

Б. М. ОСОВЕЦКИЙ, О. Б. НАУМОВА

**МЕЛКИЕ АЛМАЗЫ
И ИХ ПОИСКОВОЕ ЗНАЧЕНИЕ**

Монография



Пермь 2014

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Б. М. ОСОВЕЦКИЙ, О. Б. НАУМОВА

**МЕЛКИЕ АЛМАЗЫ
И ИХ ПОИСКОВОЕ ЗНАЧЕНИЕ**

Монография

Пермь 2014

УДК 549.211

ББК 26.303

О 75

Осовецкий Б. М., Наумова О. Б.

О 75 Мелкие алмазы и их поисковое значение: монография /
Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2014. – 142 с.: ил.

ISBN 978-5-7944-2373-0

Представлены результаты изучения гранулометрического состава алмазов коренных и россыпных месторождений. Описываются морфологические особенности мелких зерен алмазов в различных типах пород. Приводится характеристика микро- и наноразмерных форм поверхности алмазов. Рассматриваются возможности и способы использования мелких алмазов в поисковой практике.

Книга предназначена для геологов – специалистов по поискам алмазных месторождений, а также минералогов, кристаллографов, преподавателей и студентов вузов.

Табл. 11. Ил. 75. Библиогр. 142 назв.

УДК 549.211

ББК 26.303

Печатается по постановлению редакционно-издательского совета
Пермского государственного национального исследовательского университета

Рецензенты: д-р геол.-мин. наук A. C. Флаас (Пермский национальный исследовательский политехнический университет); Естественнонаучный институт Пермского государственного национального исследовательского университета

ISBN 978-5-7944-2373-0

© Осовецкий Б.М., Наумова О.Б., 2014

© Пермский государственный национальный
исследовательский университет, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Введение	4
Глава	Гранулометрический состав алмазов.....	9
I.		
1.1.	Гранулометрический состав кимберлитовых алмазов.....	10
1.2.	Гранулометрический состав россыпных алмазов.....	17
Глава	Морфология мелких алмазов.....	20
II.		
2.1.	Космогенные алмазы.....	20
2.2.	Импактные алмазы.....	22
2.3.	Коровые метаморфогенные алмазы.....	27
2.4.	Морфологические особенности мелких алмазов кимберлитов.....	29
2.5.	Мелкие алмазы лампроитов.....	43
2.6.	Морфологические особенности мелких россыпных алмазов.....	43
2.7.	Искусственные алмазы.....	46
Глава	Микро- и наноформы поверхности мелких алмазов.....	50
III.		
3.1.	Общие особенности поверхности мелких алмазов.....	50
3.2.	Трещиноватость.....	58
3.3.	Пористость и кавернозность.....	62
3.4.	Углубления геометрически правильной формы.....	64
3.5.	Пирамиды нарастания.....	68
3.6.	Бугорчатость поверхности.....	68
3.7.	Слоистость.....	70
3.8.	Поликристалличность.....	77
3.9.	Налеты и пленки на поверхности алмазов.....	82
3.10.	Микровключения на поверхности алмазов.....	89
Глава	Поисковое значение мелких алмазов.....	91
IV.		
4.1.	Методы поисков коренных месторождений алмазов.....	91
4.2.	Роль мелких алмазов при открытии кимберлитовых и лампроитовых провинций и полей.....	96

4.3. Установление алмазоносности кимберлитов по мелким алмазам.....	99
4.4. Перспективные районы с находками мелких алмазов.....	105
4.5. Особенности методики поисков кимберлитов по мелким алмазам.....	119
4.6. Разбраковка мелких алмазов.....	126
Заключение	128
Библиографический список.....	131

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия значительно расширился объем информации, посвященной вопросам геологии и минералогии алмазных месторождений, разнообразия их генетических типов и самим алмазам. Соответственно повысился интерес к изучению мелких кристаллов алмазов. Этому способствовало открытие коренных источников, в которых все алмазы представлены исключительно мелкими частицами. При детальном изучении алмазоносности кимберлитов с условием рассмотрения более полного гранулометрического спектра алмазов установлено заметное присутствие среди них мелких размерных классов. Микроалмазы кимберлитов хотя и не имели практического значения, но оказались весьма полезными для исследования с генетических позиций (Квасница и др., 1999).

Интерес к изучению микро- и наноалмазов постоянно возрастает в связи с открытием их уникальных свойств. В частности, активные исследования ведутся в области использования наноалмазов как эффективных медицинских биодатчиков благодаря их высоким флюoresцентным характеристикам (Schrand et al., 2009). Это стимулирует разработку технологических методов получения наноалмазов, например методом детонации. Кроме того, по одной из технологий микроалмазы размером 1–2,5 мкм получены путем дробления образцов пород с высокими их концентрациями и последующего растворения в кислотном или горячем щелочном растворе (Carabineiro et al., 2012).

При разработке кимберлитов и лампроитов во многих странах мира используется технология, основанная на извлечении алмазов размером более 0,5 мм. В частности, данная технология в течение длительного периода применялась на одном из крупнейших по объемам добычи алмазов руднике Аргайл (Австралия). В последние годы было принято решение поднять предельный размер извлекаемых алмазов до 1,5 мм с целью существенного снижения объемов переработки руды, сокращения издержек производства и увеличения рентабельности предприятия (Подчасов и др., 2005). Та же тенденция наблюдается и на других алмазодобывающих предприятиях мира, в т.ч.

в России. В перспективе это приведет к накоплению значительных масс отходов, которые фактически будут представлять месторождения мелких алмазов. Со временем необходимость в них будет расти, что потребует совершенствования и внедрения новых технологий разработки.

Помимо практической ценности мелкие алмазы имеют и научную ценность, являясь объектом постоянного интереса ученых разных специальностей. Проблема происхождения алмазов непосредственно связана с изучением процессов, происходящих на значительных глубинах в мантии. Различие крупных и мелких алмазов по ряду признаков некоторые исследователи объясняют существованием нескольких этапов алмазообразования. В частности, А.А.Маракушев (1998) рассматривал мелкие алмазы как индикаторы условий, предшествовавших началу кристаллизации основных минералов мантийного магматического очага. Между тем другие ученые предлагают рассматривать мелкие алмазы как особую генерацию, образующуюся на заключительной стадии кимберлитообразования. Причем отдельной генерацией считать наноразмерные алмазы, условия образования которых исследованы экспериментально и установлено, что они резко отличаются от таковых для более крупных алмазов.

В развитии современных генетических представлений об алмазообразовании предложено выделять два генетических типа алмазов – мантийные и субдукционные (Зинчук, Афанасьев, 2005). Первые кристаллизовались в мантии за счет углерода мантийного резервуара и являются наиболее древними по возрасту. Субдукционные алмазы образовались при погружении в мантию блоков океанической коры и, таким образом, кристаллизовались за счет корового углерода. Субдукционные алмазы отличаются от мантийных присутствием большого количества микрокристаллов размером менее 0,25 мм, имеют эклогитовый и пироксенитовый парагенезис и дефектную структуру. В отличие от мантийных алмазов, характеризующихся слоистым нарастанием плоских сеток, субдукционные разности имеют принципиально иной механизм роста. Он приводит к образованию волокнистых и радиально-лучистых кристаллитов, микро- и мелкозернистых агрегатов. Субдукционные индивиды встречаются в кимберлитах и лампроитах, а также в других магматических породах основного и ультраосновного состава и в метаморфических породах. Они могут образовывать повышенные концентрации в месторождениях, приуроченных к зонам развития протерозойских и фанерозойских складчатых систем.

Мелкие алмазы иногда встречались в шлиховых пробах и учитывались при решении поисковых задач. Однако их поисковое значение существенно повысилось после детального изучения алмазов разной крупности в кимберлитовых месторождениях. В частности, было обосновано представление о том, что морфология значительной части алмазов в крупных и мелких классах принципиально не различается; меняется лишь процентное соотношение разных морфологических типов.

Углубленному изучению особенностей мелких алмазов, кроме того, способствует развитие современной аналитической базы, особенно электронной микроскопии, рамановской спектроскопии, люминесцентных методов, микрозондового анализа и т.д.

Рост интереса к изучению мелких алмазов сопровождается увеличением числа публикаций по данной тематике, в т.ч. монографических изданий. В одной из первых монографий, посвященных исследованию большого количества зерен алмазов (около 10 млн микрокристаллов) размером менее 0,2 мм, находившихся в отвалах отработки ряда кимберлитов Южной Африки, предложена их детальная морфологическая систематика (Tolansky, 1955). Отмечено, что практически все изученные микрокристаллы представлены хорошо окристаллизованными формами, среди которых преобладают октаэдры (в большинстве трубок), ромбододекаэдры и двойники. Специфической особенностью мелких алмазов южноафриканских кимберлитов является отсутствие кристаллов кубического габитуса.

Одним из первых исследований мелких алмазов в СССР является книга «Алмазы песчаных отложений Украины» (Юрк и др., 1973), в которой отражены предварительные результаты работ по изучению алмазоносности территории Украины. Особое значение этой работы заключалось в большом внимании к вопросам методики обогащения песков титаноциркониевых россыпей, которые содержат только мелкие алмазы и поэтому до сих пор не опробовались. Не менее важными авторы считали вопросы концентрирования мелких алмазов в лабораторных условиях и их диагностики. Наконец, в данной монографии впервые указано на роль мелких алмазов как поисковых индикаторов коренных источников.

В книге В.Н.Кvasницы «Мелкие алмазы» (1985) приведена всесторонняя характеристика мелких алмазов Украины с привлечением новых данных и более детальным описанием их кристаллографических особенностей. В то же время в ней проанализированы основные типоморфные признаки мелких алмазов кимберлитов и некимберлитовых источников (ультрамафитов, щелочных базальтоидов, альнеитов, базальтов, пикритов, импактитов, метеоритов). Тем самым появилась возможность использовать типоморфные особенности мелких алмазов разного генезиса в прогнозно-поисковых исследованиях.

В 1996 г. вышла в свет книга Б.С.Лунева и Б.М.Освещекого «Мелкие алмазы Урала», основанная на результатах изучения алмазов размером менее 1 мм, выделенных из отложений промышленных россыпей западного склона Урала. С учетом отрицательных результатов многочисленных попыток обнаружить коренные источники уральских алмазов в ней предложен принципиально новый подход к решению данной проблемы. Авторами обосновано существование прямой связи между содержанием промышленных алмазов в определенных типах россыпей и встречаемостью в них мелких кристаллов. Кроме того, установлена более высокая встречаемость мелких алмазов (по количеству штук) по сравнению с крупными. В качестве практического ре-

зультата предложена методика малообъемного опробования на мелкие алмазы, предназначенная как для оценки россыпей, так и для поисков коренных источников.

Монография В.Н.Квасницы и др. «Типоморфизм микрокристаллов алмаза» (1999) на данное время является наиболее полным исследованием микрокристаллов алмазов разного генетического типа, имеющимся в мировой литературе. По сравнению с предыдущей работой (Квасница, 1985), в данной книге значительно расширены сведения о типоморфных особенностях мелких алмазов. Книга сопровождается большим количеством высококачественных электронных микрофотографий мелких алмазов.

Помимо перечисленных выше работ сведения о мелких алмазах содержатся во многих других монографиях как составная часть общего описания алмазов. Так, детальная характеристика алмазов класса 1–0,5 мм кимберлитовой трубки имени В.Гриба (Архангельская кимберлитовая провинция) приведена в атласе Г.П.Кудрявцевой и др. (2005). Среди генетических типов алмазов выделены и детально описаны четыре группы: космические, импактные, коровые и мантийные. Последние разделены на кимберлитовые и лампроитовые.

В капитальных трудах В.М.Подчасова и др. «Россыпи алмазов мира» (2005) и С.А.Граханова и др. «Россыпи алмазов России» (2007) при характеристике гранулометрического состава алмазов указывается доля кристаллов размером 1–0,5 мм, что позволяет предполагать их достаточно высокую встречаемость по количеству штук даже в россыпях и, как следствие, использовать как поисковые индикаторы.

Мелкие алмазы с разных позиций изучались сотрудниками многих заинтересованных организаций в стране и за рубежом, результаты этих исследований опубликованы в многочисленных статьях. Ссылки на некоторые из них приведены в списке литературы.

Целью нашего исследования является обоснование роли мелких алмазов как индикаторов алмазоносности новых перспективных площадей, которые могут быть использованы при поисках коренных источников (кимберлитов и лампроитов).

Актуальность данной проблемы, во-первых, обусловлена наличием значительного количества таких площадей на территориях разных стран мира, на которых в настоящее время активно ведутся поисковые работы. Во-вторых, открытие новых кимберлитовых трубок, несмотря на явные признаки их присутствия в пределах поисковой площади, становится все более сложной проблемой, часто затягивается на десятилетия и сопровождается огромными финансовыми затратами. Во многих случаях традиционные методы поисков коренных источников оказываются бесполезными.

В связи с целевой направленностью исследований мы не касались многих вопросов минералогии мелких алмазов (внутреннее строение, кристалломорфология, физические свойства, химический состав, включения и др.). Они остались вне поля зрения, поскольку, с одной стороны, уже были рас-

смотрены в ряде трудов, перечисленных выше, и, с другой – авторы не располагали достаточно представительной выборкой мелких алмазов.

Объекты исследования представлены кимберлитами трубы Мир и импактитами Попигайского кратера, коллекции микрокристаллов алмаза из которых были переданы авторам для анализа. Кроме того, детально изучены собственные находки в россыпях западного склона Урала (Красновишерская и Яйвинская алмазоносные подпровинции), Южного Тимана (Джежимпарминская структура), Вятско-Камской впадины, Оренбургской области, Актюбинского Приуралья, Башкирии. В общей сложности исследовано около 200 мелких зерен алмазов.

Методика исследований включала полевую и лабораторную стадии. Полевые исследования по установлению присутствия мелких алмазов в рыхлых отложениях периодически проводились сотрудниками Пермского университета в течение почти 50 лет (с 1966 по 2009 г.) на территориях Урала и Приуралья, Тимана, Кировской области, Мордовии, Башкирии, Актюбинского Приуралья, Армении, Азербайджана. Отбор проб производился из рыхлых крупнообломочных пород или продуктов дробления пород коллекторов, которые подвергались грохочению с выделением мелкообломочной части. Последняя обогащалась на винтовом сепараторе с получением концентрата. Концентрат обрабатывался по сложной схеме в лаборатории Пермского университета. Детальное описание полевой и лабораторной схем обработки проб приводится в последней главе монографии.

Диагностика мелких алмазов предварительно проведена на основе оптических и других физических свойств под поляризационным и бинокулярным микроскопами. Основное внимание уделялось морфологическим особенностям, блеску, твердости, люминесценции. Окончательная диагностика проведена рентгеноструктурным методом с получением дифрактограммы, а также микрозондовым методом.

Особенности поверхности мелких алмазов, включая микро- и наноформы, изучены с использованием сканирующего электронного микроскопа марки JSM 6390LV с энергодисперсионным спектрометром INCA act-X фирмы Oxford Instruments и полевого микроскопа марки JSM 7500F с холодной эмиссией (оба фирмы JEOL). Всего было сделано несколько сотен микрофотографий деталей поверхности алмазов. Выполнен также микрозондовый анализ микровключений и поверхностных пленок на зернах алмаза.

Авторы благодарны сотрудникам ЦНИГРИ и ОАО «Уралалмаз», в частности В.А.Езерскому, представившим для изучения коллекции мелких алмазов, а также сотрудникам Пермского университета, принимавшим участие в организации и проведении полевых и лабораторных исследований (Б.С.Луневу, В.А.Наумову, И.Я.Илалдинову, К.П.Казымову, Н.А.Косицыной, А.А.Блинову, В.Я.Меньшиковой).

Глава I. ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ АЛМАЗОВ

Наиболее полное представление о распространенности мелких алмазов в природных объектах можно получить на основе анализа гранулометрического состава алмазов конкретных, хорошо изученных месторождений. Однако для этого необходимо иметь данные, основанные на изучении полного гранулометрического спектра зерен драгоценного камня. Такая информация появляется редко, поскольку обычно интерес представляет только крупность промышленно извлекаемых камней (в основной массе – крупнее 1 мм).

В последние десятилетия многим исследователям удалось выполнить специальные работы в этом направлении, что позволило существенно расширить диапазон изученной размерности алмазов. Такие работы проводятся в нескольких направлениях. Одним из них является применение более совершенных технологий выделения природных алмазов при разработке месторождений (кимберлитов, лампроитов и др.) с целью изучения распространности, размеров, свойств и других их особенностей. Другое направление связано с применением современных методов изучения состава алмазоносных пород. В частности, в процессе таких исследований в кимберлитах Китая были обнаружены частицы алмазов субмикронной размерности (Yanan et al., 1997).

Известно, что для минеральных индивидов каждого минерального вида существует определенный диапазон размерности зерен в коренных месторождениях. Одни из них отличаются достаточно широким спектром размерности частиц из-за больших вариаций параметров минералообразующей среды в связи с их генетическим разнообразием. К таковым относятся кварц, полевые шпаты, берилл, сподумен, слюды и т.д. Однако основная масса зерен многих минеральных видов представлена в природных объектах преимущественно мелкими частицами. Это обычно обусловлено низким кларком многих videoобразующих элементов в земной коре (золото, платиноиды, цирконий, торий, уран и др.). Вместе с тем существуют минеральные семейства,

которые состоят из мельчайших частиц продуктов химического преобразования первичных минералов (глинистые минералы, хлориты).

На протяжении многих лет ученые не имели представления о полном гранулометрическом спектре кристаллов алмаза. В течение столетий добыча алмазов проводилась из россыпей кустарными методами с извлечением только крупных кристаллов. С открытием кимберлитов диапазон размерности извлекаемых алмазов увеличился благодаря созданию соответствующей технологии с применением обогатительных фабрик и расширению областей применения драгоценного камня. Однако и на данном этапе извлекаются в основном алмазы крупностью более 1 мм, которые отражают только часть общего гранулометрического спектра природных алмазов. Это обусловлено соответствующим спросом на мировом рынке, ограниченными возможностями технологии извлечения алмазов в промышленных масштабах и экономическими факторами. И хотя способы извлечения мелких алмазов существуют, их применение в широких масштабах экономически нецелесообразно.

Расширение сферы использования алмазов в промышленности, особенно в таких стратегических отраслях, как приборостроение, информатика, медицина и другие, поставило человечество перед необходимостью более детального исследования их свойств и химического состава. Оказалось, что некоторые сорта алмазов (например, безазотные), имеющие относительно небольшие размеры кристаллов, даже важнее, чем крупные камни, используемые в ювелирной промышленности. Были открыты новые типы высокоалмазоносных пород, содержащих только мелкие алмазы (импактиты, эклогиты, гнейсы и метаморфические сланцы). Совершенствовались методика обработки поисковых и разведочных проб, лабораторные методы выделения и диагностики алмазов, аналитическое оборудование. Благодаря этому при поисковых работах в новых алмазоносных районах все чаще стали обнаруживать, наряду с минералами-спутниками, мелкие кристаллы алмазов. Все это стимулировало интерес к изучению их гранулометрического состава в различных типах алмазоносных пород и создало необходимые предпосылки успешного решения данной проблемы.

Ниже будут рассмотрены имеющиеся в научной литературе данные о гранулометрическом составе алмазов ряда месторождений. При этом мы ограничились результатами только тех исследований, в которых наряду с данными по алмазам крупнее 1 мм были представлены данные по кристаллам более мелкого размера.

Кроме того, необходимо было учитывать способ расчета гранулометрического состава алмазов. Обычно вариации крупности зерен драгоценных камней, благородных металлов и других полезных компонентов рассчитываются на основе массовых процентов. Эти данные необходимы для оценки промышленной ценности месторождений, расчета стоимости сырья, разделения его на сорта и т.д. Однако при проведении поисковых работ на первом этапе важны находки даже единичных зерен алмазов. Отсюда при оценке их встречаемости следует опираться на данные гранулометрического состава,

рассчитанного по количеству обнаруженных кристаллов в отдельных классах крупности. Ниже приводятся данные именно таких исследований.

Анализ имеющихся в литературе материалов показал, что диапазон крупности алмазов, изученный разными авторами, не совпадает. Естественно, что у всех исследователей он в той или иной степени ограничен в области малой размерности. При этом было замечено, что чем шире диапазон использованной гранулометрической шкалы, тем более заметную долю составляют мелкие алмазы в общем количестве находок. Этот вывод особенно важен для поисковой практики.

1.1. Гранулометрический состав кимберлитовых алмазов

Одной из первых работ, в которой приводятся детальные данные о гранулометрическом составе кимберлитовых алмазов в диапазоне крупности выше 0,5 мм, является классическая монография, посвященная якутским алмазам (Бобриевич и др., 1959). Эти данные свидетельствуют о значительной доле (до 30%) алмазов крупностью менее 1 мм в некоторых кимберлитах Якутии (табл. 1).

Таблица 1

**Гранулометрический состав алмазов в кимберлитах Якутии
(по Бобриевичу и др., 1959), %**

Класс, мм	Трубка Мир	Трубка Зарница	Трубка Удачная
0,5–0,75	2,1	11,3	3,2
0,75–1,0	4,8	18,8	19,6
1,0–1,25	13,9	23,8	23,9
1,25–1,5	25,4	15,1	17,9
1,5–1,75	18,2	8,5	11,0
1,75–2,0	13,2	9,3	9,2
2,0–2,25	7,9	4,5	4,4
2,25–2,5	4,2	4,2	3,4
2,5–2,75	3,5	1,8	1,7
2,75–3,0	2,0	0,5	1,2
3,0–3,25	1,8	0,8	0,9
3,25–3,5	1,1	0,8	1,7
3,5–3,75	0,6	0,3	0,6
3,75–4,0	0,6	-	0,2
4,0–4,25	0,2	-	0,3
4,25–4,5	0,2	0,3	0,2
4,5–4,75	0,1	-	0,1
4,75–5,0	-	-	-
Более 5,0	0,2	-	0,3

Сумма	100	100	99,8
-------	-----	-----	------

Полученные результаты были основаны на замере под микроскопом весьма представительной выборки кристаллов алмаза. Однако следует признать, что методика обогащения исходных крупнообъемных проб кимберлитов была предназначена для промышленной разработки и не рассчитана на полное улавливание мелких зерен алмазов. Исключение из рассмотрения алмазов размером менее 0,5 мм, как выяснилось из последующих исследований, также значительно повлияло на полученный результат.

Более поздние работы, выполненные для нескольких кимберлитовых трубок Якутии, показали, что количество алмазов размером менее 0,5 мм обычно несколько превышает число находок более крупных кристаллов (Квасница и др., 1999). Таким образом, было установлено, что количество зерен алмазов размером менее 1 мм значительно больше, чем извлекаемых на обогатительных фабриках. При этом среди них выявлено присутствие большого количества алмазных осколков.

Гранулометрический состав алмазов из кимберлитов Архангельской алмазоносной провинции, изученный по выборке их зерен крупностью более 0,5 мм, также характеризуется преобладанием мелких классов (Кудрявцева и др., 2005). В частности, доля кристаллов размером 1–0,5 мм в разных трубках колеблется в пределах 57–78% (табл. 2). Можно предположить, что реальная их доля намного выше с учетом того, что алмазы крупностью менее 0,5 мм не извлекались.

Таблица 2

Гранулометрический состав алмазов месторождения им. Ломоносова (по Кудрявцевой и др., 2005), %

Кимберлитовая трубка	К л а с с, м м				Сумма
	4–3	3–2	2–1	1–0,5	
Имени Ломоносова	0,1	3,2	18,7	78,0	100
Поморская	0,1	7,1	30,2	62,6	100
Пионерская	0	4,1	22,5	73,4	100
Имени Карпинского-1	0,5	6,3	36,3	56,9	100
Имени Карпинского-2	0,3	3,1	21,6	75,0	100
Архангельская	0,2	3,7	25,9	70,0	99,8

Детальное изучение крупности алмазов показало, что этот вывод относится ко всем фациям и типам кимберлитовых пород (Ларченко и др., 2004). Специальные исследования, проведенные с целью извлечения из архангельских кимберлитов алмазов размером менее 0,5 мм, свидетельствовали о том, что количество последних в разных трубках составляет от 75 до 90% (Палкина, Хренов, 1997).

