модель формы кинетического травления алмаза	212
Глава 6. Формы кристаллов алмаза Северного Урала	218
6.1. Первая коллекция алмазов вишерского типа	220
6.2. Вторая коллекция алмазов вишерского типа	234
6.3. Сравнительный анализ алмазов Урала	266
Глава 7. Формы кристаллов алмаза Бразилии	269
7.1. Алмазы бассейна р. Макаубас	298
7.2. Алмазы других провинций Бразилии	298
7.2.1. Кристаллы из россыпи р. Зеленая. Штат Минас Жерайс	298
7.2.2. Кристаллы штата Мату Гроссу	301
7.2.3. Кристаллы серии Ton-01-11	305
Глава 8. Округлые алмазы Якутии	308
8.1. Алмазы руч. Холомолоох	308
8.2. Алмазы россыпей р. Булкур	322
8.3. Алмазы кимберлитовых жил трубки Интернациональная	325
8.4. Алмазы трубки Удачная	340
8.4.1. Алмазы первой коллекции	340
8.4.2. Алмазы второй коллекции	352
8.5. Алмазы делювиальных россыпей трубок Интернациональная и Мир	361
8.6. Алмазы россыпей р. Эбелях	361
Глава 9. Сравнительный анализ алмазов Урала, Бразилии и Якутии	374
9.1. Форма растворения	374
9.2. Формы механической деградации алмаза	378
9.3. Формы травления	380
9.4. Физиографические признаки морфологии кристаллов	381
9.5. Схема полярных признаков	382
Заключение	386
Список литературы	387

Научное издание

Владимир Иванович Ракин

МОРФОЛОГИЯ АЛМАЗОВ УРАЛЬСКОГО ТИПА

Рекомендовано к изданию
ученым советом Института геологии Коми НЦ
и президиумом УрО РАН

Редактор **Н.М. Катаева**
Технический редактор **Е.М. Бородулина**
Корректор **Н.В. Каткова**
Компьютерная верстка **А.В. Гариевой**
Дизайн **Т.О. Турыгиной**

ISBN 978-5-7691-2371-9



9 785769 123719

НИСО УрО РАН № 23(13)–45. Подписано в печать 11.12.13. Формат 70×100 1/16.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 32. Уч.-изд. л. 32.
Тираж 200 экз. Заказ

Оригинал-макет подготовлен в РИО УрО РАН.
620990, Екатеринбург, ул. Первомайская, 91.

АДРЕСx ТИПОГРАФИИ