Анализ, выполненный сотрудниками АК «АЛРОСА», позволил им сделать общий вывод о том, что в кимберлитовых телах идет закономерное увеличение количества алмазов от крупных к мелким классам, при существенном преобладании последних. Этот вывод основан на результатах более полного изучения гранулометрического спектра кимберлитовых алмазов многих месторождений Якутской алмазоносной провинции (табл. 3).

В кимберлитовых силах площади Гуаниамо (Венесуэла) доля алмазов размером 1–0,5 мм колеблется от 24,3 до 51,2% общего их числа (по количеству кристаллов), что несколько отличается от приведенных выше данных и, скорее всего, обусловлено недостаточно полным извлечением мелких зерен (Kaminsky et al., 2000).

Результаты отдельных, еще более детальных, исследований с изучением гранулометрического спектра алмазов размером менее 1 мм подтвердили ранее полученные данные; при этом было показано, что в классе –0,5 мм алмазов по количеству кристаллов обычно еще больше, чем алмазов размером 1–0,5 мм (Граханов и др., 2007).

Таблица 3
**Гранулометрия кимберлитовых алмазов
Якутской кимберлитовой провинции (по Граханову и др., 2007), %**

Кимберлитовое поле	Кимберлитовая трубка	Класс, мм				Сумма
		8–4	4–2	2–1	менее 1	
Укукитское	Ленинград	0,3	4,5	43,5	51,7	100
Верхне-Мунское	Заполярная	0,3	3,1	26,5	70,1	100
Накынское	Нюрбинская	0,1	2,3	18,7	78,9	100
Далдынское	Удачная	0,1	1,8	20,9	77,2	100
Алакит-Мархинское	Юбилейная	0,1	1,1	16,9	81,9	100
«	Комсомольская	0,3	4,6	24,5	70,6	100
«	Айхал	0,1	0,9	23,3	75,7	100
Мирнинское	Мир	1,1	9,4	39,0	50,5	100
«	Интернациональная	0,6	12,1	39,2	48,1	100
«	Дачная	0,2	7,9	31,2	60,7	100

Только в некоторых трубках их соотношение оказалось обратным. Например, количество алмазов в классе 1–0,5 мм в пробах разной массы из кимберлитов трубки Удачная-Западная варьирует от 21 до 124 кристаллов. При этом в среднем в 100 кг породы находится 10 алмазов данной крупности. Для кимберлитов трубки Удачная-Восточная это значение еще выше и составляет 13 алмазов (Барашков, Алтухова, 2005). Алмазов размером 0,5–0,2 мм несколько меньше: соответственно от 2 до 32 находок в пробах из трубки Удачная-Западная, или 2 алмаза в 100 кг породы. Для пород трубки Удачная-Восточная число находок таких алмазов меняется от 6 до 99, или 4 кристалла в 100 кг. В целом, на долю алмазов классов 1–0,5 и 0,5–0,2 мм приходится от 77 до 89 % общего их количества (табл. 4).

Встречаемость мелких алмазов заметно варьирует в разных фациях и петрографических типах кимберлитовых пород. Особенно велика доля мелких алмазов, прежде всего размером менее 0,5 мм, в серпентинизированных среднепорфировых автолитах (Барашков, Алтухова, 2005).

Приведенные выше результаты вызывали некоторые сомнения у ряда специалистов в связи с вероятностью появления большого количества мелких алмазных осколков при механическом дроблении кимберлитов на обогатительной фабрике. В этом отношении большое значение имели работы американских ученых, которые применили иной методический подход к изучению полного гранулометрического спектра алмазов на примере кимберлитов штата Вайоминг (McCallum et al., 1979). Из нескольких проб массой от 23 до 46 кг им удалось полностью извлечь все алмазы. С этой целью была применена методика, исключающая операцию механического дробления и рассчитанная на минимальные потери кристаллов независимо от их крупности. В частности, материал исходных выветрелых кимберлитов был просеян на грохоте с диаметром ячеек 3,3 мм. Отсеванный более крупный материал просмотрен на алмазы, которые не были обнаружены. Мелкообломочный материал кимберлитов обогащен на наклонном шлюзе с нарифляциями с получением концентратов массой около 3 кг. Концентраты затем были растворены в 52%-ной плавиковой кислоте в течение 2–4 недель до полного разложения силикатных минералов. Остаток после кислотной обработки составил около 200–400 г. Дальнейшая доводка остатка проведена с применением магнитного сепаратора Франца, что позволило освободиться от ферро- и парамагнитных минералов (хромшпинелидов, ильменита, магнетита, гетита, гематита). Из полученного остатка зерна алмазов извлечены под бинокулярным микроскопом.

Таблица 4

Размерность кристаллов алмазов в петрографических разностях кимберлитов трубы Удачная (по Барашкову, Алтуховой, 2005)

№ пробы	Масса пробы, кг	Масса алмазов, мг	Число алмазов	Средняя масса, мг	4–2 мм		2–1 мм		1–0,5 мм		0,5–0,2 мм	
					мг	шт.	мг	шт.	мг	шт.	мг	шт.
Трубка Удачная-Западная												
45*	917	391,6	53	7,4	-	-	62,0	11	31,0	41	-	-
43	316	62,0	43	1,4	-	-	43,8	6	16,0	21	2,2	16
44	142	199,7	91	2,2	101,0	1	60,4	13	34,6	55	3,7	22
42	748	195,6	137	1,4	-	-	128,6	24	64,2	96	2,8	17
47	655	133,0	97	1,4	20,2	1	68,8	11	38,2	53	5,8	32
40	893	224,2	70	3,2	115,4	1	64,6	7	44,0	60	0,2	2
46	977	301,4	109	2,8	158,0	4	74,2	18	68,2	79	1,0	9
41	801	394,8	165	2,4	185,0	6	108,2	24	99,8	124	1,8	11
48	383	154,6	95	1,6	56,8	1	51,0	12	43,4	62	3,4	20
49	521	180,1	99	1,8	46,2	2	78,4	12	54,6	76	0,9	9
Трубка Удачная-Восточная												
50	978	444,0	307	1,5	134,4	3	174,4	35	119,6	170	15,6	99
51	931	281,8	151	1,9	95,4	4	98,6	27	85,2	104	2,6	16
52	970	333,2	141	2,4	145,0	2	112,6	22	73,6	103	2,0	14
54	519	135,8	76	1,8	28,2	1	66,8	11	40,0	58	0,8	6

* В этой пробе найден 1 алмаз в классе 8–4 мм массой 298,6 мг.

Средний гранулометрический состав выделенных из всех проб зерен алмазов приведен в табл. 5. Авторами данной статьи получен вывод о существенном преобладании в кимберлитах кристаллов алмаза размером менее 1 мм (почти 70% общего их количества). Однако надежность этих выводов была недостаточно высокой из-за малой выборки зерен алмазов, что обусловлено небольшой суммарной массой обогащенных кимберлитовых пород.

Наиболее широкий гранулометрический спектр кимберлитовых алмазов (от 0,15 мм и крупнее) изучен на примере относительно недавно открытых трубок Канады (James, 1993). В отличие от аналогичных работ американских исследователей, были обработаны пробы значительно большей массы (от 200 до 400 кг) и при этом применена наиболее современная методика извлечения мелких алмазов, о чем можно судить по числу их находок.

Полученные результаты показали присутствие в кимберлитах значительного количества микрокристаллов алмазов размером менее 0,3 мм (табл. 6). При этом последние абсолютно преобладают по количеству (68–80%), а доля частиц алмаза размером менее 0,2 мм составляет примерно половину общего числа находок. Характерно, что общее число находок алмазов размером менее 1 мм в расчете на 100 кг породы составляет от 300 до 700.

Таблица 5
Гранулометрический состав алмазов из кимберлитов
штата Вайоминг (по McCallum et al., 1979), %

Показатель	Классы в мм						Всего
	>2	2–1,5	1,5–1,0	1,0–0,5	0,5–0,3	<0,3	
Число зерен	2	7	15	22	22	10	78
%	2,6	9,0	19,2	28,2	28,2	12,8	100

Таблица 6
Гранулометрический состав алмазов кимберлитов Канады
(по James, 1993), %

Трубка	Масса пробы, кг	Число алмазов	Классы, мм								
			>2,36	2,36–1,70	1,70–1,18	1,18–0,85	0,85–0,60	0,60–0,42	0,42–0,30	0,30–0,21	0,21–0,15
PST003	195,9	1376	-	0,07	0,22	1,31	2,33	5,38	14,97	26,89	48,83
Notch	397,6	1633	-	0,06	0,12	0,86	2,20	4,96	12,06	26,15	53,59
Jigsaw	327,0	962	-	-	0,21	0,73	2,60	7,69	15,90	27,03	45,84
Kahuna	203,8	909	0,11	-	0,33	0,88	3,63	8,25	18,81	27,39	40,60

Полученные для кимберлитов Канады данные по мелким алмазам, по-видимому, являются уникальными. В частности, в кимберлитах Якутской кимберлитовой провинции их заметно меньше. Помимо приведенных выше результатов, представление о встречаемости алмазов размером менее 0,5 мм дали специальные исследования кимберлитов трубы Ботуобинская (Якутская кимберлитовая провинция) с применением химического разложения проб. Они показали, что доля алмазов размером менее 0,5 мм составила порядка 70% относительно количества кристаллов размером более 1 мм (Граханов и др., 2007).

Конечно, при оценке гранулометрического состава алмазов кимберлитов необходимо все же учитывать возможность их растрескивания и раздробления не только в промышленных технологических процессах извлечения алмазов, в частности в ходе дробления, но и в лабораторных условиях. Например, образование псевдотетраэдрических форм алмазов из октаэдрических установлено при дроблении проб кимберлитов. Однако они легко узнаются по морфологии осколков, на которых сохраняются фрагменты граней октаэдра и присутствуют ровные поверхности сколов, соответствующие плоскостям спайности (Квасница и др., 1999).

В общих чертах гранулометрический состав лампроитовых алмазов такой же, как и кимберлитовых. Для тех и других в целом характерна однодальняя кривая распределения алмазов по крупности с преобладанием кристаллов (по массе) в классе 2–1 мм. В пределах этого класса мода для лампроитовых алмазов несколько смещена в сторону мелкой размерности. Однако в тех и других по количеству преобладают мелкие кристаллы.

При изучении гранулометрического спектра алмазов лампроитовой трубы Аргайл-1 (Австралия) с применением математических методов обработки результатов было установлено, что в мелкоразмерной части гранулометрического спектра распределение соответствует логнормальной популяции, в то время как распределение крупноразмерной части соответствует более сложной степенной функции (Deakin, Boxer, 1989; Rombouts, 1994; Chapman, Boxer, 2004). Тем самым было установлено, что распределение по крупности частиц мелких алмазов подчиняется тем же законам, которые контролируют аналогичное распределение многих россыпебобразующих минералов.

Рядом ученых дано теоретическое объяснение того факта, что в кимберлитах и лампроитах мелкие алмазы преобладают над крупными. Указываются две причины, одна из которых имеет всеобщее значение и отражает особенности кристаллизации вещества из расплава. В частности, в процессе роста минерала состав питающего раствора, окружающего растущий кристалл, периодически обедняется минералообразующим компонентом (в данном случае углеродом). В таких условиях гораздо легче сформироваться нескольким мелким кристаллам, чем одному крупному.

Вторая причина заключается в постепенном растворении крупных кристаллов по мере их перемещения из мантии к поверхности. В процессе мед-

ленного продвижения вверх с постоянными остановками кристаллы алмаза на долгое время попадают в среду, агрессивную по отношению к ним. В таких условиях происходит окисление алмазов под воздействием кислорода. На первом этапе данный процесс приводит к приобретению ими округлой додекаэдрической формы (додекаэдроид) из исходной октаэдрической. При этом рассчитанная потеря массы составит около 45%. Если этот процесс происходит слишком медленно, то кристаллы алмаза могут полностью раствориться.

В то же время установлено, что микроалмазы содержат те же включения, что и макрокристаллы, а также имеют аналогичные содержания азота. Эти признаки свидетельствуют об одновременном их образовании. Кроме того, следует учитывать возможность многократного повторения благоприятных условий для образования алмазов в мантии и формирования нескольких генераций кристаллов в одном и том же месторождении (Richardson et al., 1993; Howard, Hanson, 2008).

1.2. Гранулометрический состав россыпных алмазов

Приведенные выше результаты специальных исследований доказывают, что при размыве кимберлитовых тел водотоками в терригенные осадки поступает значительное количество мелких зерен алмазов. Учитывая их исключительно высокую миграционную способность, абразивную прочность и устойчивость к агентам химического выветривания, можно предположить существование протяженного ореола распространения зерен мелких алмазов от кимберлитового тела в направлении течения палеопотока. Он представляет собой своеобразную «алмазную дорожку» к кимберлитам, которую нужно научиться прослеживать.

Характерно, что для россыпей ближнего сноса гранулометрический состав алмазов весьма близок к таковому коренных источников. Примером может служить юрская Нюбинская россыпь, непосредственно примыкающая к одноименной кимберлитовой трубке (Средне-Мархинский алмазоносный район Якутской кимберлитовой провинции). В данной трубке на долю алмазов фракции 1–0,5 мм в среднем приходится 71%, а в россыпи – 67,5% (Граханов, Неустроев, 2009).

В составе алмазов Ботубинской россыпи (дяхтарская толща, выполняющая карстовую воронку) количественная доля кристаллов размером 1–0,5 мм составляет 77,9% (при массовой доле 27,0%). Примерно такой же гранулометрический состав алмазов типичен для некоторых участков россыпей ближнего сноса Приленского района, приуроченных к карнийским базальным конгломератам, в частности на участке Таас-Ары. Здесь массовая доля алмазов класса 1–0,5 мм составляет 32,8%. Очень характерны мелкие алмазы для россыпей Ганы, в которых даже по массе на долю алмазов крупностью менее 0,5 мм в среднем приходится около 20% (Подчасов и др., 2005).

При удалении от коренного источника деятельность русловых потоков приводит к повышению зрелости аллювия. Из совокупности кимберлитовых алмазов постепенно вымываются более мелкие индивиды, за счет чего происходит увеличение среднего размера зерна и степени сортировки россыпных алмазов по крупности. В большинстве аллювиальных россыпей модальными классами становятся 8–4 или 4–2 мм. Достаточно высокий уровень сортировки алмазов по крупности особенно наглядно подтверждается с применением дробной гранулометрической шкалы при рассеве алмазов по размерным классам (табл. 7).

В россыпи Восточная, приуроченной к каменноугольным отложениям территории Малоботубинского района Якутской алмазоносной провинции, доля алмазов (по числу кристаллов) класса 1–0,5 мм колеблется в пределах 7–12%, юрской россыпи р. Солур – 13%, четвертичных террасовых россыпях рек Ирелях и Малой Ботуобии – 14–19%. Массовая доля таких алмазов, как правило, невелика (обычно менее 1%) (Подчасов и др., 2005). Отсюда извлечение мелких алмазов при разработке россыпей становится неактуальным, и при разведке в лучшем случае алмазы устанавливаются только в классе 1–0,5 мм.

Таблица 7

**Гранулометрический состав алмазов россыпей дальнего сноса
Кот-Дивуара по данным дробного гранулометрического анализа
(по Strack, 1975), %**

Россыпь	Класс, мм								
	6,3– 5,0	5,0– 4,0	4,0– 3,15	3,15– 2,5	2,5– 2,0	2,0– 1,6	1,6– 1,25	1,25– –1,0	<1,0
Тортия	0,1 1,2	0,3 2,6	2,6 13,0	7,5 20,4	13,7 22,5	23,1 20,1	26,3 14,0	7,7 2,6	18,7 3,6
Сегела	0 0	8,2 27,1	10,9 21,8	27,7 29,7	25,5 14,9	10,3 3,6	12,5 2,4	4,9 0,5	0 0

Примечание: в числителе – по числу кристаллов, в знаменателе – по массе.

Результаты исследований гранулометрического состава аллювиальных алмазов показали, что с удалением от трубки Мир доля кристаллов размером 1–0,5 мм постепенно снижается, за счет чего возрастает доля алмазов размером 2–1 и 4–2 мм (Граханов и др., 2007). Однако миграционная способность последних несколько ограничена. Поэтому при постепенном удалении от кимберлитовой трубки из переносимого вниз по течению обломочного материала выпадают кристаллы размером более 1 мм. В гранулометрическом спектре алмазов класс 1–0,5 мм снова становится преобладающим, но роль процессов разубоживания здесь столь значительна, что образующиеся россыпепроявления уже не имеют промышленного значения (табл. 8).

Таблица 8

Гранулометрический состав алмазов в аллювии рек с удалением от трубки Мир, % (по Граханову и др., 2007)

Участок	К л а с с, м м				Средняя масса, мг
	8–4	4–2	2–1	1–0,5	
Р. Ирелях ниже трубы Мир	0,51	9,68	31,92	57,89	9,70
Устье р. Ирелях	3,36	27,95	39,48	29,15	27,50
Р. Малая Ботубия ниже устья р. Ирелях	1,2	22,7	50,8	25,3	23,18
Р. Малая Ботубия до р. Кюелях	2,66	30,25	46,43	20,66	24,52
Р. Малая Ботубия до р. Дьегус	2,7	18,41	58,68	20,21	16,51
Р. Малая Ботубия до р. Сосновки	3,33	16,67	60,0	20,0	15,63
Устье р. Малой Ботубии	1,23	12,75	71,97	14,05	11,94
Р. Вилюй ниже р. Малой Ботубии, в 225 км от трубы Мир	3,59	31,74	35,33	29,34	23,31
Р. Вилюй, коса в 490 км от трубы Мир	1,2	24,4	67,1	7,3	10,8
Р. Вилюй, коса в 500 км от трубы Мир	-	11,0	75,0	14,0	Н.д.
Р. Вилюй, коса в 520 км от трубы Мир	0,36	15,8	30,3	55,5	8,3

В россыпях, существенно удаленных от коренных источников и образованных в результате многократной сортировки обломочного материала на разных уровнях эрозионного среза, доля мелких классов алмаза существенно снижается. В частности, это отчетливо проявляется для россыпей в промежуточных коллекторах алмаза. Примером могут служить россыпи карнийского возраста (триас) одного из районов на северо-востоке Сибирской платформы, в которых доля алмазов размером менее 1 мм составляет от 5,1 до 12,0% (по числу находок). Однако их доля, рассчитанная по массе алмазов в классах крупности, снижается до 0,2–0,6% (Граханов и др., 2009).

Вероятно, определенное значение имеет соотношение размеров алмазов в пределах той части гранулометрического спектра, которая относится к песчаной фракции (т.е. менее 1 мм). Например, в кимберлитах отмечается два противоположных варианта распределения мелких зерен алмазов по крупности: последовательное уменьшение доли более мелких зерен (см. табл. 4, 5) и, наоборот, повышение этой доли (см. табл. 6). Для россыпных алмазов такие данные можно привести для месторождений западного склона Урала (Лунев, Осовецкий, 1996). Среди находок мелких алмазов здесь преобладает класс 0,25–0,1 мм (свыше 40% общего количества кристаллов). На долю алмазов размером крупнее 0,25 мм приходится только около 30%.

Глава II. МОРФОЛОГИЯ МЕЛКИХ АЛМАЗОВ

2.1. Космогенные алмазы

Все алмазы, обнаруженные в метеоритах, по размерности относятся к весьма мелким. Обычно их размеры исчисляются микронами. В настоящее время алмазы обнаружены и детально изучены в нескольких типах метеоритов: углистых хондритах (Альянде, Мурчисон), железных метеоритах (Каньон Диабло) и уреилитах (Ново Уреи).

Космогенные алмазы, прежде всего, характерны для примитивных хондритов. Здесь они представляют собой «досолнечное» вещество. Для них типична ассоциация с различными минеральными видами карбидов: карбидами кремния (муассанит) SiC, вольфрама WC, циркония ZrC и титана TiC. Они имеют зернистую структуру, составляющие их индивиды измеряются нанометрами (обычно 2–5 нм) и до нескольких миллиметров, не содержат лондейлитовой фазы, сложены черными (типа баллас) или прозрачными кристаллитами.

Наноалмазы в хондритах имеют значения $\delta^{13}\text{C}$ от -32,5 до -38,8 ‰, что соответствует «солнечному» составу. При этом имеются данные о том, что хотя бы некоторые метеоритные наноалмазы имеют «досолнечное» происхождение (например, геохимические аномалии ксенона и теллура). Измерение величины зерен алмазов дает значения от 0,1 до 10 нм с медианой от 2,58 до 2,84 нм для двух известных метеоритов. Содержание этих алмазов достигает 1400 ppm. Характерно, что все сопутствующие алмазам «досолнечные» минералы значительно крупнее. Предложено множество гипотез о происхождении метеоритных наноалмазов: конденсация в условиях низкого давления, ударный метаморфизм частиц графита или аморфного углерода, ультрафиолетовая радиация и др. (Bernatowicz et al., 2006).

Заметно отличаются от хондритовых алмазов разновидности, которые в большом количестве обнаружены в уреилитах. Здесь нередко образуются более крупные по размерам поликристаллические сростки и агрегаты размером в несколько микрон. Отдельные выделения представлены кубооктаэдрическими кристаллами, которые располагаются в интерстициях между зернами оливина вместе с графитом и камаситом. Считается, что генезис этих алмазов связан с воздействием флюидов (Маракушев, 1998; Кудрявцева и др., 2005).

Уреилиты представляют собой наиболее богатые углеродом (до 6 мас.%) оливин-пироксеновые разновидности примитивных ахондритовых метеоритов с прослойками углеродистого вещества в форме графита или микроалмазов. Среди них различают три группы: 1) оливин-пижонитовые, 2) оливин-ортопироксеновые и 3) полимиктовые (Weisberg et al., 2006).

Детальные исследования одного из образцов мономиктовой уреилитовой брекции, сложенной мелкозернистой матричной массой (около 75%) и зернами оливина (25%), показали присутствие в зонах, богатых углеродистыми фазами, микронных поликристаллических агрегатов наноразмерных частиц алмаза (диаметром в среднем около 40 нм). Самые мелкие из них измеряются единицами нанометров, наиболее крупные – несколько меньше чем 100 нм. При этом в агрегатах нанозерна алмаза обволакиваются тончайшими пленками графита. Рентгенофазовый анализ показал, что в агрегатах примерно 85% массы принадлежит алмазу, 5% – лонсдейлиту и 10% – графиту. В других местах нанозерна алмаза находятся в массе аморфного углерода. Все данные свидетельствуют в пользу гипотезы об образованииnanoалмазов из графита в результате сильного столкновения. При этом различие в составе газовых включений позволяет предположить существование в метеорите двух генераций nanoалмазов: образованных в результате аккреции солнечно-го вещества и последующих ударных воздействий с преобразованием графита. Существование пленок графита вокруг нанозерен алмаза объясняется по-следующим процессом графитизации алмаза под влиянием высокой темпе-ратуры или дестабилизацией алмаза после ударного воздействия (Guillou et al., 2010).

Два образца уреилитов с алмазами были исследованы сотрудниками технического университета г. Лодзи (Польша) с применением методов рамановской спектроскопии, электронной микроскопии, микрозондового анализа и катодолюминесценции (Karczemsc, 2010). Было установлено присутствие большого количества алмазов микронных размеров и их агрегатов в углеродистых прожилках, заполняющих пространство между зернами оливина и пироксенов. Наряду с ними найдены поликристаллические образования карбонадо, состоящие из микрозерен алмаза размером не более 20 мкм, с высо-кокристаллической структурой и включениями других минералов. Предполагается, что присутствие или отсутствие алмазов в уреилитах является показателем степени ударного воздействия.

Наноразмерные алмазы обнаружены, кроме того, в межзвездном про-странстве, космической пыли и кометах. Отсюда предполагается, что значи-

тельная часть микроалмазов космогенного происхождения может попадать на Землю не вместе с веществом метеоритов, а в составе космической пыли и вещества комет. Благодаря ничтожно малым размерам они разносятся воздушными потоками на большие расстояния, что исключает их концентрацию в маломощных слоях осадков. При разбраковке таких алмазов, которые могут быть похожи на импактные, необходимо учитывать их морфологические особенности, агрегатное строение, химический состав и структуру.

Несмотря на крайне малую вероятность попадания космогенных микроалмазов в природные осадки, тем не менее, в существующих зонах концентрации мелких алмазов (например, в «естественных» шлихах на побережьях морей) такие алмазы могут присутствовать. В частности, с этой возможностью столкнулись геологи, изучившие значительную по количеству находок коллекцию мелких алмазов на территории Украины. Применив современные методы разбраковки, они оценили долю космогенных микроалмазов в титаноциркониевых россыпях Среднего Приднестровья в 1% (Савко, Шевырев, 2005).

2.2. Импактные алмазы

Импактные алмазы, широко известные по данным изучения импактиков, метеоритов и россыпей, привлекли внимание исследователей в связи с необычными условиями образования, своеобразием строения и состава. Прежде всего алмазы ударного происхождения были обнаружены в железном метеорите Каньон Diablo (Ksanda, Henderson, 1939). Здесь они представляют собой мелкоразмерные черные зерна, ассоциирующиеся с графитом и располагающиеся в пределах развития зоны троилита. Всего обнаружено около 50 зерен размером от 0,1 до 0,9 мм. Характерными особенностями алмазов являются пористость и грубая слоистость.

Однако в последующем значительное их количество было найдено и в земных породах, подвергнутых сильному ударному воздействию. В частности, импактные алмазы образуются в момент удара метеоритов о земную поверхность и характерны для импактиков. С учетом морфологических особенностей, генезиса и строения они могут быть разделены на три группы: 1) апографитовые («сланцеватые»), 2) апоугольные («янтарные») и 3) «сахаровидные».

Апографитовые разности образуются в результате перекристаллизации чешуек графита, т.е. являются параморфозами по графиту. Они представлены уплощенными кристаллитами слоистого строения, в результате чего и получили название «сланцеватые» алмазы. Их сланцеватое строение обусловлено наследованием структуры исходных частиц графита, включая гексагональную форму его пластинчатых выделений. Изотопный состав характеризуется облегченным углеродом (значения $\delta^{13}\text{C}$ -13,5 и -14,3‰). Они полупрозрачны или непрозрачны, имеют матовый блеск, перламутровый отлив. Окраска зерен желто-бурая, серая, зеленовато-желтая. Частицы алмаза сильно деформи-

рованы, имеют полосы скольжения на поверхности. Твердость этих зерен часто выше, чем кимберлитовых алмазов. В кристаллической решетке обязательно присутствуют примеси гексагональной модификации углерода – лонсдейлита, а также графита. Данная разность импактных алмазов является наиболее распространенной в природе.

Апоугольные разности имеют коричневый или черный цвет, неправильную форму. Они образуются в результате замещения прослоек и кусочков угля в толще песчаника. В связи с малыми размерами зерен они часто полупрозрачны; интенсивность окраски снижается, чем они отчасти напоминают кусочки янтаря. Их отличают присутствие органического вещества, высокая пористость и зональное строение. Значения $\delta^{13}\text{C}$ изменяются от -21 до -31‰ .

«Сахаровидные» зерна алмаза, которые образуются за счет замещения прочих углеродистых скоплений, отличаются белой окраской, микроагрегатным строением, непрозрачностью и имеют пониженную плотность (до $3,3 \text{ г/см}^3$) в связи с наличием значительного количества пустот.

Таким образом, импактные алмазы являются полиминеральными образованиями, в составе которых в разных пропорциях обычно присутствуют три минеральных вида – алмаз, лонсдейлит и графит.

Гранулометрический состав импактных алмазов характеризуется различными соотношениями зерен преимущественно в интервале от $0,1$ до 1 мм (Кудрявцева и др., 2005). Однако в отдельных проявлениях присутствует повышенное количество более мелких зерен, а применение электронной микроскопии высокого разрешения позволяет обнаружить множество микро- и наночастиц.

Импактные алмазы изучены на территории Украины, в районе Попигайского кратера, описаны в россыпях Якутской и Уральской алмазоносных провинций, в Карелии и других районах Восточно-Европейской платформы (Полканов и др., 1973; Кvasница, 1985; Лунев, Осовецкий, 1996; Кvasница и др., 1999; Кудрявцева и др., 2005; Каменцев, 2009).

Детальные описания морфологии и состава импактных алмазов свидетельствуют о сложности процессов их образования и присутствии более редких необычных разностей. Например, среди морфологических разностей импактных алмазов Попигайского кратера, наряду с широко распространенными полупрозрачными серовато-белыми пластинчатой формы параморфозами по графиту из зюйвитов, выделены многие необычные типы, свидетельствующие о сложности их генезиса. Одним из таких типов являются зерна в белом стекловатом тагамите с выделениями тонкодисперсного графита по трещинам. Поликристаллические образования, в частности, представлены субмикроскопическими кристаллитами кубической формы, залегающими на поверхности непрозрачных черных параморфоз по графиту в виде изометрических бугорков. Особый интерес для изучения представляют агрегаты нанокристаллов размером менее $0,01 \text{ мкм}$ с отчетливо выраженной слоистой текстурой и присутствием гексагональной фазы углерода (лонсдейлита) в ко-

личестве до 30%. Наконец, присутствуют поликристаллические параморфозы серой и молочно-белой окраски размером более 1 мкм, имеющие зернистое строение и не содержащие лонсдейлита. Тем самым удалось установить существенные генетические различия импактных алмазов в брекчиях (зювитах) и стекловатых массивных тагамитах (Лупашко и др., 2006).

Импактные алмазы (тогориты) в большом количестве обнаружены в районе Карской астроблемы, расположенной на побережье Байдарацкой губы Карского моря. Они выявлены в аллювии бассейнов рек Кары, Анарги, Сибирчаты и Сопчау. Значительная часть их зерен приурочена к классу крупности 1–0,5 мм, хотя обнаружены и более крупные – до 4 мм. При анализе электронных микрофотографий выявляются характерные признаки их морфологии: присутствие остатков импактных стекол на поверхности, неправильная форма осколков, мелкоячейчатый рельеф поверхности, наличие прожилков кварца, пористая поверхность, слоистая текстура и др. (Мальков, 2006).

Особенности образования импактных алмазов проявляются в наличии характерных форм поверхности зерен: коррозионных и деформационных скульптур, ячеистых и кавернозных дефектов, каналов травления и т.д. Характерны гребенчатые и складчатые микроскульптуры рельефа поверхности, развитие поверхностей скольжения и т.п. (Кудрявцева и др., 2005).

Изучение импактных алмазов позволяет полнее представить механизм процессов ударного метаморфизма, обусловленных падением крупных метеоритов на земную поверхность. Особенно ценные результаты получены на основе использования комплексных методов исследования, включая методы электронной микроскопии. В частности, большое внимание было уделено детальному изучению одной из находок микрокристалла алмаза в обогащенном иридием пограничном слое (мел – палеоген) на территории Израиля. Формирование данного слоя сопоставляется с катастрофическим событием, связанным с гибелью динозавров и существенной перестройкой флоры и фауны на земном шаре. Позднее аналогичные находки импактных микроалмазов также в пограничном слое на контакте меловых и палеогеновых пород были сделаны на северо-востоке Италии (Kaminski et al., 2008). Микроалмазы были выделены из тяжелой фракции, полученной при фракционировании вещества фораминиферовых известняков. Карбонатный состав породы облегчил выделение из нее тяжелых минералов после растворения в соляной кислоте. Микроалмазы имели размер около 2 мкм. Они сопровождались микрозернами алюмосиликатных фаз с марганцем, медью, кобальтом, никелем и серой. Высокое значение индикаторного соотношения Co/Ni позволило предположить образование фаз в результате ударного метаморфизма.

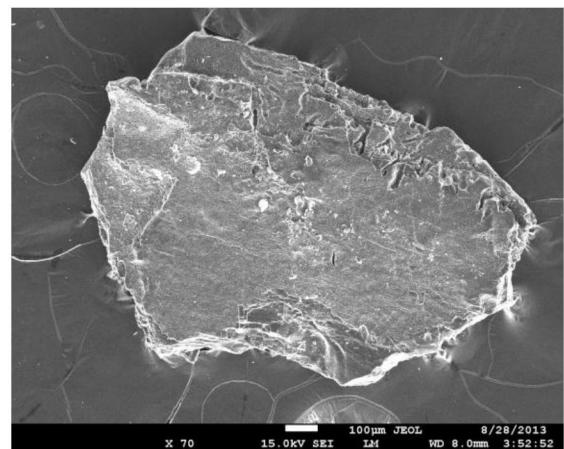
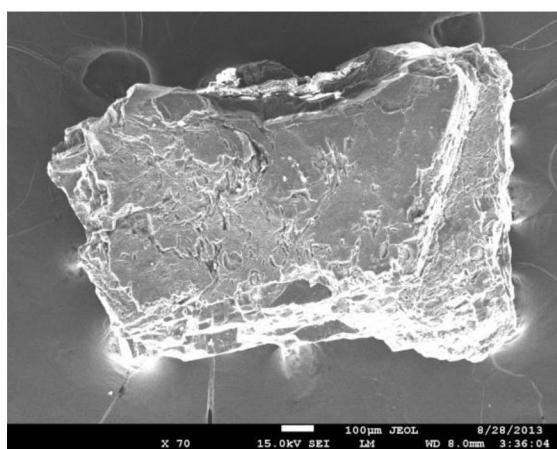
Выполненные разными учеными электронно-микроскопические исследования особенностей поверхности импактных алмазов позволили выявить ряд характерных деталей, указывающих на специфику их роста. В частности, на поверхности отчетливо проявляется поликристаллическое строение зерен, заключающееся в сочетании большого количества кристаллитов микронных

размеров удлиненной или эллипсовидной формы. Иногда последние разделяются относительно однородной массой кристаллического углерода. На поверхности выявлена субпараллельная штриховка и присутствие изогнутых полос. С использованием метода реплик удалось обнаружить присутствие «микронных и субмикронных бугорков ... кубической, кубооктаэдрической и октаэдрической формы», которые рассматриваются как «кристаллиты кубической фазы, погруженные в алмаз-лонгититовую матрицу» (Квасница и др., 1999; Кудрявцева и др., 2006).

Ниже представлены результаты собственных исследований авторов монографии по изучению деталей поверхности «сланцеватых» алмазов с применением методов высокоразрешающей электронной микроскопии. В качестве объекта изучения выбраны зерна импактных алмазов Попигайского кратера и россыпей Красновишерского района.

Наряду с общими особенностями (непрозрачность, темно-серая окраска, таблитчатая форма кристаллов, отчетливо выраженная сланцеватая текстура, неровная поверхность, сильная трещиноватость), импактные алмазы указанных районов исследования заметно отличаются по ряду характеристик.

В частности, попигайские «сланцеватые» алмазы значительно крупнее. В их гранулометрическом составе значительную роль играют зерна размером 1–0,25 мм, но встречаются и более крупные. В изученной нами выборке представлены разности размером 1–0,8 мм (рис. 1). Они характеризуются обычно остроугольными ограничениями зерен таблитчатого облика, тонкослоистым строением, дефектной поверхностью, присутствием многочисленных сколов.



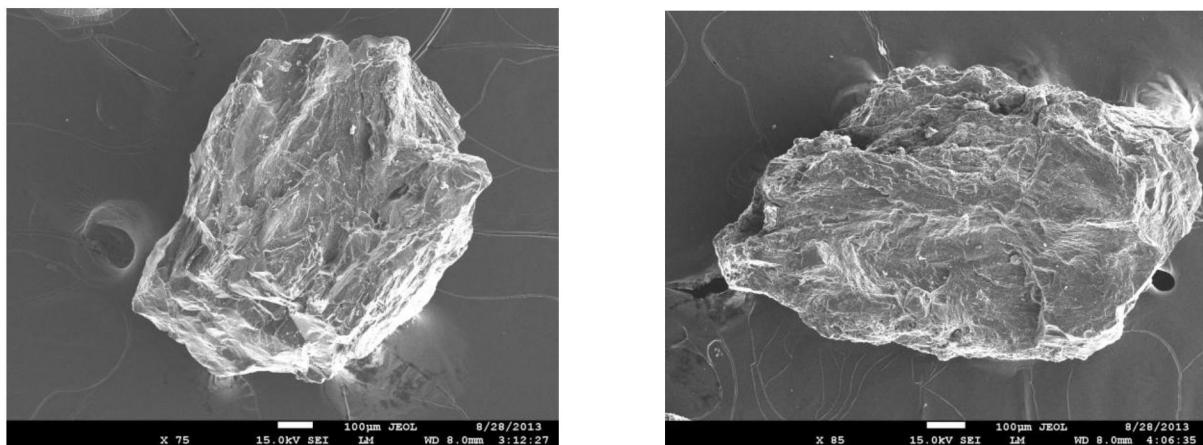
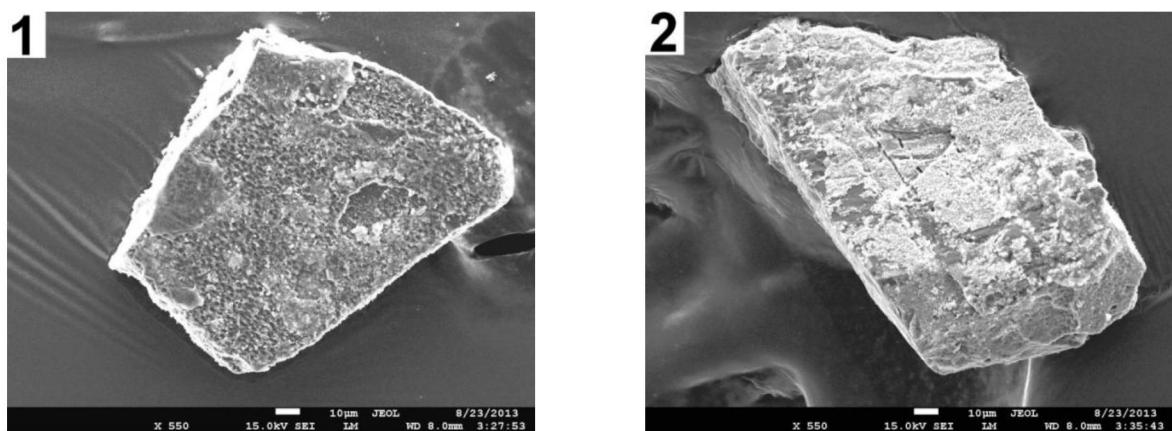


Рис. 1. Общий вид импактных алмазов Попигайского кратера.
Масштабная линейка – 100 мкм

Импактные алмазы уральских россыпей значительно мельче, чем попигайские. Это не согласуется с общеизвестным правилом, согласно которому алмазы россыпных объектов всегда крупнее, чем коренных, вследствие механической сортировки в водном потоке. По выборке, насчитывающей около 50 зерен, среди мелких алмазов уральских россыпей (размером менее 1 мм) «сланцеватые» разности присутствуют в основном в классе частиц размером менее 0,1 мм и особенно много зерен мельче 50 мкм. В качестве исключения обнаружено только одно зерно, имеющее в длину 0,75 мм. Наиболее распространены такие алмазы в бассейне р. Яйвы, где они составляют до 75% общего числа мелких алмазов. В среднем их доля для россыпей Красновишерского алмазоносного района составляет около 20% числа мелких алмазов (Лунев, Осовецкий, 1996). Высокая доля импактных микроалмазов (по количеству находок) в россыпях Красновишерского района и, особенно, в бассейне р. Яйвы в сочетании с большим количеством зерен муассанита явно указывает на присутствие здесь древней астроблемы, являвшейся их первоисточником (рис. 2).



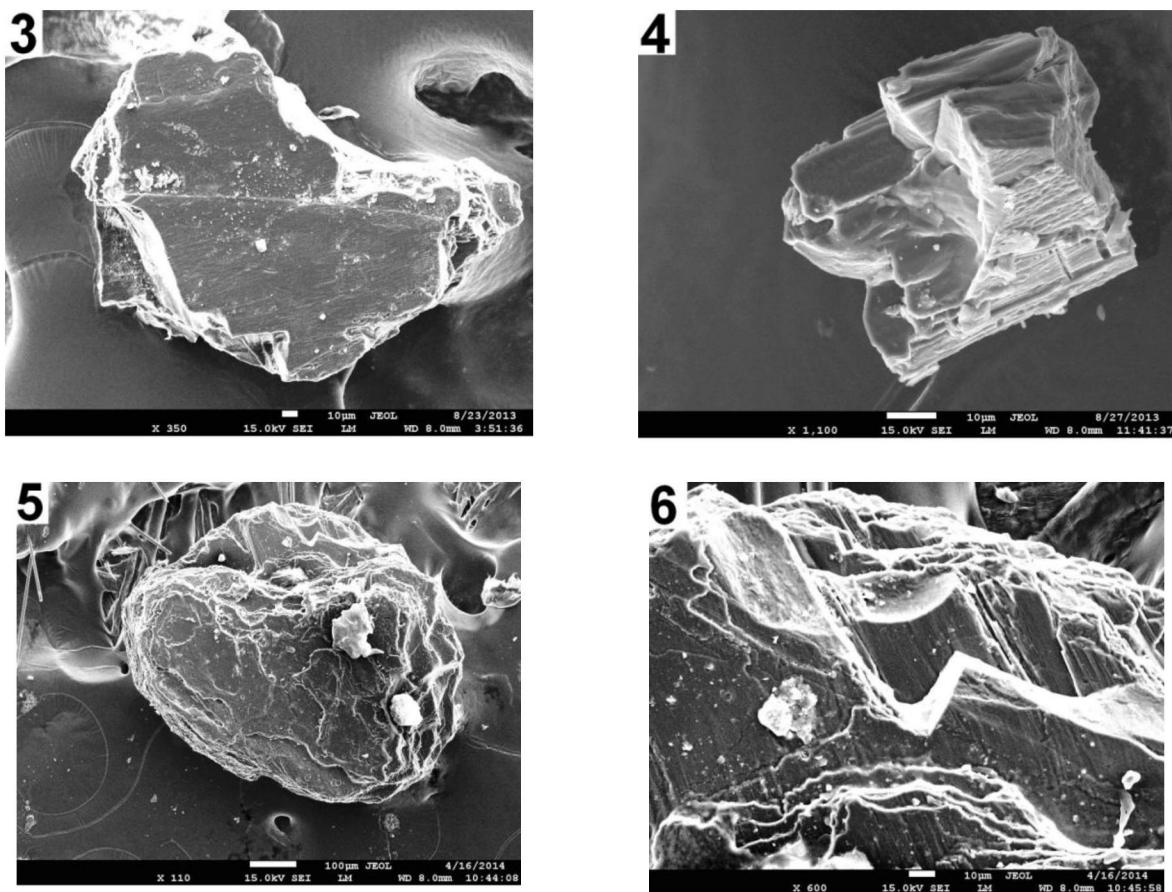


Рис. 2. Импактные алмазы россыпей Красновишерского района: 1 – сероватый, 2 – темно-серый, 3 – желтоватый; 4 – р. Волынка; 5 – р. Чикман, общий вид; 6 – то же, детали строения. Масштабная линейка: 5 – 100 мкм, остальные – 10 мкм

По морфологическим особенностям импактные алмазы уральских россыпей принципиально не отличаются от попигайских. Весьма малые размеры (толщина частиц нередко не превышает 10–20 мкм) указывают на интенсивное дробление в процессе переноса и значительное удаление от источника питания.

2.3. Коровые метаморфогенные алмазы

Присутствие микрозерен алмазов в метаморфических породах земной коры в настоящее время установлено на многих территориях мира (Казахстан, Китай, Норвегия, ФРГ, Индонезия, Украина, Урал и др.). Среди них Кумдыкольское месторождение, приуроченное к Кокчетавскому массиву, является наиболее изученным и единственным объектом данного генезиса с подсчитанными запасами технических алмазов. Сложность геологических позиций и вещественного состава алмазоносных пород, своеобразие морфологии и химического состава алмазов до сих пор вызывают споры по поводу условий их образования.

Концентрация алмазов в Кумдыкольском месторождении является наиболее высокой в мире и достигает 20–30 кар/т. Они представлены кубическими, кубооктаэдрическими, октаэдрическими, скелетными и сфероидаль-

ными мельчайшими кристалликами зонально-секториального строения с бугристой и черепитчатой поверхностью. Их типичной особенностью является неравномерная поверхностная графитизация, развивающаяся под влиянием процессов эпигенеза. Гранулометрический состав алмазов этого месторождения отличается преобладанием зерен размером менее 10 мкм (Кудрявцева и др., 2005). Однако их полный гранулометрический спектр довольно широкий, с присутствием частиц размером более 100 мкм.

Основным породообразующим минералом, внутри зерен которого находятся микрокристаллы алмаза, является гранат. Установлено, что морфология алмазов зависит от состава вмещающих пород. Так, в гранат-биотитовых гнейсах обычны кубоиды и кубооктаэдрические кристаллы, в клиноцизитовых – октаэдрические или двойниковые. В карбонатных породах алмазы присутствуют не только в зернах гранатов, но и в клинопироксенах и цирконах; здесь они представлены обычно скелетными кристаллами или кубоидами. В гранат-клинопироксеновых породах алмазы несколько крупнее (15–150 мкм) и представлены желтыми кубоидами (рис. 3).

Считается, что алмазы разной крупности были образованы под влиянием различных процессов. В частности, зерна размером от 1 до 50 мкм, распространенные в кварцево-полевошпатовых гнейсах, предположительно образовались из суперкритического углерод-водород-кислородного флюида. Наоборот, зерна крупностью от 50 до 300 мкм образовались из силикатного или карбонатного расплава.

Предложены две основные концепции их генезиса. Согласно корово-мантийной концепции основная роль в образовании алмазов отводится очень высокому давлению, обусловленному спецификой метаморфических процессов при субдукции коровых пород массива. В данных условиях кристаллизации большинство микрочастиц алмазов размером в единицы микрон было захвачено кристаллическими решетками зерен граната и циркона. Те же зерна алмаза, которые образовались позднее в свободном виде, в дальнейшем при смене термодинамических условий на регressiveной стадии метаморфизма были уничтожены (растворились).

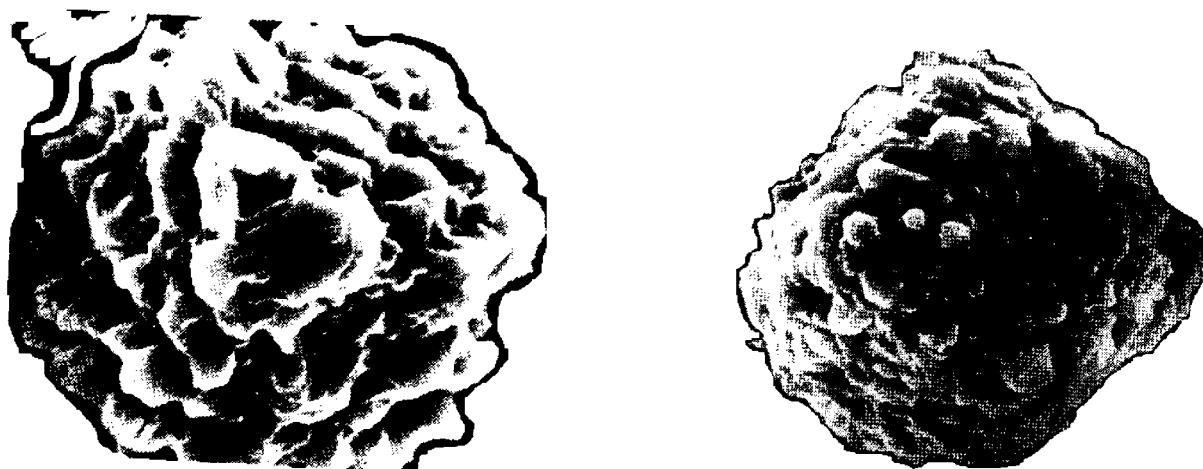


Рис. 3. Метаморфогенные алмазы Кумдыкольского месторождения. Размер кристаллов менее 0,045 мм (Лаврова и др., 1999)

Коровая (флюидно-метасоматическая) концепция основывается на гипотезе образования алмазов в зонах метасоматитов, образованных в результате взаимодействия мантийных углеродсодержащих флюидов, движущихся по зонам проницаемости, с боковыми породами. Условия образования таких алмазов связаны с относительно низкими температурами и давлением, что и объясняет ничтожно малые размеры зерен (Печников, 2008).

Другим богатым источником коровых микроалмазов являются породы массива Erzgebirge в Саксонии (ФРГ). В отличие от Кумдыкольского месторождения, здесь микроалмазы размером от 1 до 50 мкм локализованы только в кварцево-полевошпатовых гнейсах. Эти алмазы представляют собой прозрачные светло-коричневые с разными оттенками микровключения в зернах гранатов, дистена и циркона. По форме это кубические кристаллы или комбинации куба и октаэдра. Типичными поверхностными микроформами являются холмики и каналаобразные полости. Детальное изучение показало присутствие внутри алмазов наноразмерных кристаллических включений кремнезема и полостей с жидкими включениями, окруженных пленками графита (Dobrzhinskaya et al., 2006).

Микрозерна алмаза были обнаружены также в кристаллах гранатов, извлеченных из гнейсов эклогитовой фации метаморфизма в Максютовском метаморфическом комплексе Южного Урала. Данный комплекс ультравысокого давления является частью палеозойской Урало-Монгольской складчатой системы. Комплекс сложен эклогитовыми слюдистыми сланцами, метаофиолитами, кварцитами, соответствующими разным фациям метаморфизма (эклогитовой, зеленосланцевой и голубых сланцев). Микроалмазы имели размеры 2–3 мкм. Детальные их исследования с применением методов высокоразрешающей электронной микроскопии показали, что в действительности они представляют собой микрокристаллические агрегаты нанокристаллов, образовавшихся в результате неполной кристаллизации алмаза из углеродистого субстрата. Размеры нанокристаллов алмаза в таких агрегатах обычно составляют 20–50 нм (Bostick et al., 2003).

Коровые алмазы обнаружены практически во всех прибрежно-морских титаноциркониевых россыпях территории Украины, детально опробованных на мелкие алмазы. Доля алмазов корового происхождения в этих россыпях в среднем оценивается в 24% общего числа находок мелких алмазов (Савко, Шевырев, 2005). Например, в титаноциркониевой Обуховской россыпи они имеют размеры зерен 0,07–0,2 мм и характеризуются преимущественно кубической формой.

2.4. Морфологические особенности мелких алмазов кимберлитов

Мелкие зерна алмазов в кимберлитах отличаются значительным разнообразием. Это относится, прежде всего, к их габитусу. Среди мелких кри-

сталлов алмазов обычно преобладают октаэдры, додекаэдроиды и ромбодекаэдры. В подчиненном количестве присутствуют переходные между ними формы, а также кубы, поликристаллические сростки и бесформенные индивиды (Квасница и др., 1999). Отмечено различие морфологических типов микрокристаллов алмаза в разных кимберлитовых трубках.

Характерной особенностью морфологии многих микрокристаллов алмаза является весьма сложная комбинация простых форм с габитусной формой, соответствующей гладкогранному октаэдру. Отмечено существенное искажение сложных форм с заметным уплощением вдоль одной из тройных осей симметрии. Нередко присутствуют двойники по шпинелевому закону. Сложная полиэдрическая конфигурация мелких алмазов, вероятно, отражает специфические начальные условия их роста в мантии (Квасница и др., 1999).

Процессы образования сложных по морфологии мелких кристаллов алмаза не до конца исследованы. Считается, что образующие их грани принадлежат разным генерациям. Грани с ровными и гладкими поверхностями предположительно формировались в нормальных условиях роста. При наличии на них признаков т.н. граней торможения их относят к пассивно ростовым формам. Те же, которые обладают несовершенными поверхностями (округлыми, шероховатыми, с фигурами растворения), относят к граням неясного происхождения. Несомненно, что присутствие разных типов граней, осложняющих октаэдрические, является признаком изменения внешних условий среды кристаллизации или последующего пребывания в захороненном состоянии с агрессивной средой. Имеются признаки, свидетельствующие о том, что сложная форма мелких алмазов является результатом образования на них большого количества быстрорастущих граней. Последние при более длительном росте с образованием кристаллов промышленных размеров постепенно исчезают (Квасница и др., 1999).

При изучении коллекции мелких кристаллов алмаза из кимберлитов месторожденияトイ-Доу-Гоу (Китай) А.В.Макеевым и др. (2006) отмечено присутствие, наряду с плоскогранными, кривогранными (октаэдроидов и тетрагексаэдроидов) и комбинационных форм, а также многочисленных двойников. Ими сделан вывод о том, что соотношение морфологических типов кристаллов алмаза в изученных кимберлитах не меняется с уменьшением их размеров. На поверхности мелких алмазов сохранились примазки вторичных минералов кимберлитов (хлорита, серпентина, кальцита, доломита, сидерита, анкерита, барита и др.), в то же время из минералов другого генезиса установлены коэсит, гиперстен, рутил, слюда, амфибол, а также металлические фазы в составе пленок.

Одним из характерных процессов, протекающих в мантии и сильно влияющих на морфологию мелких алмазов, является растворение. Большинство ученых считает, что основным признаком растворения является образование криволинейных поверхностей вместо гладкогранных. При этом на поверхности образуются характерные бугорки, которые относят к регенерационным формам.

Типичным признаком травления является совместное появление на гранях октаэдра прямо- и обратнопараллельных треугольных и иногда шестиугольных впадин. Доказано, что изменение ориентации треугольных впадин относительно контура грани октаэдра происходит в результате смены температуры и фугитивности кислорода (Квасница и др., 1999).

Присутствие большого количества кристаллов алмаза с признаками природного растворения отмечено, например, в трубке Юбилейная (Якутская алмазоносная провинция) (Егоров и др., 2006). Такие признаки здесь особенно характерны для граней мелких кристаллов алмазов.

Отражением других особенностей роста мелких кристаллов алмаза в мантийных условиях является тонкая слоистость, хорошо заметная при наблюдении в сканирующем электронном микроскопе. Характерными микроскульптурными формами на гранях являются также черепитчато-шестоватые узоры, каплевидные холмики, трещины, микросколы по плоскостям спайности, сноповидная штриховка, каверны и др.

Плоскогранные микро- и наноалмазы рассматриваются некоторыми учеными как две отдельные генерации мантийных алмазов, кристаллизовавшиеся позднее крупных, в т.ч. непосредственно перед внедрением диатремы (особенно наноалмазы). Присутствие нескольких генераций предполагается и среди более крупных индивидов. Например, округлые мантийные макроалмазы представляют собой более древнюю генерацию, в отличие от поздней генерации плоскогранных мантийных алмазов (Ларченко и др., 2005).

В некоторых работах рассмотрены морфологические особенности мелких алмазов разного размера в кимберлитах. Например, в целом среди алмазов мелких классов кимберлитов Архангельской алмазоносной провинции преобладают октаэдры, их шпинелевые двойники и сростки, в подчиненном количестве присутствуют округлые кристаллы додекаэдрического габитуса и осколки. Более редкими в мелких классах являются находки «оболочечных» алмазов. На сколовых поверхностях этих алмазов отчетливо проявляются различия центральной части и внешней оболочки. Например, видна интенсивно окрашенная в желто-зеленый или желтый цвета мутная оболочка, окружающая бесцветное прозрачное ядро. При этом октаэдрические алмазы с зеркально-гладкими гранями и прямыми ребрами характерны для класса –0,2 мм, а со слоисто-ступенчатым строением граней – класса 0,5–0,2 мм. Среди последних часто находятся удлиненные или уплощенные по одной или двум осям симметрии разности. Исключительно редки кристаллы с полицентрическим строением граней. Очень характерны также двойники по шпинелевому закону и параллельные сростки.

В данной провинции алмазы размером менее 0,5 мм имеют явно мантийное происхождение. Об этом свидетельствуют, в частности, ультраосновной состав микровключений и изотопный состав углерода. Они могут рассматриваться как одна из наиболее ранних генераций мантийных алмазов. При этом мелкие размеры кристаллов данной генерации можно объяснить сравнительно узкими рамками времени их формирования.

Очень слабоизученной до настоящего времени является генерация наиболее мелких микроалмазов. В частности, в кимберлитах Архангельской провинции к ней относится совокупность плоскограных кристаллов групп 1 и 2 по классификации З.В. Бартошинского с совершенной внутренней структурой и признаками послойного роста. Их размеры нередко составляют величину порядка нескольких микронов. Возможно, данная генерация отражает условия кристаллизации непосредственно перед прорывом магмы из очага (Ларченко и др. 2005).

Сравнительная характеристика морфологии мелких алмазов из разных кимберлитовых тел свидетельствует о их большом разнообразии. Так, в классе 1–0,5 мм среди алмазов трубы Нюрбинская увеличивается доля ламинарных ромбододекаэдров, типичных округлых алмазов и бесформенных осколков. В то же время среди алмазов этого класса отмечено минимальное содержание индивидов с признаками травления (Зинчук и др., 2005).

В кимберлитовой трубке Пионерская (Архангельская кимберлитовая провинция) среди алмазов класса –0,5 мм преобладают кристаллы ромбододекаэдрического габитуса. В некоторых разностях кимберлитовых пород, особенно глубоких горизонтов, существенно преобладают алмазы размером менее 1 мм. Среди них присутствуют микрокристаллы октаэдрического габитуса с плоскогранными острореберными октаэдрами, двойники и сростки (нередко типа «борт»), обломки неправильной формы и своеобразные коробчатые скелетные. Присутствие среди них микрокристаллических зародышей размером менее 20 мкм свидетельствует о полистадийном образовании алмазов, смене условий растворения и роста. Кривогранные поверхности покрыты оболочкой. В трубке Карпинского-1 при переходе от крупных (более 5 мм) к мелким (менее 1 мм) классам количество плоскограных и плоскогранно-кривограных октаэдров значительно увеличивается, а додекаэдроидов – уменьшается почти в два раза, в то время как количество кубов увеличивается (Веричев и др., 2005).

С другой стороны, среди микрокристаллов алмаза из кимберлитов трубы имени Гриба не установлены кристаллы коробчатой и скелетной форм, которые характерны для микрокристаллов трубы Пионерская. Преобладают октаэдрические кристаллы, встречены алмазы комбинационной формы с гранями октаэдра и додекаэдроида. Поверхность кристаллов в большинстве случаев гладкая, сглажены и вершины; на ребрах развита тонкая штриховка, возникновение которой возможно как при росте, так и при растворении кристалла. В обеих трубках обнаружены алмазы второй генерации размером около 200 мкм, вероятно, кимберлитового происхождения, и практически все они представляют собой гладкогранные октаэдры. Присутствуют поликристаллические сростки, состоящие из нескольких хорошо ограниченных кристаллов, и микрозернистый тип «борт». Поверхность кристаллов не подвергалась интенсивной коррозии (Веричев и др., 2005).

Определенные искажения в представление об истинной морфологии мелких алмазов кимберлитов вносит эффект их дробления, связанный с не-

обходимостью дезинтеграции вещества кимберлита перед обогащением на отсадочных машинах. Например, при изучении алмазов трубки Гриба было отмечено, что в основном микрокристаллы здесь представлены техногенными осколками и обломками более крупных кристаллов (Веричев и др., 2005). Техногенные осколки не имеют правильных кристаллографических очертаний, характеризуются вытянутой, округлой, прямоугольной формами с гладкими или ребристо-ступенчатыми поверхностями скола и заостренными ребрами скола.

Ниже приводится описание основных морфологических типов мелких кристаллов алмаза кимберлитов на основе анализа литературных источников и собственных материалов, основанных на применении методов электронной микроскопии.

2.4.1. Алмазы октаэдрического габитуса

Из многочисленных морфологических разностей алмазов наиболее важны результаты изучения особенностей октаэдрических монокристаллов и их срастаний. Причиной является тот факт, что данная форма является преобладающей среди мелких алмазов в кимберлитах (Квасница и др., 1999; Шкодзинский, 2006). Кроме того, преобладание октаэдрических кристаллов типично для высокоалмазоносных кимберлитов, что имеет важное прогнозное значение.

В составе популяции мелких алмазов октаэдры являются наиболее крупными по размерам. По-видимому, в основной своей массе они являются мелкоразмерной частью соответствующей популяции более крупных кристаллов. Нами, к примеру, наиболее детально изучен гранулометрический состав собственно мелких алмазов Красновишерского алмазоносного района, кимберлитовое происхождение которых является наиболее вероятным. Здесь размеры октаэдрических кристаллов колеблются в пределах 0,7–0,15 мм, но заметно преобладают индивиды крупнее 0,3 мм.

Несмотря на присутствие в них только одной простой формы, морфологические типы октаэдрических алмазов чрезвычайно разнообразны. В частности, присутствуют практически идеальные октаэдры, искаженные октаэдры с удлинением или уплощением по оси второго, третьего или четвертого порядка, деформированные октаэдры, октаэдры с вросшими микрокристаллами той же формы, сростки и двойники (рис. 4, 5). В особую подгруппу выделяются октаэдрические кристаллы с занозистой штриховкой и признаками полицентрического роста граней (рис. 6).

Среди мелких полизадрических кристаллов октаэдрического габитуса наиболее характерны кубооктаэдры (рис. 7) и комбинации октаэдра с ромбододекаэдром.

Общей особенностью внутреннего строения мелких октаэдрических кристаллов, включая сростки и двойники, является их тонкая слоистость. На поверхности она проявляется в виде тонкой штриховки или ступенчатого

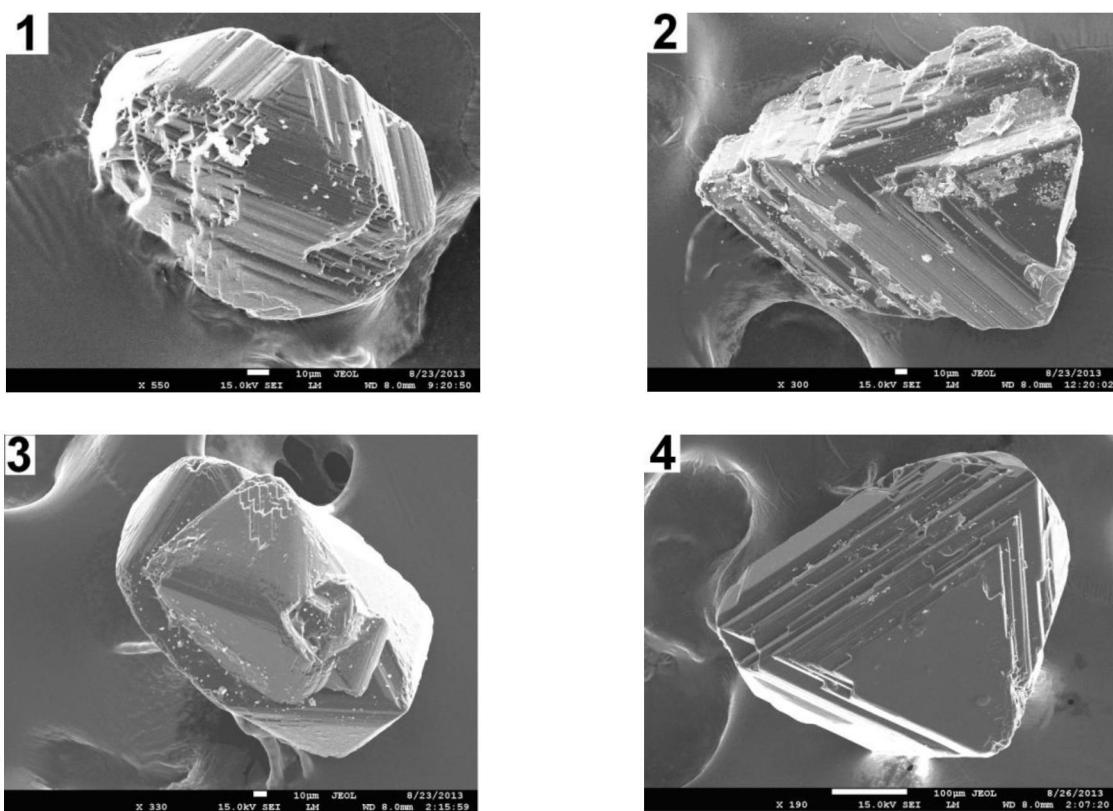
микрорельефа на гранях. Однако внешнее выражение слоистости имеет индивидуальный характер для каждого кристалла. В частности, на гранях очень часто наблюдается последовательное выклинивание слойков по мере приближения к вершинам кристалла. Другими признаками слоистого строения кристаллов являются выступающие на гранях валообразные возвышения отдельных слойков высотой около 1 мкм (рис. 8).

Известно, что при переносе алмазы практически не окатываются, однако достаточно легко раскалываются из-за повышенной трещиноватости и хрупкости, а также наличия спайности. Особенно часто скалываются выступающие части кристаллов (вершины, ребра и др.). В частности, на большинстве исследованных кристаллов из россыпей Урала вершины октаэдров сколоты (см. рис. 4, 5, 7, 8).

2.4.2. Ромбододекаэдрические алмазы

Кристаллы ромбододекаэдрического габитуса – следующий по распространённости, после октаэдрических, морфологический тип мелких алмазов. Их основными особенностями являются: несовершенство формы кристаллов; дефектность присутствующих октаэдрических граней и слабо развитых граней других кристаллографических форм, отличающихся округленностью и различными неровностями поверхности; искривленность ребер и др. (рис. 9).

По крупности ромбододекаэдрические алмазы мелких классов обычно несколько уступают октаэдрическим. Например, в выборке мелких алмазов из россыпей Красновишерского района они преимущественно имеют размер от 0,4 до 0,2 мм.



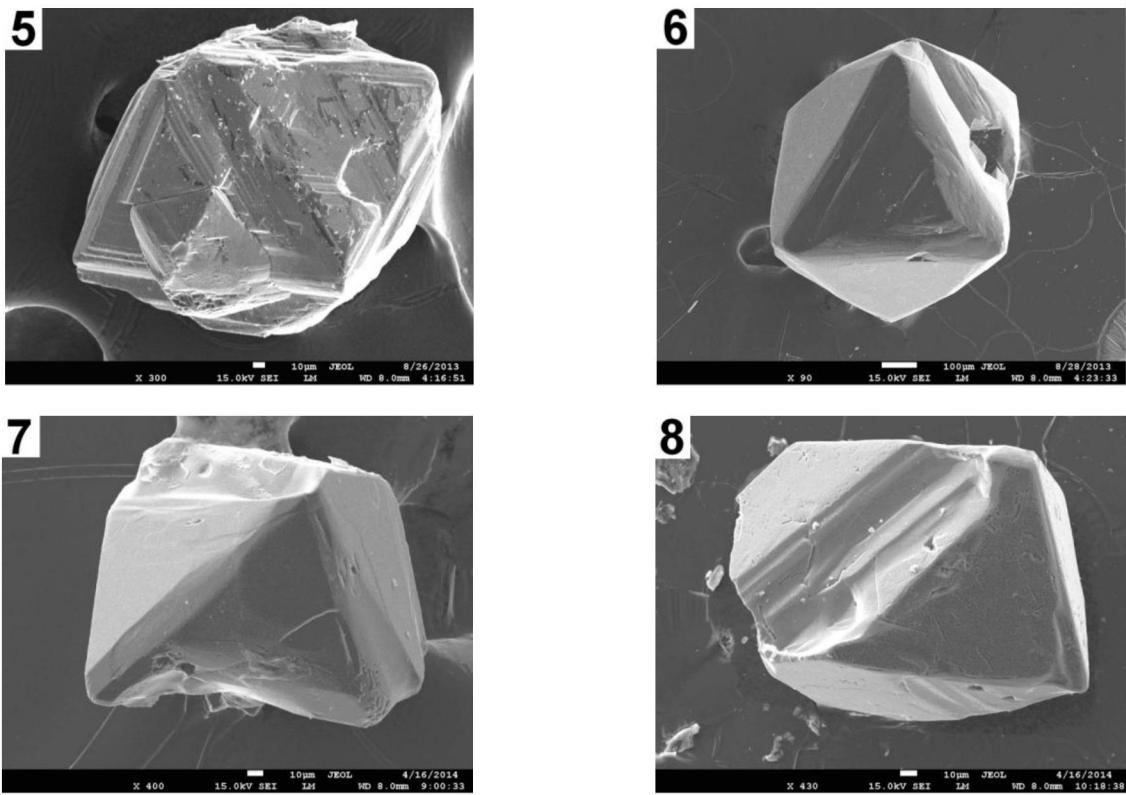


Рис. 4. Типичные мелкие октаэдрические кристаллы, их двойники и сростки: 1 – бесцветный осколок, р. Волынка; 2 – бесцветный с сероватым оттенком, р. Волынка; 3 – голубовато-серый, р. Волынка; 4, 5 – голубоватые, Ю. Тиман; 6 – бесцветный, трубка Мир; 7 – р. Вижай; 8 – сросток, р. Вижай. Масштабная линейка: 4,6 – 100, остальные – 10 мкм

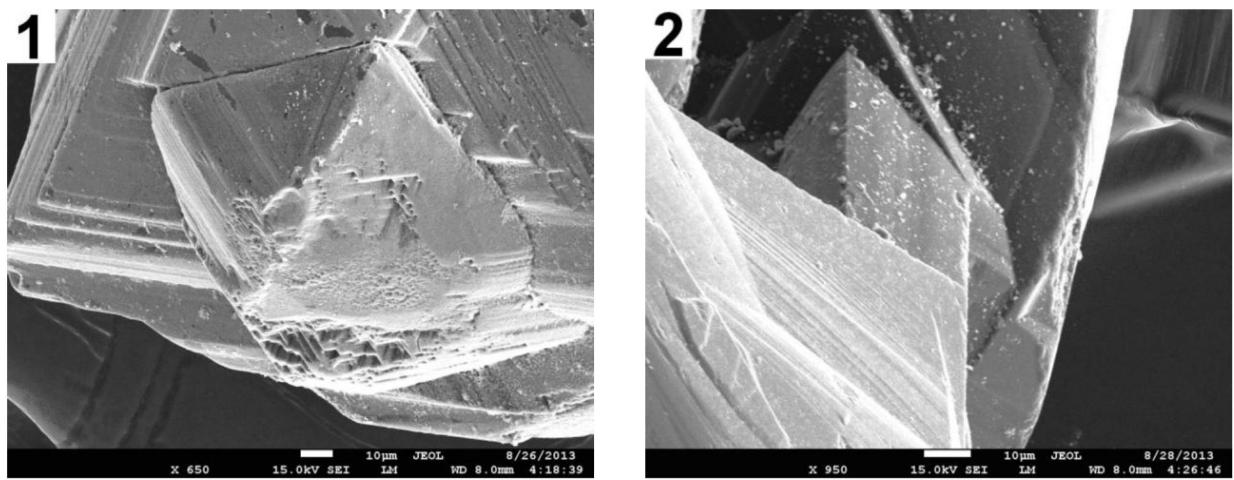


Рис. 5. Детали строения поликристаллических алмазов: 1 – голубоватый октаэдр, Ю. Тиман; 2 – бесцветный сросток октаэдров, трубка Мир. Масштабная линейка – 10 мкм

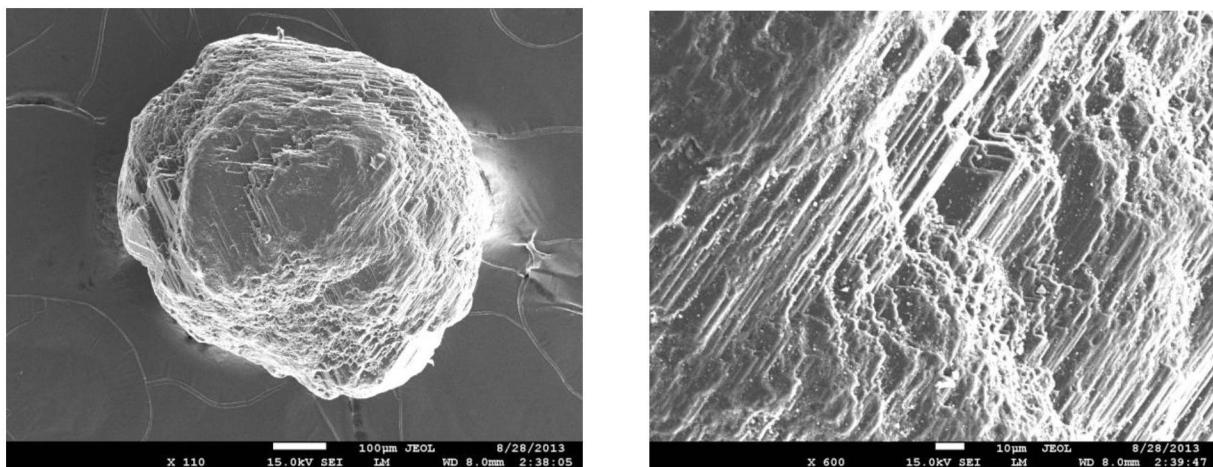


Рис. 6. Алмаз с полицентрическим развитием граней (трубка Мир) (слева – общий вид, масштабная линейка 100 мкм; справа – детали строения, масштабная линейка – 10 мкм)

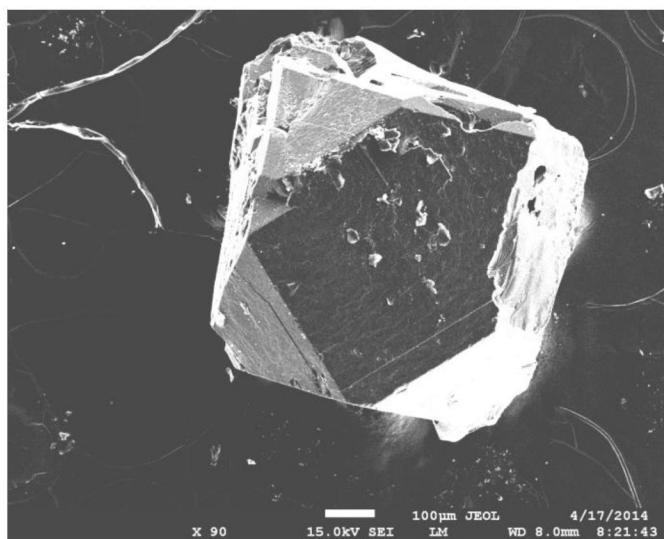
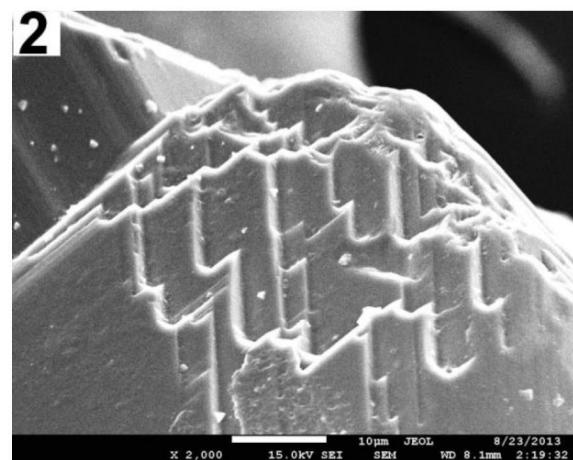
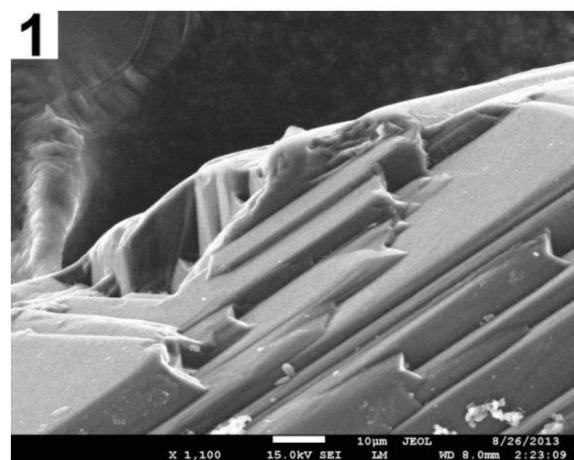


Рис. 7. Кубооктаэдрический кристалл размером 0,9 мм. Масштабная линейка – 100 мкм



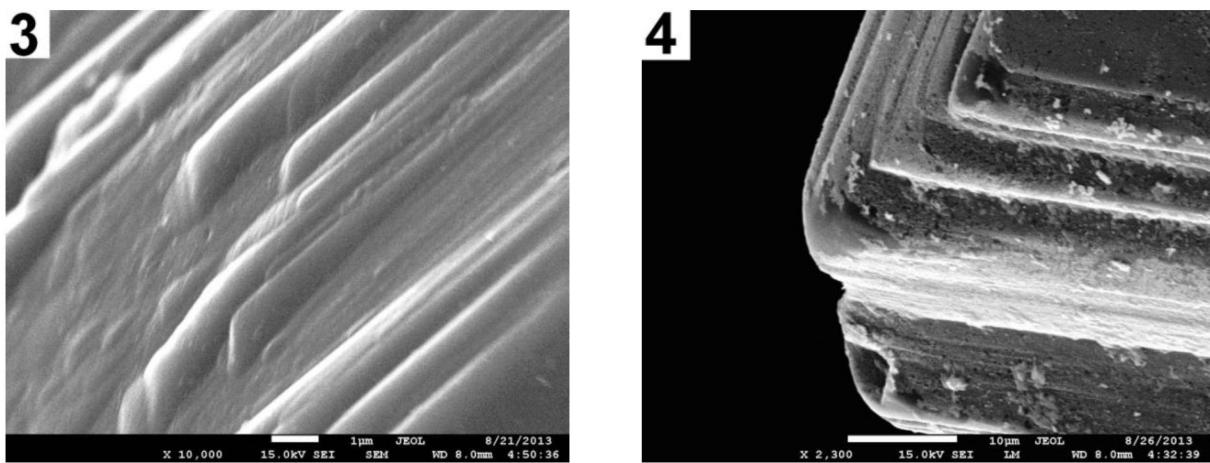


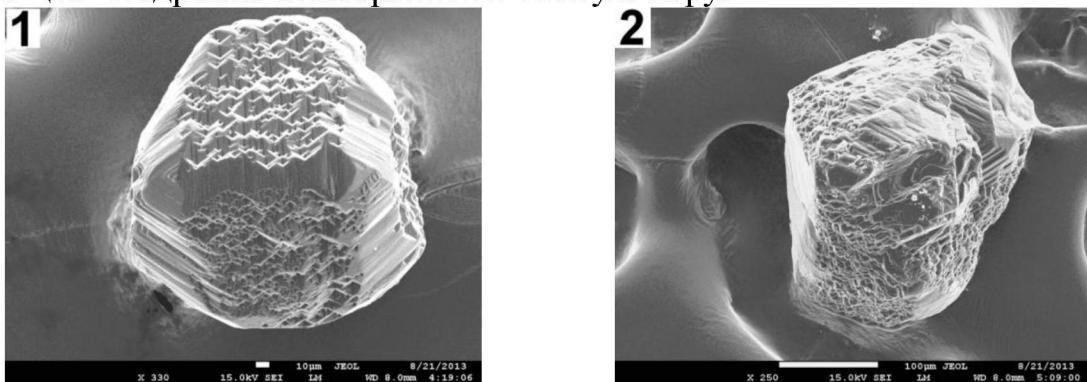
Рис. 8. Характерные формы выклинивания слойков на гранях октаэдрических алмазов: 1, 4 – Ю. Тиман; 2, 3 – р. Волынка. Масштабная линейка: 1, 2, 4 – 10 мкм, 3 – 1 мкм

2.4.3. Поликристаллические сростки

Формы срастаний многих микрокристаллов алмаза чрезвычайно разнообразны. Основу поликристаллических сростков обычно образуют октаэдрические микрокристаллы размером от 200 до 50 мкм. Но в промежутках между ними присутствуют неясно сформированные кристаллиты микронных размеров. Однако в редких случаях в сростках отмечается присутствие и ромбододекаэдрических кристаллов размером до 0,75 мм (рис. 10, 11).

Исследование особенностей морфологии отдельных кристаллов, слагающих поликристаллические сростки, свидетельствует о высокой степени их дефектности, наличии крупных впадин правильной формы и т.д.

Соединение кристаллов друг с другом далеко не всегда является достаточно прочным, что предопределяет возможность их раскалывания на отдельные микрокристаллы при механическом воздействии (см. рис. 11). Поэтому образование поликристаллических сростков алмазов в мантии является одной из причин появления большого количества мелких алмазов в кимберлитовых телах вследствие различных механических процессов, сопровождающих внедрение кимберлитов в земную кору.



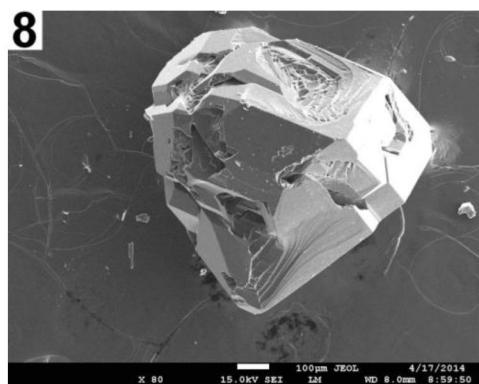
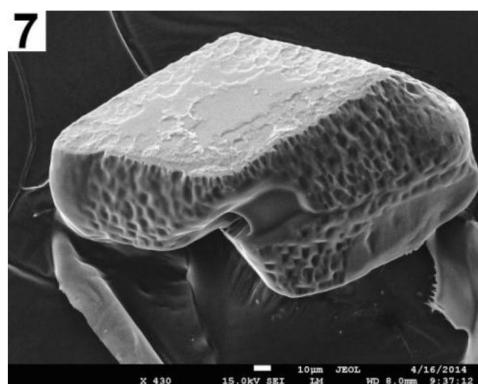
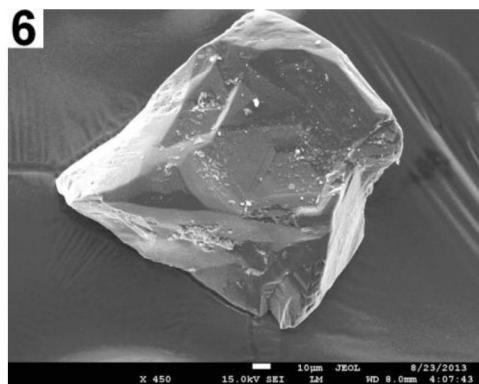
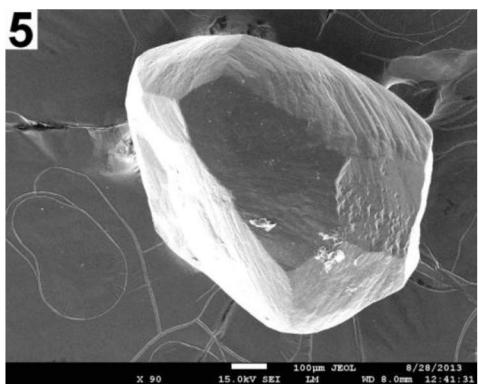
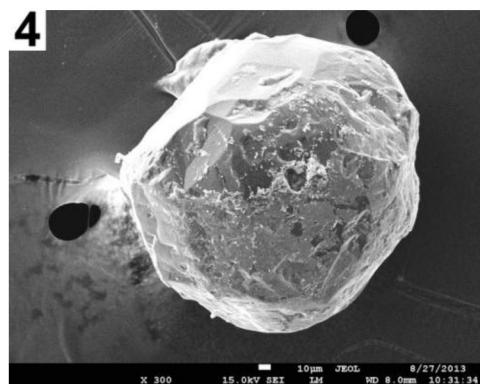
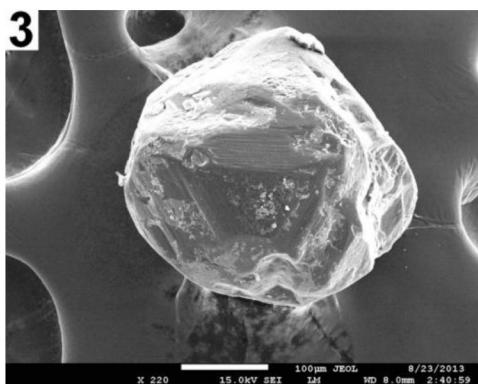
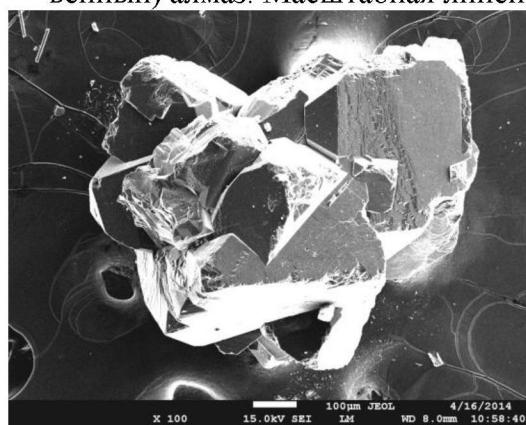


Рис. 9. Кристаллы ромбододекаэдрического габитуса и их осколки: 1, 2 – желтоватые, р. Волынка; 3 – сероватый, р. Волынка; 4 – зеленовато-коричневый, меловой аллювий, Ю.Урал; 5 – светло-розовый, трубка Мир; 6 – светло-зеленый, Красновишерский район; 7 – светло-голубой, р. Щугор; 8 – технический (искусственный) алмаз. Масштабная линейка: 1, 4, 6, 7 – 10 мкм, 2, 3, 5, 8 – 100 мкм



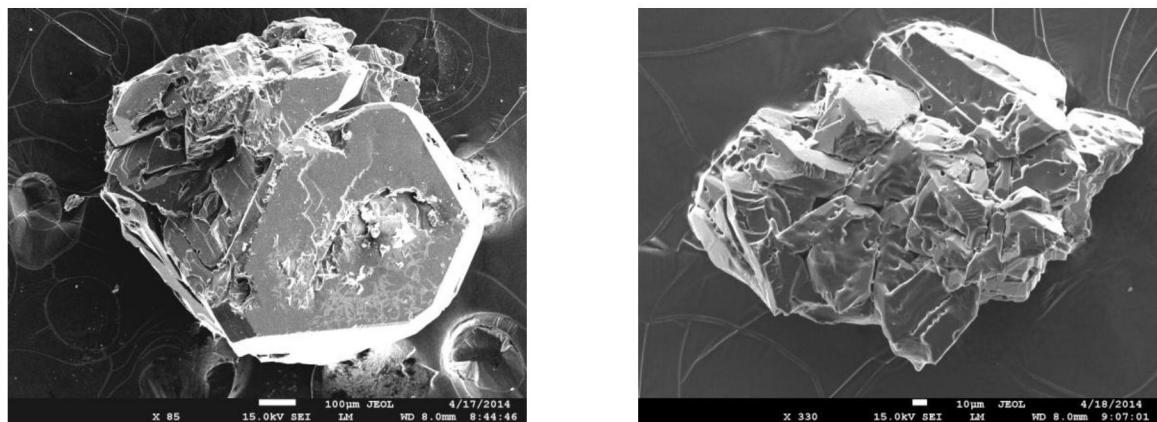


Рис. 10. Поликристаллические зерна алмаза. Масштабная линейка: слева – 100 мкм, справа – 10 мкм

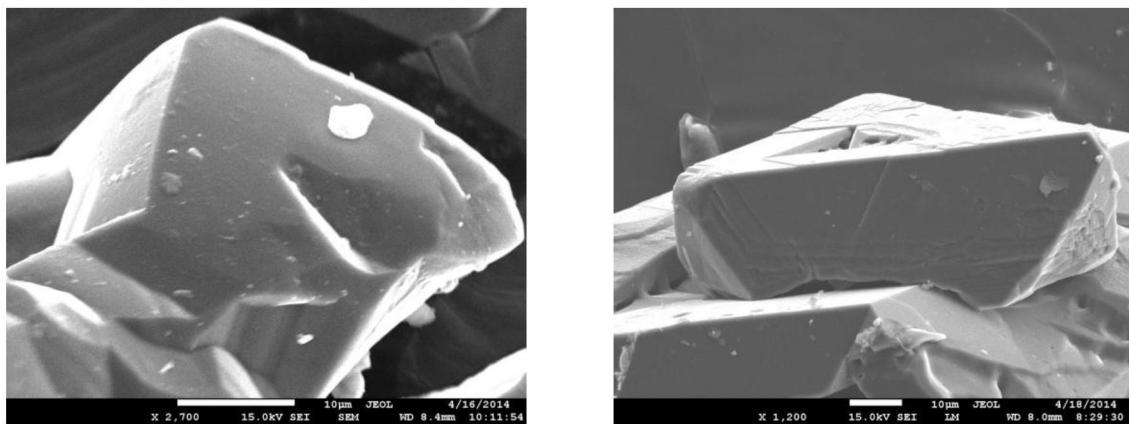


Рис. 11. Октаэдрические микрокристаллы в составе поликристаллических сростков. Масштабная линейка – 10 мкм

2.4.4. Кубические алмазы

Алмазы кубической формы в составе кимберлитов обычно рассматриваются как наиболее поздняя по времени образования генерация. Кубические кристаллы в кимберлитах в целом имеют подчиненное распространение, но в мелких классах их доля в некоторых трубках заметно возрастает. Особенно характерны кубические микрокристаллы для лампроитов. Например, в лампроитах трубки Аргайл-1 в составе класса 1–0,2 мм их доля составляет 38% (Палкина, Хренов, 1997).

Кристаллы алмазов кубического габитуса делятся на две группы. К первой группе относятся непрозрачные серые или янтарно-желтые с неровной поверхностью граней, покрытых мелкими ямками и бугорками (рис. 12). Характерно присутствие на месте ребер узких лентообразных полос, которые считаются соответствующими окружной поверхности тетрагексаэдроида (тип VIII/2 по Ю.Л. Орлову) (Квасница и др., 1999). Одной из морфологиче-

ских особенностей этих кубических алмазов является отсутствие плоских граней, аналогичных граням октаэдра. Исключением является присутствие микрограней на регенерационных бугорках. При растворении граней куба образуется поверхность эллипсоида, закономерно ориентированного относительно граней (Ракин, Петровский, 2006).

Нами дополнительно зафиксированы такие особенности, как округленность ребер на большинстве кристаллов и наличие сколов по спайности при вершинах с гладкой поверхностью.

Особенно сильноискажается исходная форма у сильнодеформированных алмазов кубического габитуса (рис. 13). Для них характерны высокая пористость, неровная поверхность с грубыми выступами и впадинами, в связи с чем и происходит заметное отклонение от идеальной кубической формы.

Кубические алмазы этой группы значительно мельче, чем октаэдрические или ромбододекаэдрические. Их размеры обычно не превышают 150 мкм. При этом они имеют достаточно узкий диапазон размерности (в основном 150–100 мкм).

Ко второй группе относят прозрачные кубы, бесцветные или желтоватые, отличающиеся почти плоской с пологими впадинами поверхностью граней, или таковая может быть чашеобразно вогнутой со сложным ступенчатым строением (Кудрявцева и др., 2005) (рис. 14). Такие алмазы еще мельче и часто не превышают 50 мкм. Они нередко присутствуют в составе поликристаллических сростков, но, вероятно, легко могут отделяться от них при механическом воздействии.

2.4.5. Алмазы с «оболочкой»

Обнаружение оболочечных алмазов (coated diamonds) привлекло внимание ученых не только из-за их морфологических особенностей, но и благодаря повышенной твердости оболочки, что имеет генетическое и определенное практическое значение.

Исследование строения алмазов с внешней оболочкой показало, что для них характерно резко гетерогенное строение. Они состоят из внутреннего ядра определенного кристалломорфологического типа и внешней оболочки агрегатного строения. Обычно центральная часть представлена прозрачным бесцветным октаэдрическим кристаллом I разновидности по классификации Ю.Л. Орлова, а оболочка – непрозрачной фазой. Однако состав и той и другой частей алмаза может варьировать. Например, для одного из таких алмазов, обнаруженного в Сьерра-Леоне, центральная часть была представлена кристаллом кубической формы, а оболочка – агрегатом зерен микронных размеров (Харьков и др., 1997).

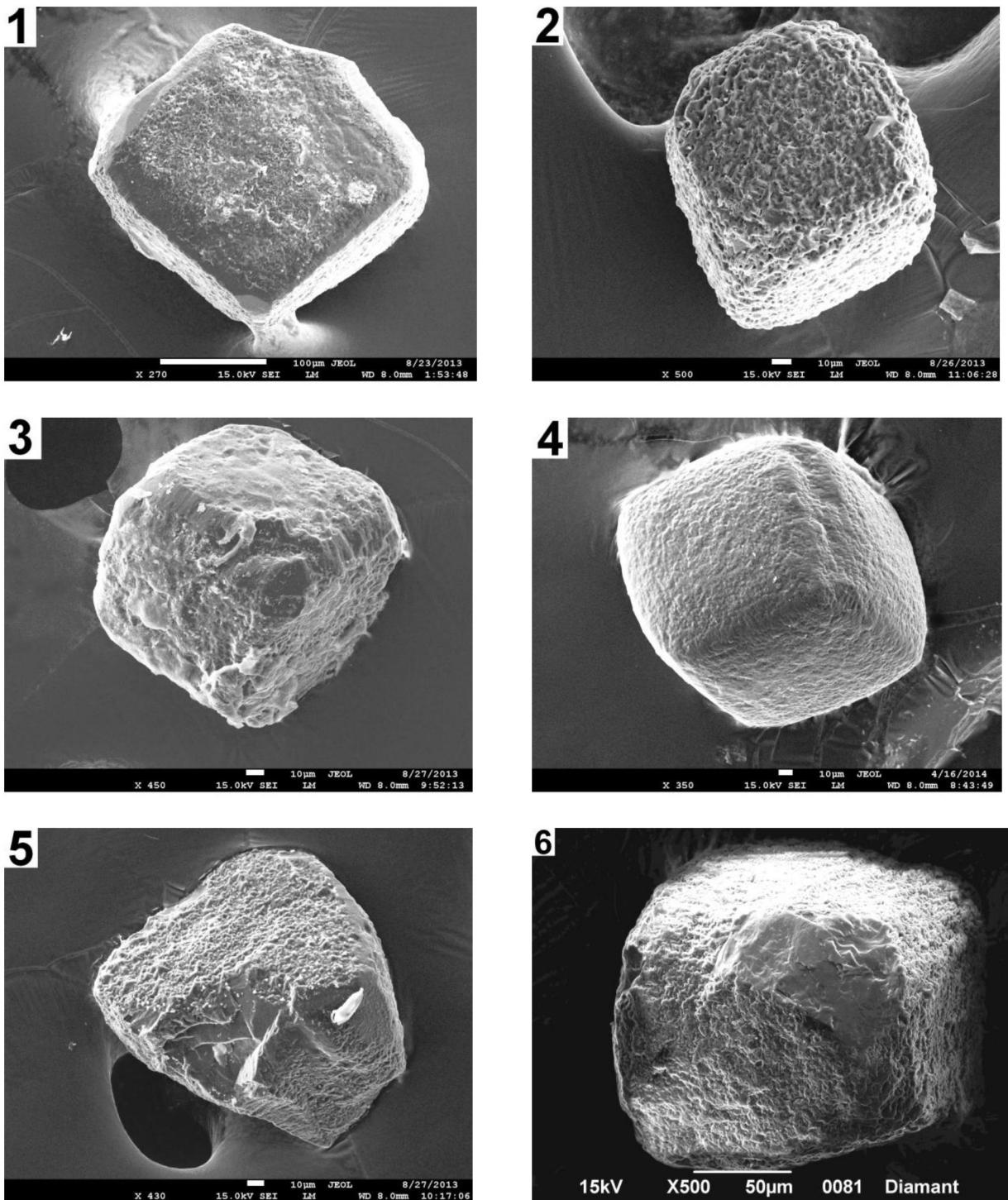


Рис. 12. Общий вид мелких кубических кристаллов алмаза: 1 – серовато-розовый, р. Волынка; 2 – почти черный, р. Чикман; 3 – розовато-сиреневый, Ю. Тиман; 4 – сиреневый, Ю. Урал, меловой аллювий; 5 – розовато-сиреневый, Ю. Тиман; 6 – Вятско-Камская впадина. Масштабная линейка: 1 – 100 мкм, 2–5 – 10 мкм, 6 – 50 мкм

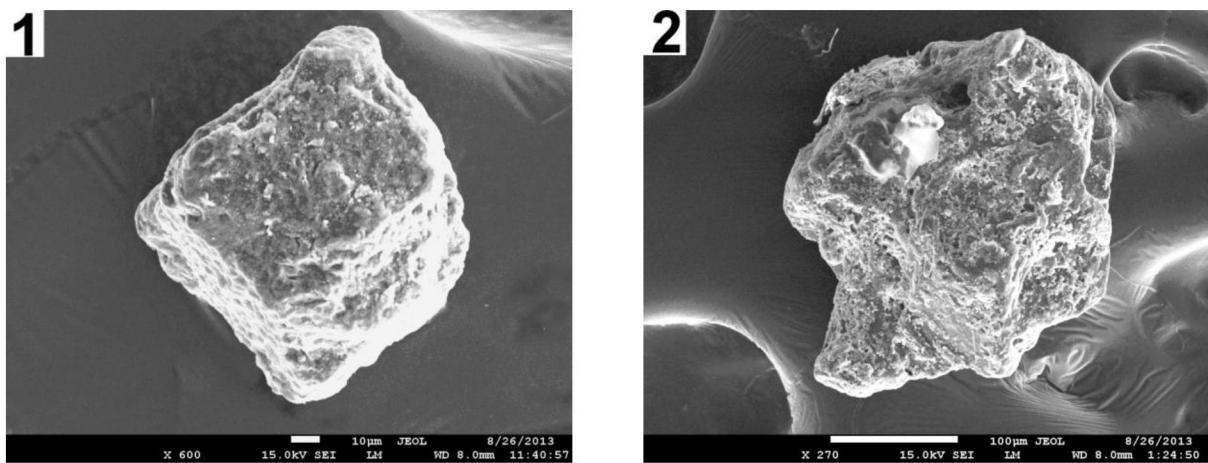


Рис. 13. Сильнодеформированные кубические алмазы, р. Чикман: 1 – светло-розовый; 2 – серовато-желтый. Масштабная линейка: 1 – 10 мкм, 2 – 100 мкм

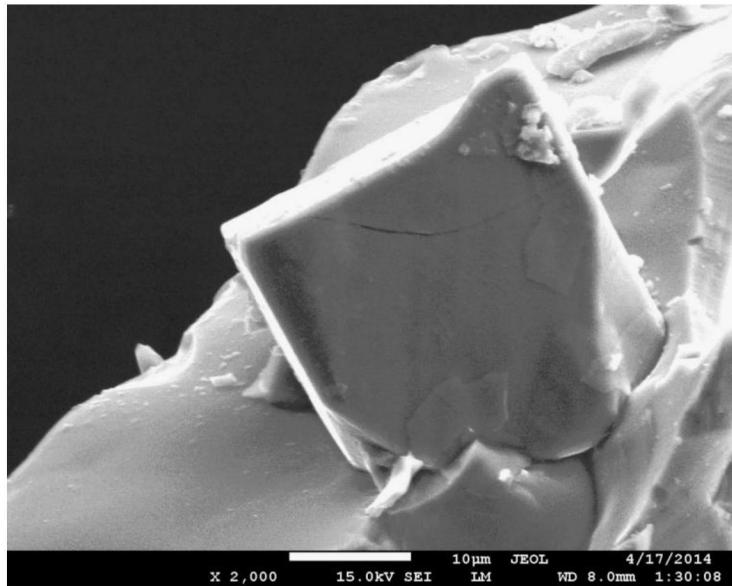


Рис. 14. Гладкогранный кубический кристалл алмаза размером 30 мкм в поликристаллическом сростке

Оболочечные алмазы имеют важное генетическое значение, поскольку свидетельствуют, по крайней мере, о двух отчетливо различных стадиях роста в различных горизонтах мантии. О разновременности образования центральной части кристалла и внешней оболочки свидетельствуют также данные изотопии углерода. Так, оболочки нередко являются в среднем изотопно более тяжелыми по сравнению с центральными частями кристаллов, и это различие достигает 30–40% (Boyd et al., 1994; Силаев и др., 2006). При этом центральные части отличаются широкими вариациями изотопии углерода, в то время как диапазон значений $\delta^{13}\text{C}$ для оболочки обычно весьма узкий и составляет от -5 до -8‰ (Cartigny et al., 2001).

Непрозрачность оболочки связана с ее поликристаллическим волокнистым строением и наличием микровключений сложного минерального состава. Детальные данные получены при изучении девяти мелких (размер 0,8–1,0 мм) оболочечных алмазов кубического и кубооктаэдрического габитуса из кимберлитовой трубы Сытыканская. Оболочки на них имели толщину от нескольких десятков до 500 мкм и неравномерно покрывали поверхность алмазов. Значения $\delta^{13}\text{C}$ для ядра составили от -3,8 до -19,7‰, для оболочки – от -5,9 до -7,1‰. В составе микровключений в оболочке установлены силикаты, карбонаты и вода. В химических анализах в большом количестве зафиксированы кремнезем, присутствие оксидов многих лиофильных элементов (Al, Na, K, Mg, Ca, Fe), а также фосфора, титана и хлора. В целом основная масса вещества микровключений в оболочках имеет карбонатно-силикатный состав (Скузоватов и др., 2010).

В изученных нами немногочисленных находках мелких алмазов с оболочкой установлена приуроченность вещества оболочек только к понижениям микрорельефа поверхности алмаза. При этом толщина оболочки постепенно уменьшается к краям впадин, где она выклинивается. Некоторые грани практически лишены оболочки. Оболочка отличается от центральной части кристалла более светлой окраской и непрозрачностью (рис. 15).

Вероятно, для мелких алмазов оболочка имеет весьма малую толщину, которая не превышает нескольких десятков микронов. Другие детали строения вещества оболочки исследованы методами высокоразрешающей электронной микроскопии и описаны в следующей главе.

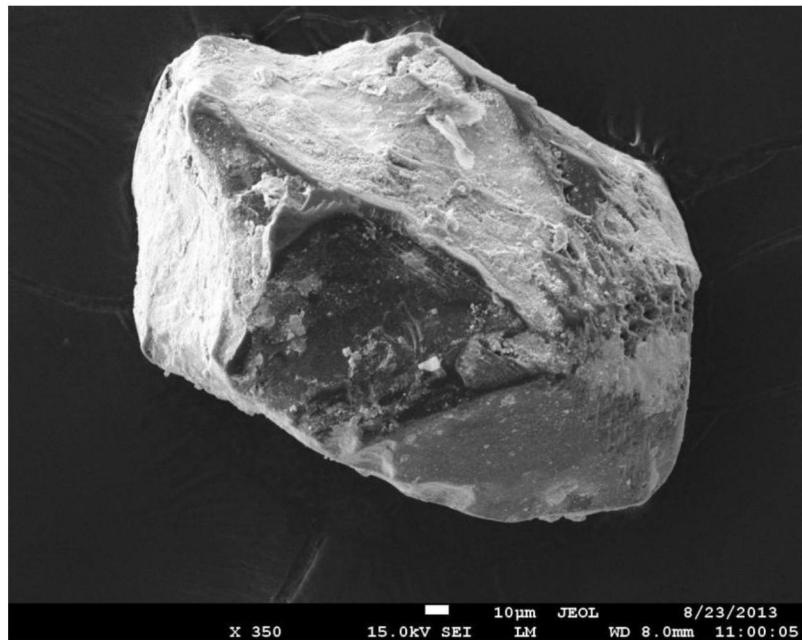


Рис. 15. Общий вид кристалла алмаза Красновишерского района с фрагментами оболочки (светлые). Масштабная линейка – 10 мкм

2.5. Мелкие алмазы лампроитов

Лампроитовые алмазы в целом отличаются преобладанием округло-додекаэдрических форм (додекаэдроидов). Однако для мелких классов (менее 1 мм) трубы Аргайл-1 типичен гладкогранный октаэдр. Кроме того, распространены кубические кристаллы, двойниковые образования и осколки. На поверхности кристаллов нередко встречаются коррозионные микроформы – каналы травления, каверны и др. (Харьков и др., 1997).

Таким образом, мелкие алмазы лампроитов практически не отличаются от таковых кимберлитов.

2.6. Морфологические особенности мелких россыпных алмазов

В россыпях ближнего сноса мелкие алмазы в значительной степени представлены теми же морфологическими типами кристаллов, которые присутствуют в коренных источниках. В связи с их исключительной твердостью они легко противостоят воздействию эффекта истирания при переносе в водном потоке. Благодаря небольшим размерам они свободно помещаются в пустотах между крупными обломками каркаса в структуре донных наносов, являются составной частью обломочного матрикса и контактируют с существенно менее твердыми обломками и зернами (в основном кварцита и кварца). Поэтому значительная часть мелких кристаллов алмазов россыпей ближнего сноса может дать надежное представление о морфологии алмазов их первоисточника (рис. 16).

При длительном переносе и многократном переотложении активным процессом преобразования формы первичных кристаллов алмаза является их раскалывание по спайности или зонам интенсивной трещиноватости. В связи с этим в россыпях дальнего сноса наряду с мелкими хорошо окристаллизованными алмазами широко распространены осколки крупных кристаллов.

Значительное количество мелких осколков образуется в процессе откалывания небольших фрагментов от вершин и ребер кристаллов. Например, на рис. 17 представлены участки поверхности близ вершин кристаллов с небольшими по размерам сколами, имеющими характерный раковистый излом. В результате отщепления таких фрагментов должны были образоваться плоские осколки размером в длину не более 100 мкм. Можно предположить, что отковавшиеся таким образом части кристаллов в дальнейшем при переносе постепенно раскалываются на еще более мелкие фрагменты. Один из аналогичных фрагментов размером менее 150 мкм представлен на рис. 18.

Среди осколков кристаллов в россыпях можно выделить три группы. К первой следует отнести те, которые сохраняют заметное количество первичных граней. По строению этих граней, включая особенности микро- и наноформ поверхности, можно сделать уверенное заключение о морфологическом типе и даже размере исходного кристалла. Ко второй группе относятся осколки, на которых сохраняются неполные фрагменты одной или несколь-

ких граней, и в этом случае восстановление размера исходного кристалла становится невозможным. Однако с учетом форм микрорельефа остатков граней может быть сделан вывод об их принадлежности к определенному морфологическому типу. Наконец, к третьей группе относятся осколки без сохранившихся граней, среди которых можно выделить осколки по спайности и по другим направлениям. Последние отличаются от первых раковистым изломом скола, в то время как первые имеют ровные поверхности раскола.

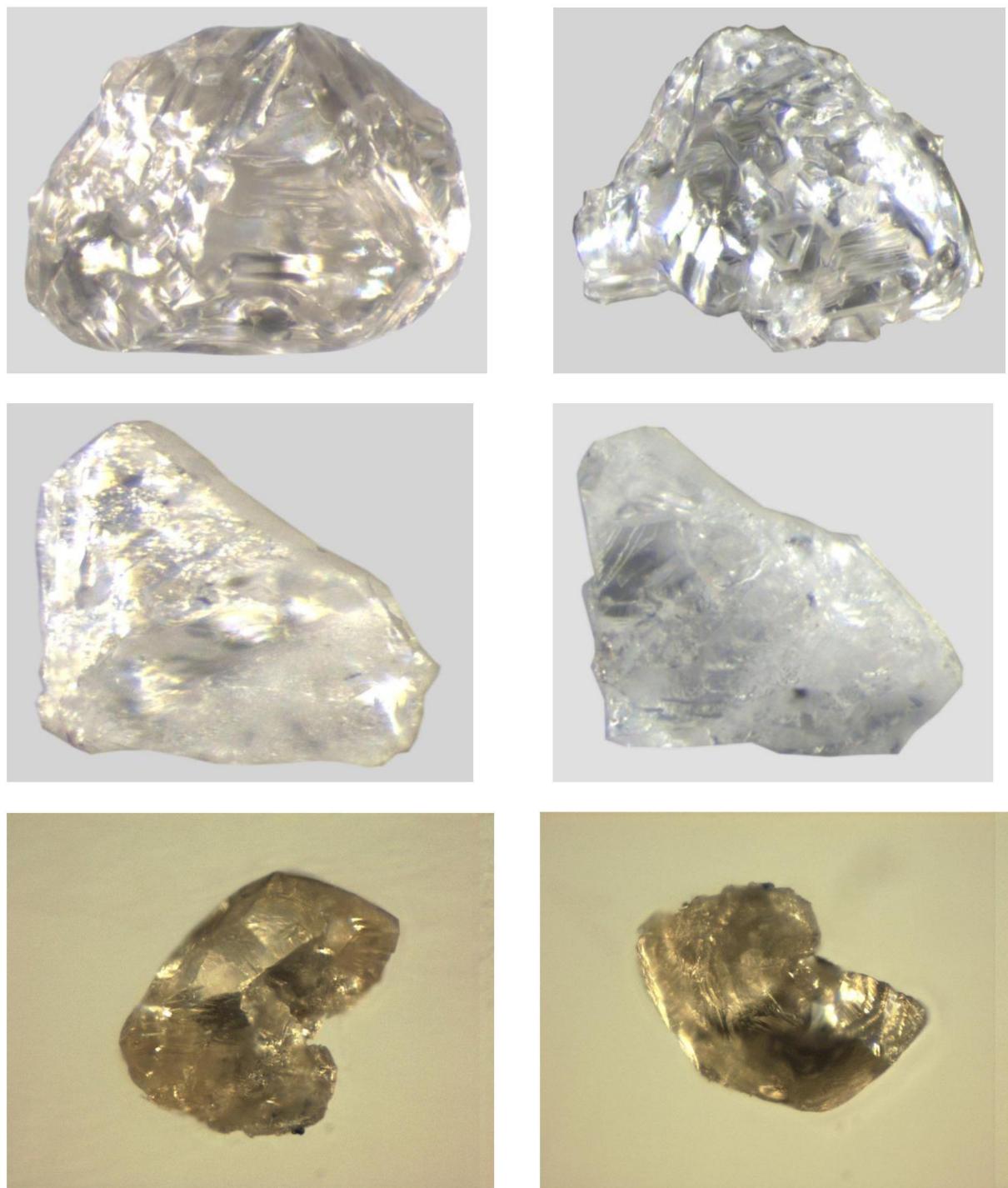


Рис. 16. Мелкие алмазы (0,5–0,3 мм) юрских базальных отложений
Вятско-Камской впадины

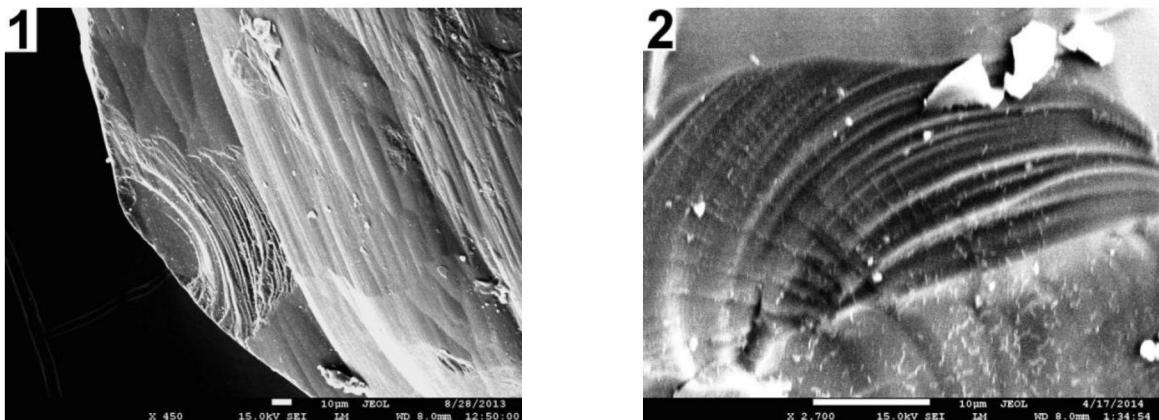


Рис. 17. Сколы микронных размеров с раковистым изломом в привершинных зонах кристаллов алмаза. Масштабная линейка – 10 мкм

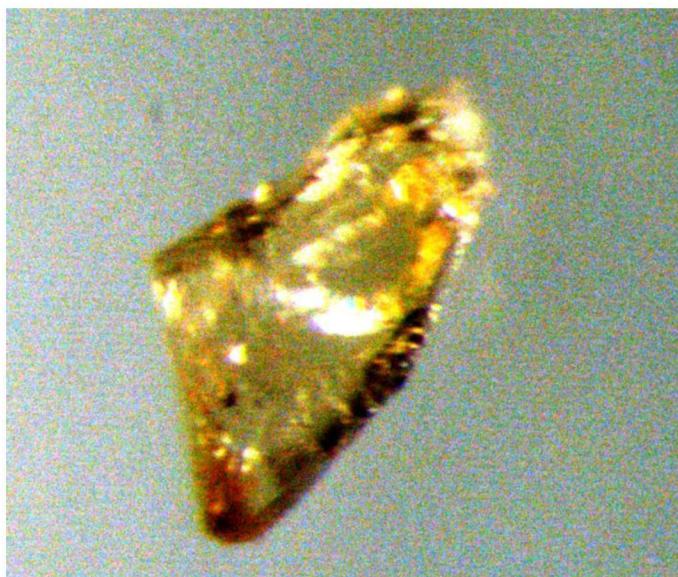


Рис. 18. Мелкий ($0,15 \times 0,07$ мм) остроугольный осколок алмаза из юрских базальных отложений Вятско-Камской впадины

Например, для Нюрбинской россыпи ближнего сноса, непосредственно примыкающей к Нюрбинской кимберлитовой трубке, детально изучено изменение морфологии кристаллов алмаза, представленных преимущественно индивидами размером 1–0,5 мм. Так, в россыпи по сравнению с кимберлитовым телом заметно повышается доля кристаллов с признаками природного травления (до 41% против 33%), несколько возрастает доля круглых алмазов (до 4% против 2%), однако в целом мелкие алмазы россыпи и кимберлитов достаточно близки по морфологическим особенностям (Богуш, Кедрова, 2009).

Россыпи Красновишерского района, которые относятся к объектам дальнего сноса, отличаются значительным количеством осколков среди мелких алмазов, на долю которых приходится половина всех находок в классе –1 мм (Лунев, Осовецкий, 1996). Среди них преобладают осколки кубов и ок-

таэдров, причем восстановление первичной формы кристалла производилось на основе изучения одного или реже двух фрагментов сохранившихся граней. Подчиненное и примерно равное распространение имеют осколки с отщеплением менее половины объема первичного кристалла и осколки вообще без сохранившихся граней (рис. 19, 20). Характерно, что последние отличаются достаточно заметными размерами (обычно более 0,3 мм).

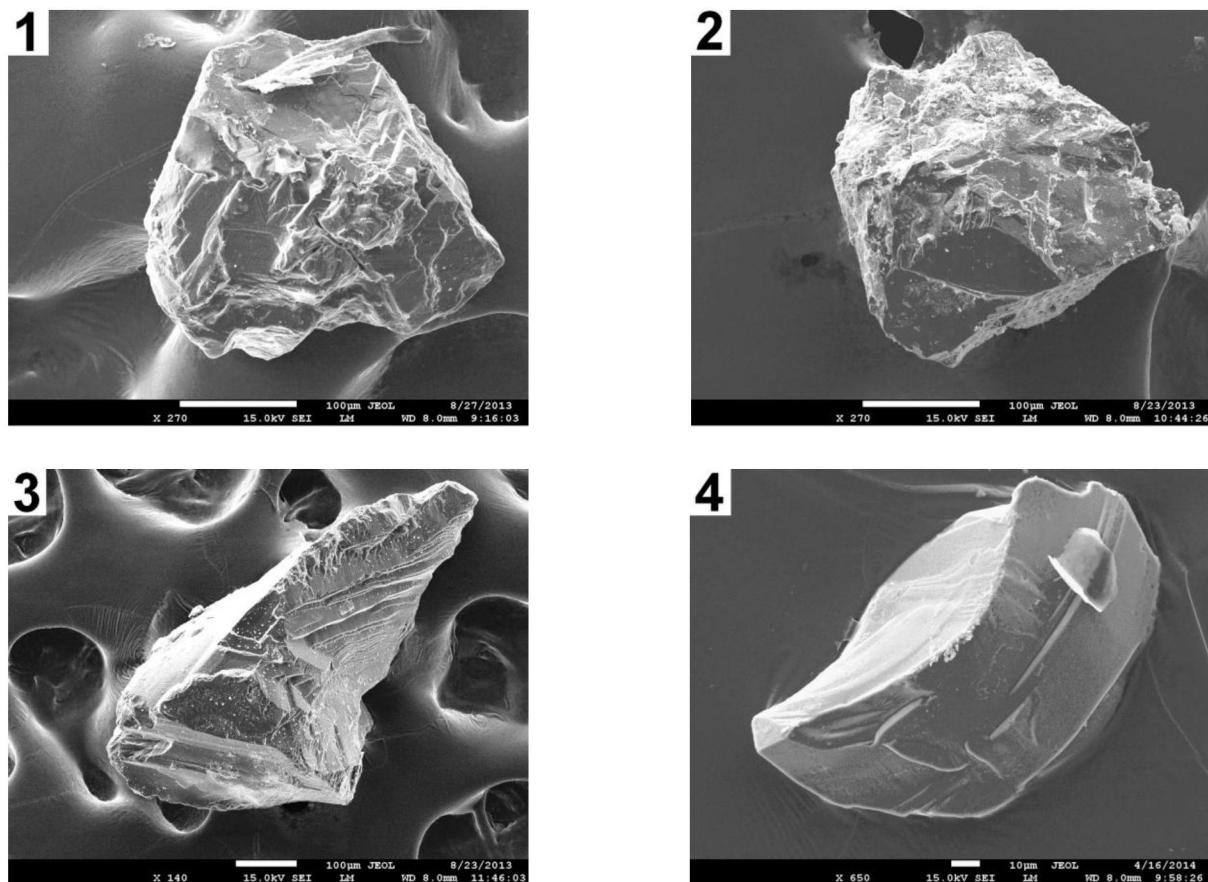


Рис. 19. Осколки кристаллов россыпных алмазов без сохранившихся граней: 1 – розовато-желтый, Ю. Тиман; 2 – сероватый, Красновишерский р-н; 3 – серовато-желтый, Красновишерский р-н; 4 – бесцветный, р. Щугор. Масштабная линейка: 1–3 – 100 мкм, 4 – 10 мкм

2.7. Искусственные алмазы

Одной из основных особенностей морфологии искусственных алмазов является правильность кристаллических форм и нередко гладкая поверхность граней (Bovenkerk, 1961). В частности, даже для кубических кристаллов на поверхности отчетливо проявляется их слоистое внутреннее строение, которое на природных кристаллах заметно только при большом увеличении под электронным микроскопом. Однако искусственные алмазы с гранями куба всегда имеют черную окраску благодаря присутствию тонких графитовых прослоев. Рентгеноструктурный анализ показывает их нарушенную кристаллическую структуру и наличие различных микроКлючений.

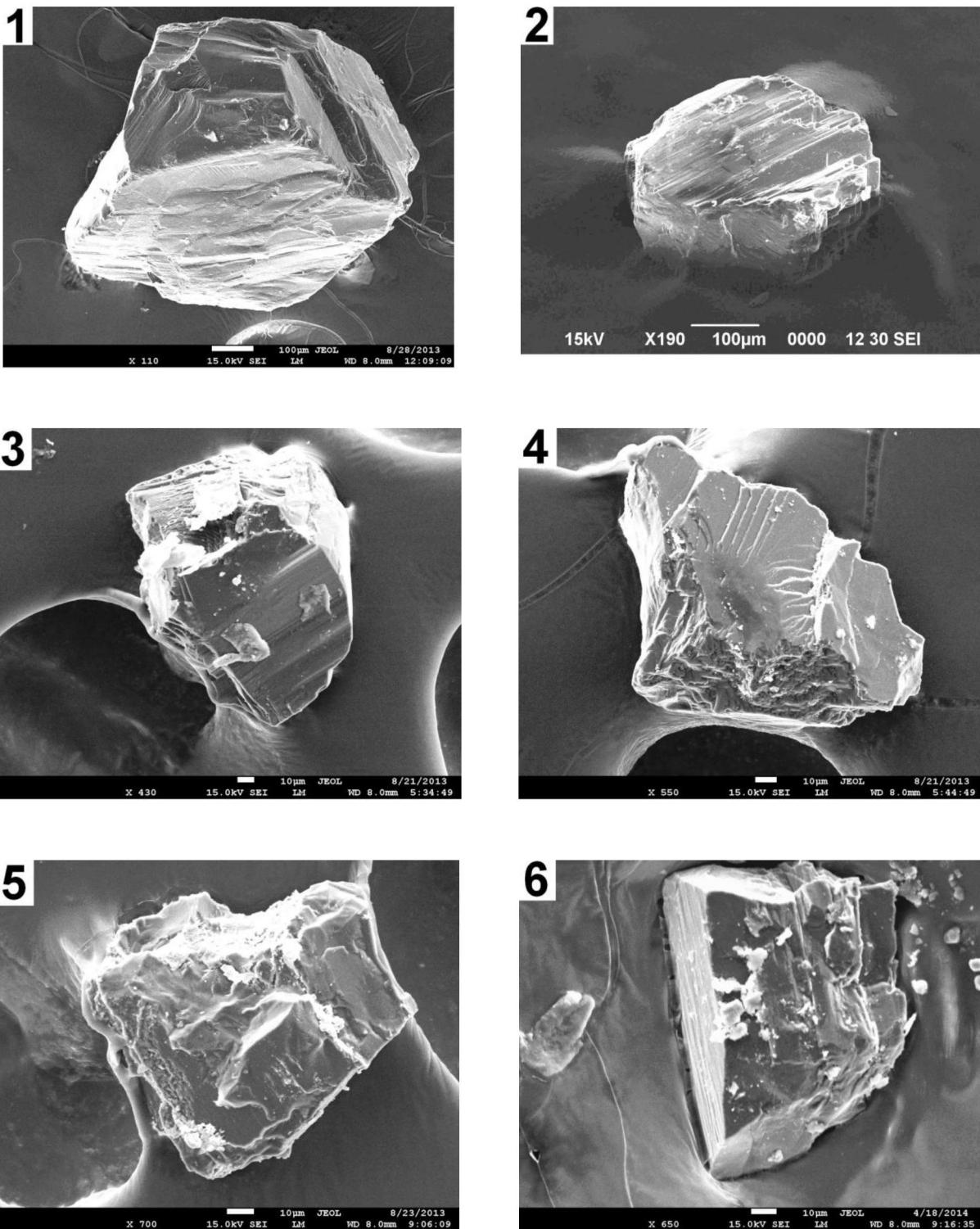


Рис. 20. Осколки кристаллов алмаза с сохранившимися гранями: 1 – светло-розовый, трубка Мир; 2 – Вятско-Камская впадина; 3, 4 – бесцветные, р. Волынка; 5 – сероватый с включениями, р. Волынка; 6 – Красновишерский район. Масштабная линейка: 1, 2 – 100 мкм, 3–6 – 10 мкм

Для синтетических алмазов наиболее характерной формой одиночных кристаллов является куб. Весьма распространены также среди искусственных алмазов комбинации куба и октаэдра с ровными и гладкими гранями. Кроме

того, присутствуют октаэдры, ромбододекаэдры и триоктаэдры (Квасница и др., 1999). В некоторых условиях синтеза крайне редко образуются ромбододекаэдры. Во всех таких кристаллах наблюдаются грубые грани с глубокими расщелинами. Соотношение этих форм зависит в основном от температуры синтеза. Однако в основной массе мелкие искусственные алмазы представляют собой агрегаты микрокристаллов неправильной формы или срастания разноразмерных кристаллитов в сложных сочетаниях друг с другом (рис. 21).

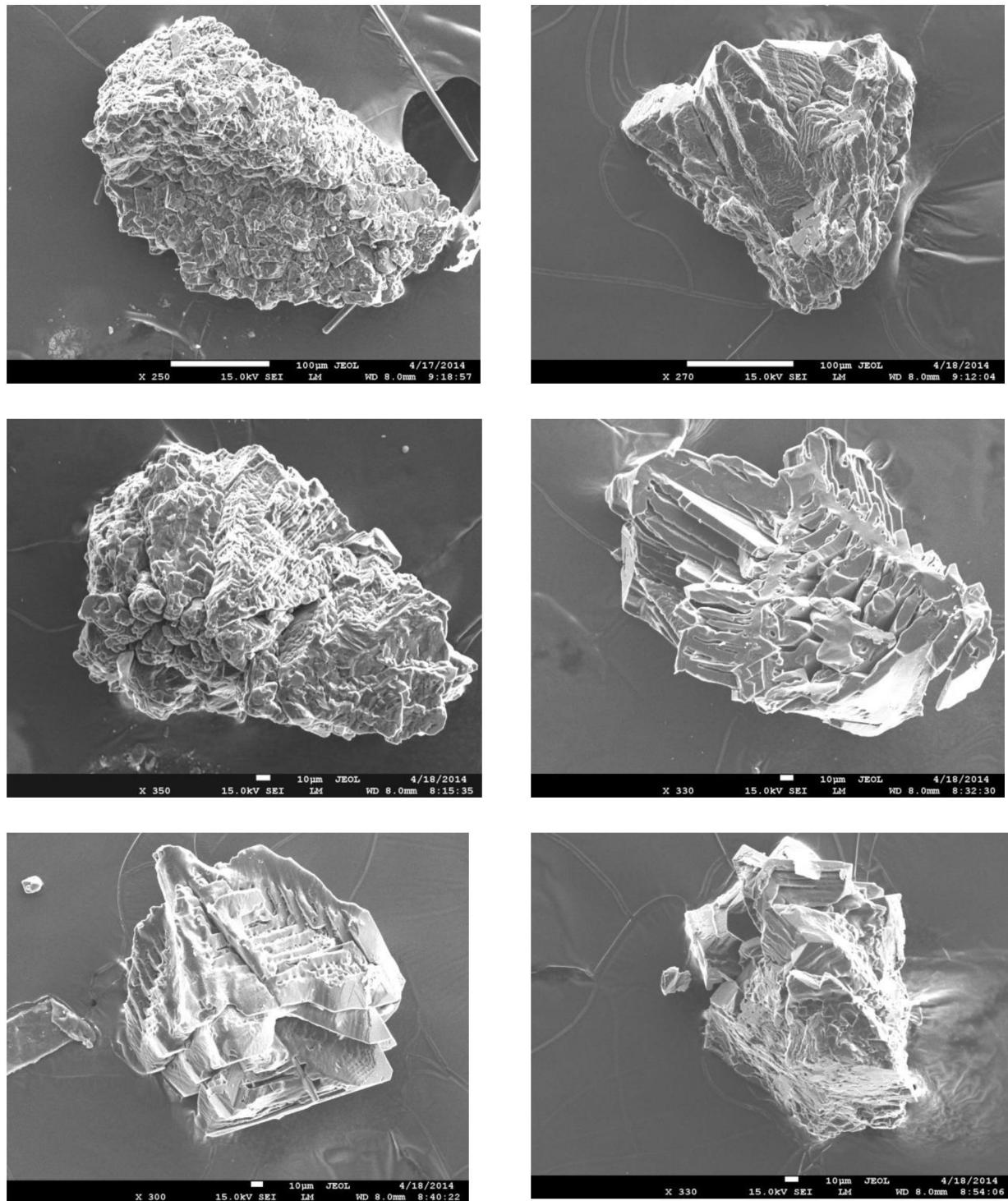


Рис. 21. Характерные морфологические типы искусственных алмазов. Масштабная линейка: верхний ряд – 100 мкм, средний и нижний ряды – 10 мкм

Октаэдрические грани отличаются наиболее гладкими поверхностями. Общей особенностью поверхности искусственных алмазов, наблюдалась как на октаэдрических, так и на кубических кристаллах, является присутствие дендритоподобных разветвляющихся извилин. Это объясняется влиянием дендритовой структуры металлических катализаторов, используемых при синтезе алмазов. Форма кристаллов искусственных алмазов существенно зависит от скорости их выращивания. Чем выше эта скорость, тем больше образуется сростков кристаллов, и они становятся поликристаллическими с очень сложной и разнообразной мозаикой кристаллитов. Часто формируется также скелетная структура.

Морфологические особенности мелких искусственных алмазов свидетельствуют о нестабильных условиях роста и неполной кристаллизации углерода, в результате чего определенная часть первичного графита остается в качестве включений в агрегатах искусственных алмазов.

Экзотической группой искусственных алмазов являются нанокристаллические индивиды, промышленное производство которых освоено современными технологиями. Интерес кnanoалмазам объясняется их уникальными свойствами: высокой адсорбционной способностью, высокой термопроводностью, гидрофобностью, большой удельной поверхностью. Они имеют размеры в основном от 5 до 50 нм и отличаются сложным внутренним строением. В центре находится алмазное ядро, которое окружено двухфазной оболочкой: алмазной с атомами углерода в состоянии гибридизации и графитовой. Форма нанокристаллов отчетливо выраженная полиэдрическая.

Важной особенностью nanoалмазов является их повышенная способность к образованию агрегатов: на первом этапе размером до 100 нм, на последующих – крупнее 100 нм (Sharkov et al., 2013). Такой же особенностью характеризуются и наночастицы золота (Осовецкий, 2012).

Глава III. МИКРО- И НАНОФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ МЕЛКИХ АЛМАЗОВ

Изучение поверхности алмазов под электронным микроскопом является одним из эффективных методов восстановления условий их образования, воздействия внешних факторов среды, особенностей переноса в водных и воздушных потоках и т.д. Алмаз отличается исключительной твердостью и в экзогенных условиях практически не изменяет приобретенного в мантийной обстановке облика кристалла. Однако детали строения поверхности являются весьма показательными при прослеживании истории его нахождения в осадочной оболочке.

В связи с совершенствованием методов поисков коренных источников в последние годы обращено особое внимание на мелкие алмазы как наиболее достоверные минеральные индикаторы источников сноса. Изучение поверхности алмазов позволит надежнее выявлять различные источники питания, отличать природные алмазы от техногенных (осколки алмазных буровых коронок), находки которых существенно осложняют поисковые работы на коренные источники.

Ниже нами рассмотрены характерные микро- и наноформы рельефа поверхности мелких алмазов разного генезиса, выявленные методами сканирующей электронной микроскопии, в т.ч. высокого разрешения.

3.1. Общие особенности поверхности мелких алмазов

Общий характер микроскульптуры поверхности импактных алмазов заметно меняется даже на разных участках одного и того же зерна. Местами она отражает их многослойное строение с многочисленными разрывами приповерхностного слоя, в других случаях приобретает грядово-холмистый микрорельеф (рис. 22).

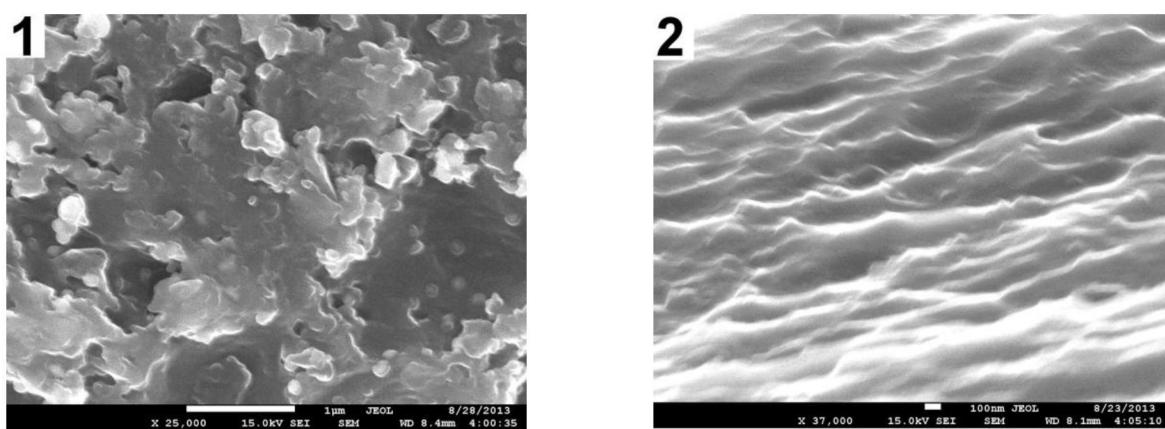


Рис. 22. Типичные микроскульптуры поверхности импактных алмазов: 1 – Попигайский кратер; 2 – Красновишерский р-н. Масштабная линейка: 1 – 1 мкм, 2 – 100 нм

Это является вполне закономерным следствием их поликристаллического и полифазного состава, присутствия в структуре разноориентированных кристаллитов и в большом количестве гексагональной полиморфной модификации углерода – лонсдейлита (Квасница и др., 1999).

Микроскульптура поверхности граней октаэдрических алмазов часто определяется характером их слоистости и отличается наличием занозистого или ступенчатого микрорельефа (см. ниже). Довольно часто также грани имеют сглаженный микрорельеф.

На октаэдрических гранях формами растворения являются локальные относительно неглубокие участки коррозионного микрорельефа. Вероятно, они приурочены к различным дефектным зонам структуры кристалла (рис. 23).

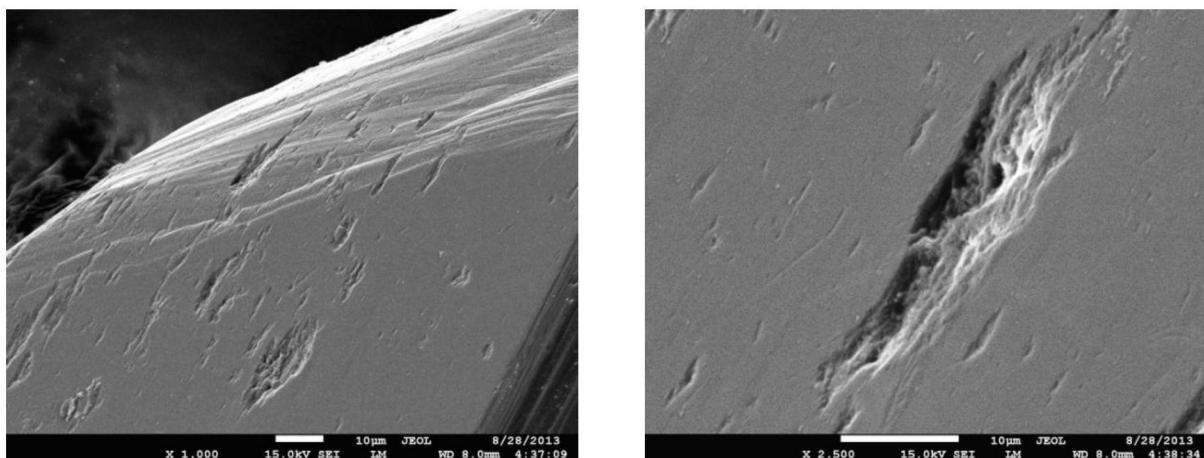


Рис. 23. Коррозионные формы растворения на октаэдрических гранях кристалла (трубка Мир). Масштабная линейка – 10 мкм

Наиболее выраженные морфологические изменения, вызванные процессами растворения в мантийных условиях, наблюдаются в привершинных участках поверхности и на ребрах октаэдров. В целом они проявляются в образовании холмисто-буторчатого сглаженного микрорельефа, который частично распространяется и на прилегающие участки граней, но в еще более сглаженной форме. По мере приближения к вершинам кристалла зона развития форм растворения, локализованная в приреберной области, постепенно расширяется (рис. 24).

При использовании методов электронной микроскопии высокого разрешения отмечено различие и поверхностного нанорельефа октаэдрических граней. Большинство из них имеет относительно гладкую поверхность даже при большом увеличении. Однако некоторые кристаллы отличаются наличием весьма мелких неровностей на гранях с формированием шероховатого (ячеистого) нанорельефа (рис. 25). Последний может свидетельствовать о на-

чальном этапе или относительно слабом по интенсивности процессе растворения алмазов в мантийных условиях.

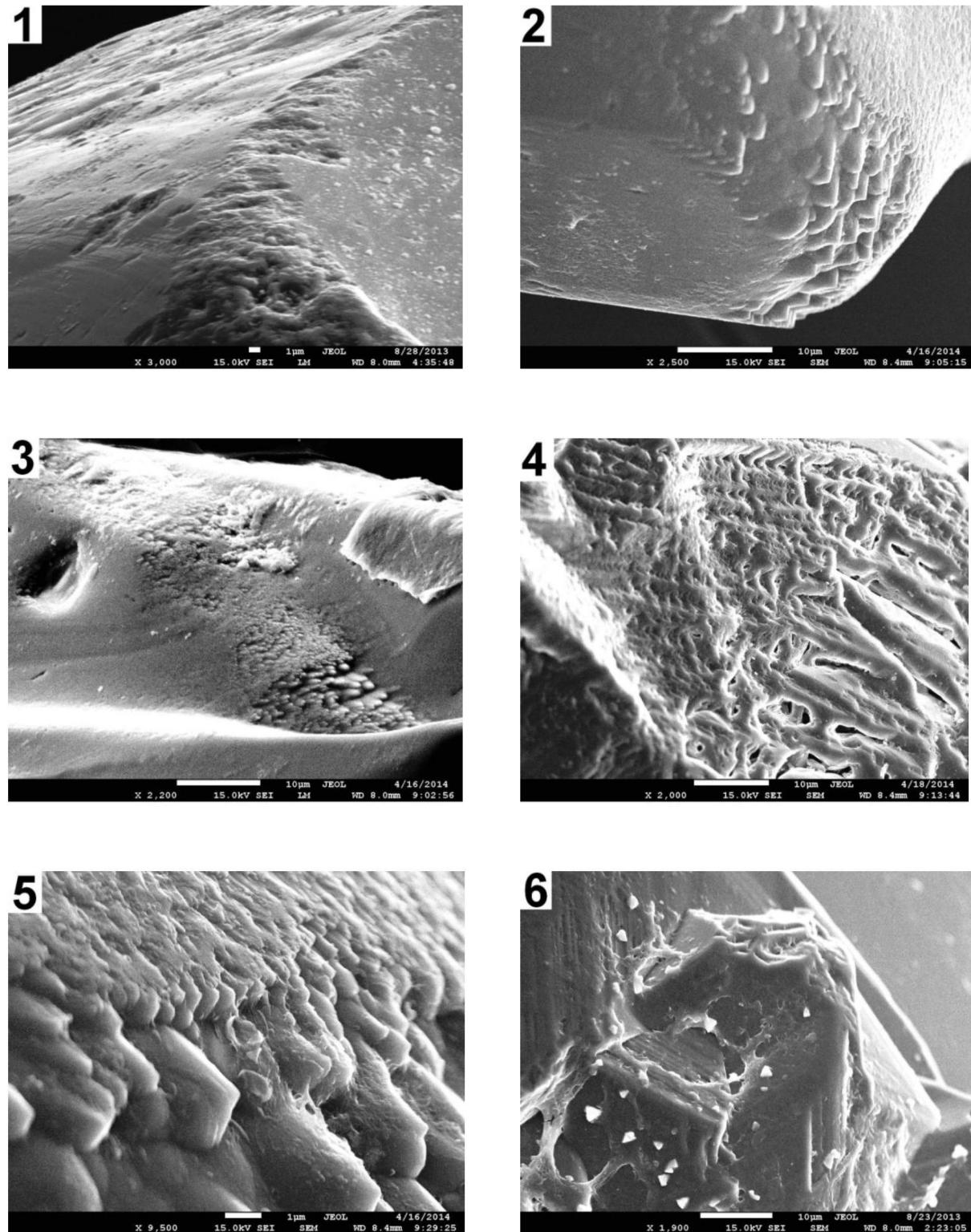


Рис. 24. Следы коррозии в привершинных и приреберных зонах октаэдрических кристаллов: 1 – трубка Мир; 2–5 – р. Вижай; 6 – р. Волынка.
Масштабная линейка: 1, 5 – 1 мкм, 2–4, 6 – 10 мкм

Кроме разнообразных мельчайших по размерам форм растворения, при рассмотрении на наноуровне разного рода углублений на поверхности кристаллов выявляются также весьма необычные ростовые формы (рис. 26).

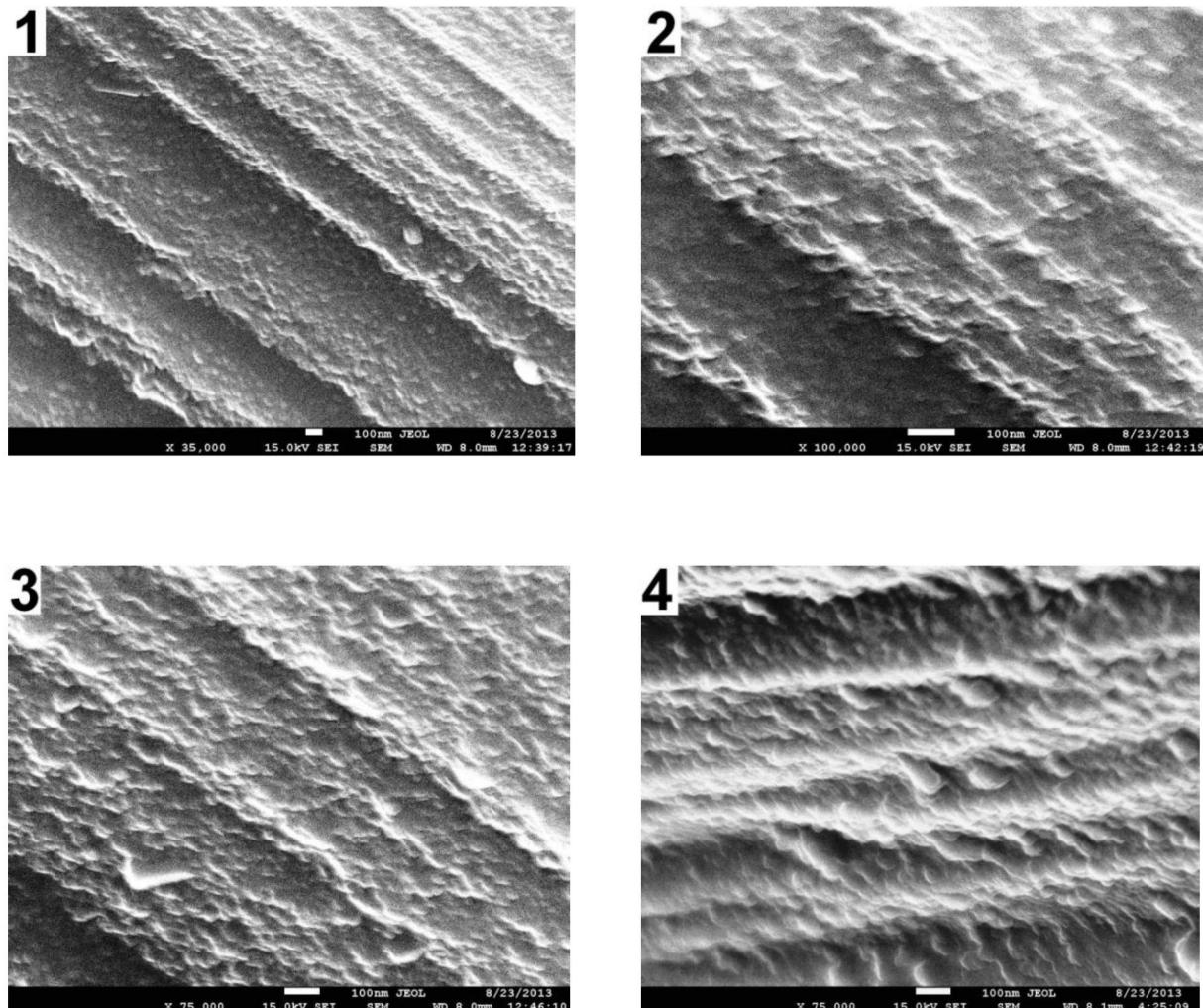


Рис. 25. Шероховатая наноскульптура поверхности граней октаэдрических кристаллов Красновишерского района (р. Волынка). Масштабная линейка – 100 нм

Коррозионные формы микрорельефа, наряду со ступенчатым строением поверхности граней благодаря их слоистому внутреннему строению, также широко распространены и на гранях ромбододекаэдрических кристаллов алмаза (рис. 27).

Скульптура поверхности кубических алмазов заметно отличается от всех остальных наличием неровного холмистого, ячеистого или тонкошероховатого микрорельефа гексаэдрических граней (рис. 28). Более сглаженную форму имеют поверхности сколов по спайности, приуроченных к вершинам кристаллов, а также поверхности ребер (рис. 29, 30).

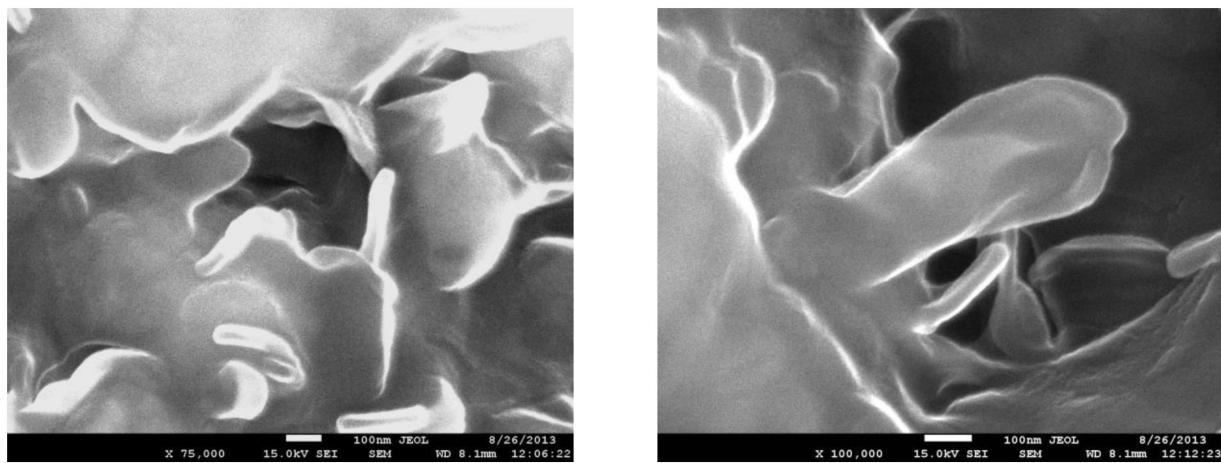


Рис. 26. Своеобразные ростовые микро- и наноформы в углублениях поверхности Кристаллов алмаза, р. Чикман. Масштабная линейка – 100 нм

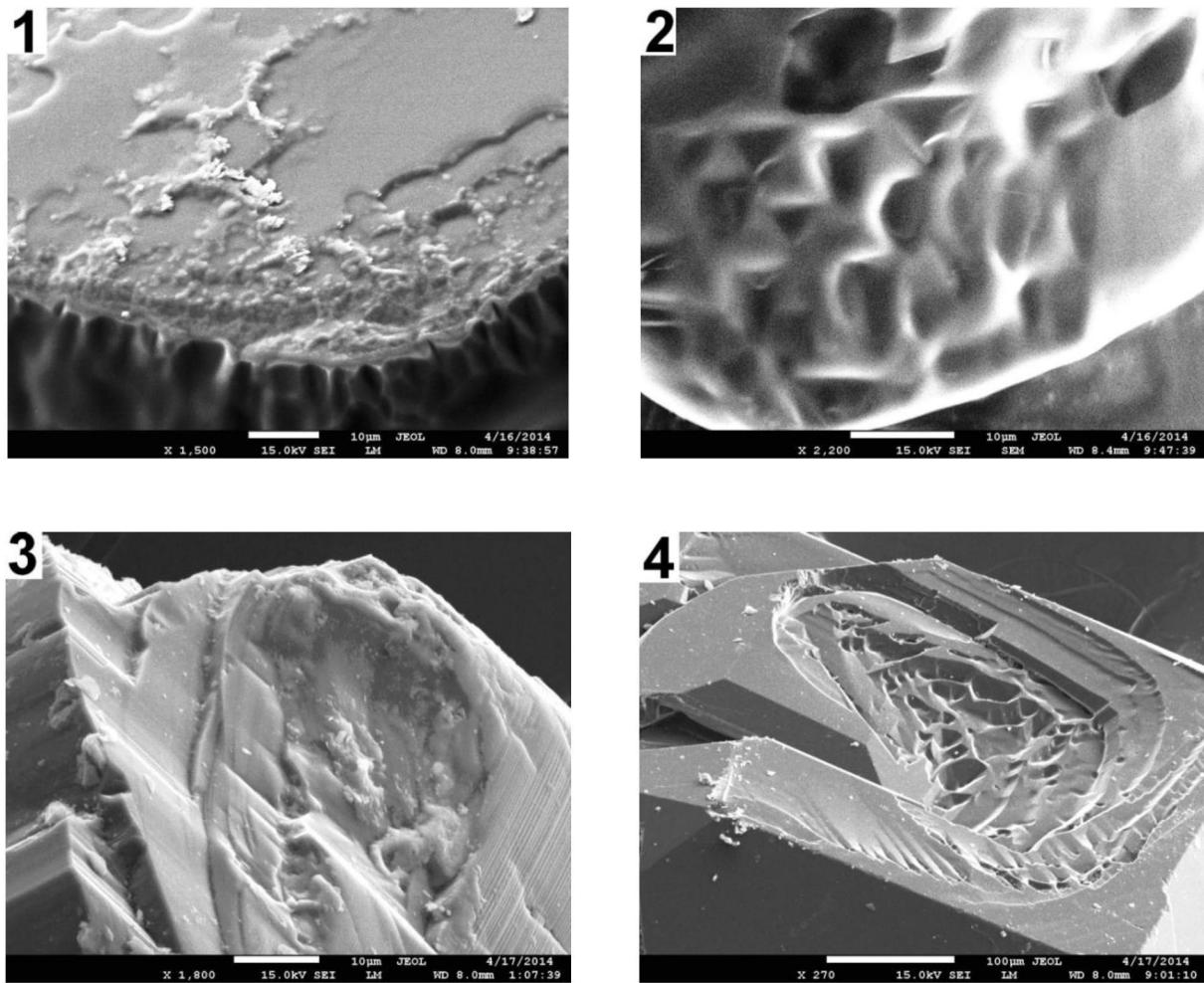


Рис. 27. Коррозионные формы микрорельефа на гранях ромбододекаэдрических алмазов: 1, 2 – р. Б. Щугор; 3, 4 – технические (искусственные) алмазы. Масштабная линейка: 1–3 – 10 мкм, 4 – 100 мкм

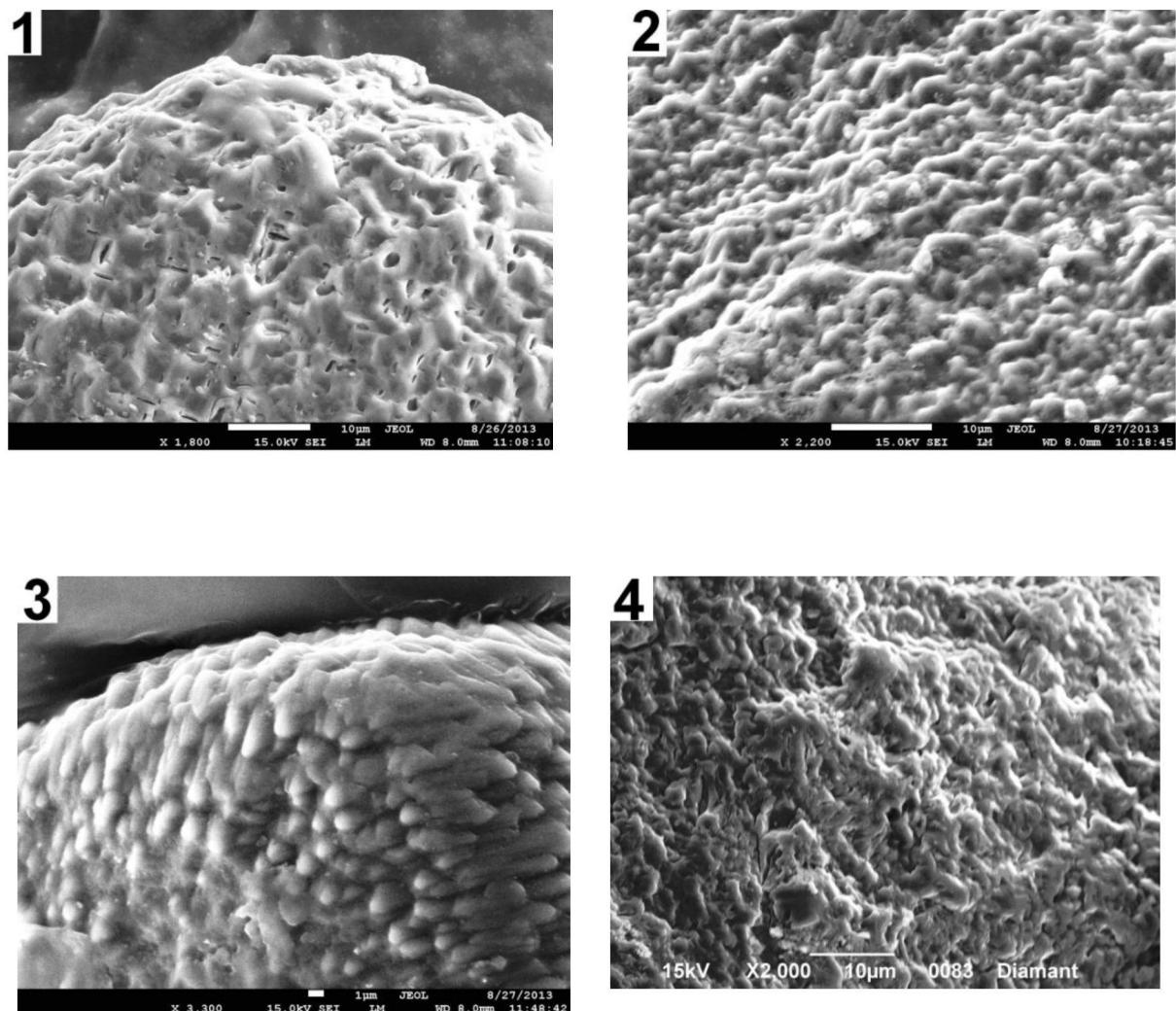


Рис. 28. Характерные типы микроскульптур поверхности кубических алмазов: 1 – р. Чикман; 2 – Ю. Тиман; 3 – р. Волынка; 4 – Вятско-Камская впадина, р. Дозовка.
Масштабная линейка: 1, 2, 4 – 10 мкм, 3 – 1 мкм

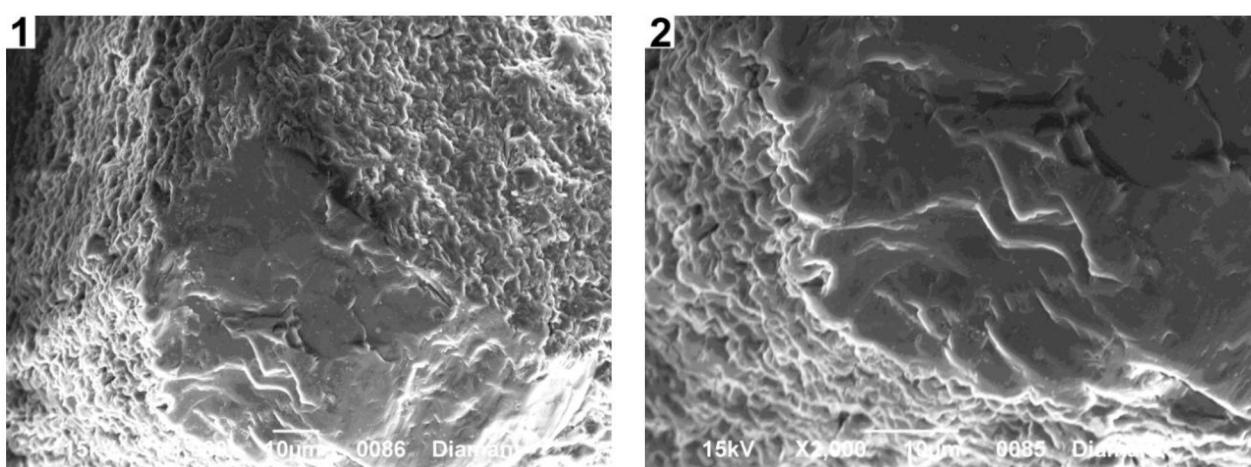


Рис. 29. Участки поверхности сколов по спайности при вершинах кубических кристаллов: Вятско-Камская впадина, р. Дозовка. Масштабная линейка – 10 мкм

На кубических кристаллах довольно отчетливо выделяются два типа строения поверхности граней гексаэдра, осложненных наростами эллипсоидальной или пирамидалной формы (рис. 31). Однако нередко между ними наблюдаются переходные или более сложные формы.

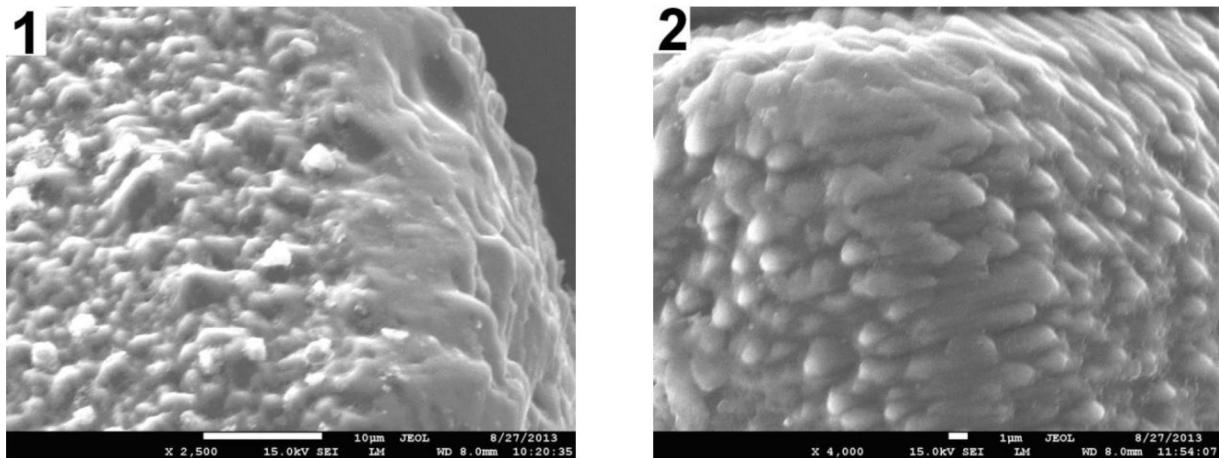


Рис. 30. Микроскульптура поверхности ребер кубических алмазов:
1 – Ю. Тиман, 2 – р. Волынка. Масштабная линейка: 1 – 10 мкм, 2 – 1 мкм

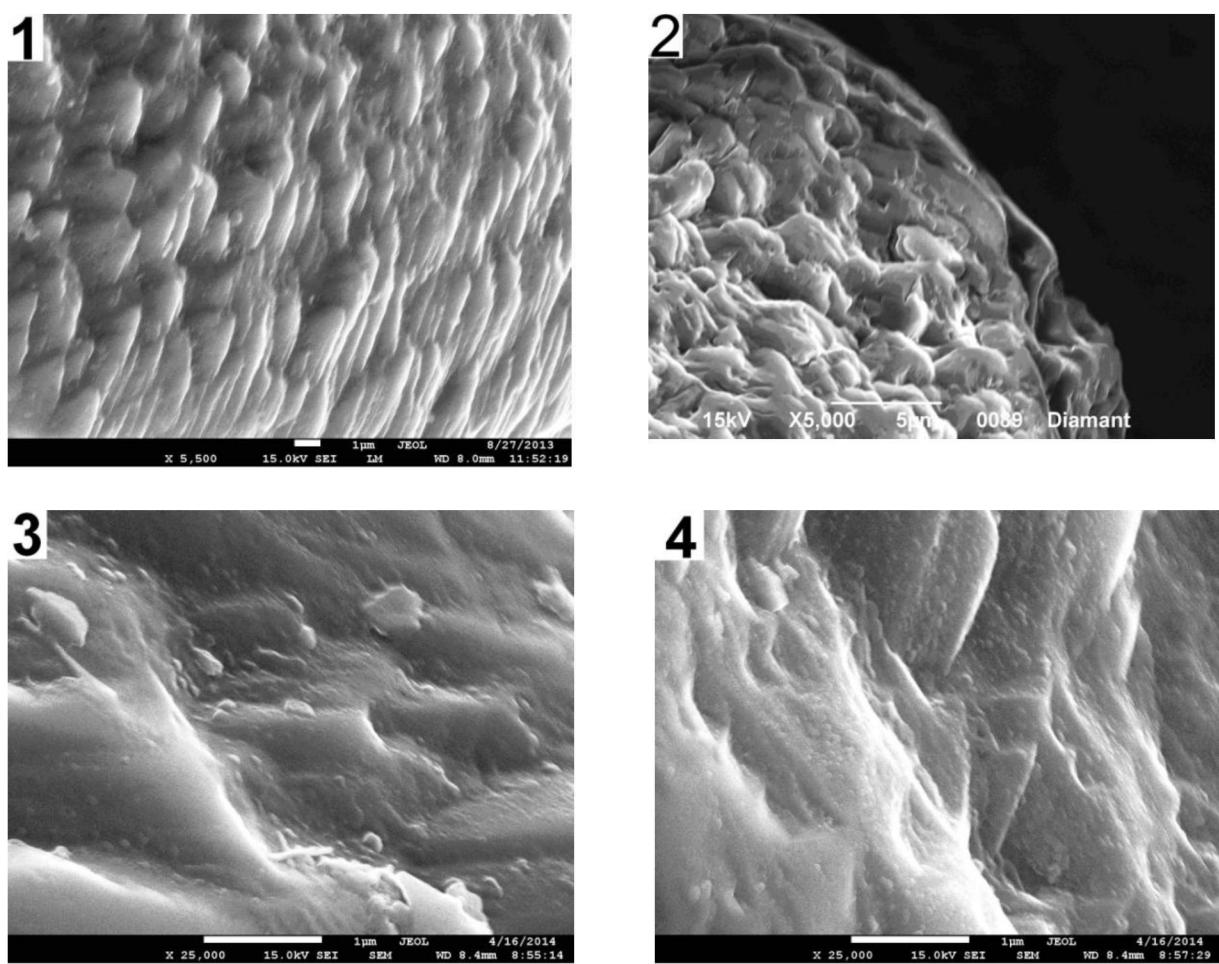


Рис. 31. Строение граней кубических кристаллов с эллипсоидальными и пирамидалными формами микрорельефа: 1 – р. Волынка; 2 – Вятско-Камская впадина; 3, 4 – меловой аллювий, Ю.Урал. Масштабная линейка: 1, 3, 4 – 1 мкм, 2 – 5 мкм

Характерной особенностью поверхности алмазов с оболочкой, которая обычно развита на октаэдрических и ромбододекаэдрических кристаллах, является наличие четко выраженных в микрорельефе уступов на границах распространения оболочки (рис. 32).

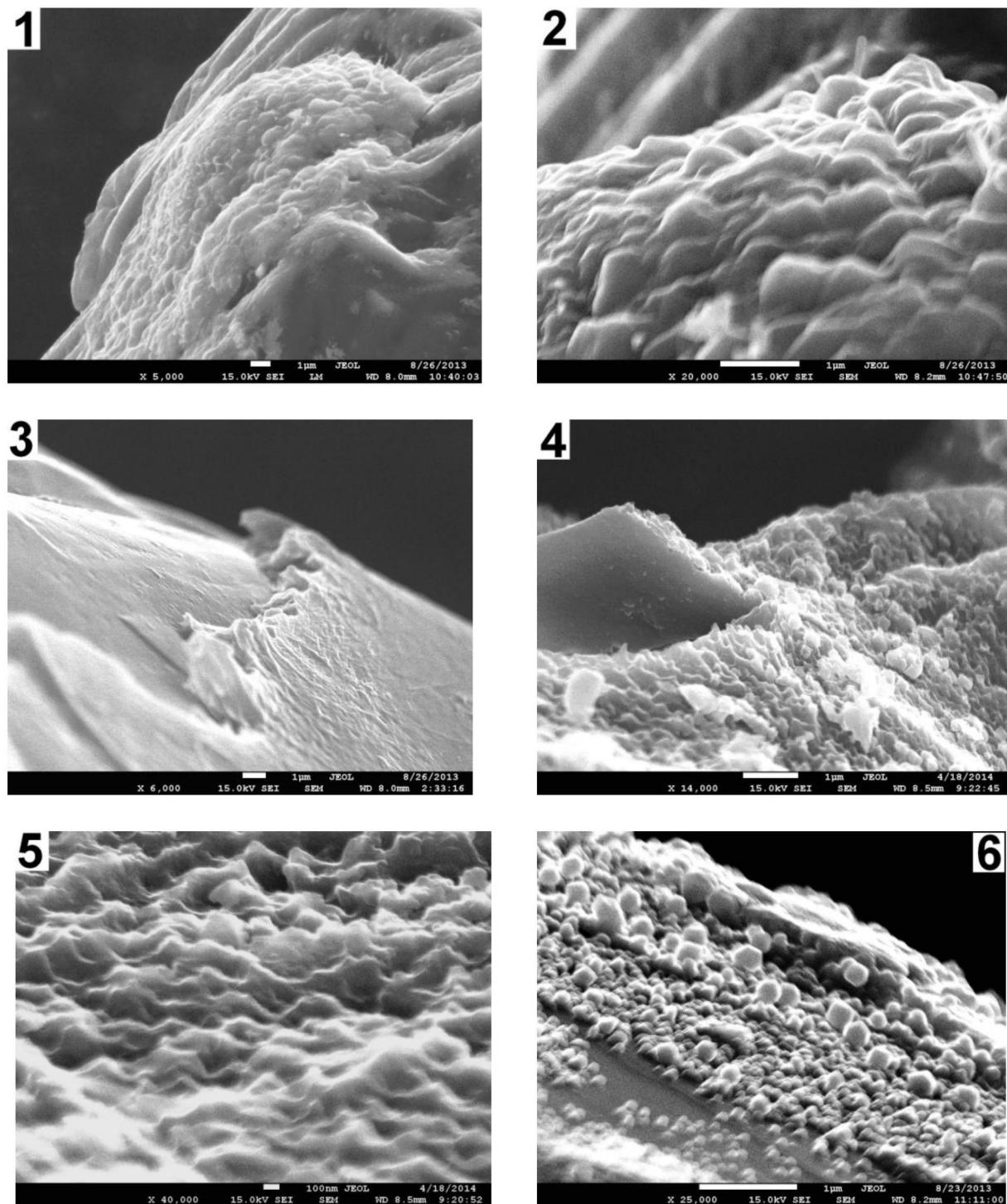


Рис. 32. Фрагменты оболочки на поверхности алмазов: 1, 2 – розовато-серый, р. Волынка; 3 – Ю. Тиман; 4, 5 – осколок, р. Вишера; 6 – р. Волынка. Масштабная линейка: 1–4, 6 – 1 мкм, 5 – 100 нм

Данная оболочка заметно отличается от основной части кристалла своим микрозернистым строением, образованием довольно плотных агрегатов микрозерен. Отсюда наружная поверхность оболочки всегда шероховатая и неровная. В то же время оболочка имеет четкую границу раздела с поверхностью грани центральной части кристалла.

Размеры кристаллитов, слагающих оболочку, составляют единицы и доли микрона. Судя по плотности упаковки зерен в агрегате, между этими кристаллитами присутствует связующая масса микро- и, возможно, нанокристаллической фазы углерода.

3.2. Трещиноватость

Трещиноватость характерна для многих кристаллов мелких алмазов разного генезиса. Однако *импактные* алмазы в этом отношении заметно выделяются, наряду с одиночными, наличием целых систем сближенных микротрещин, локализованных на отдельных участках поверхности. Эти системы различаются по взаимной ориентировке микротрещин в пространстве (параллельные, кольцевые, разветвленные и др.), протяженности, ширине и глубине отдельных микротрещин и т.д. (рис. 33).

Трещиноватость на микроуровне может активно проявляться на отдельных участках поверхности, в то время как другие участки практически не имеют трещин. Установлена также неоднородная структура микротрещин, которые с глубиной обнаруживают ступенчатое строение боковых стенок и дна. Зафиксировано заполнение глубоких микротрещин наноразмерными шарообразными частичками (рис. 34). В зонах выклинивания микротрещины постепенно переходят в нанотрещины, что указывает на более значительное продолжение дефектных участков структуры импактных алмазов.

Сделанные нами электронные изображения участков поверхности с увеличением 25 000 раз и более показали также наличие на поверхности импактных алмазов большого количества изолированных наноразмерных трещин, которые дополняют представление о высокой степени нарушенности их структуры (рис. 35).

Наличие трещиноватости в импактных алмазах является отражением высокой степени напряженности кристаллической решетки, обусловленной экстремальными условиями кристаллизации (давление порядка 10^2 – 10^3 кбар и температура до $10\,000^\circ\text{C}$).

На поверхности граней *кубических* алмазов микротрещины также распространены, но отличаются относительно небольшой протяженностью и приуроченностью только к отдельным ее участкам (рис. 36).

Микротрещиноватость является типичной особенностью и *октаэдрических* алмазов. Наряду с легко заметными по протяженности и ширине микротрещинами, нередко присутствуют и нанотрещины (рис. 37).

Встречаются как одиночные, так и системы пересекающихся и разветвляющихся микротрещин. Обычно в местах их пересечения или разветвления

образуются более широкие и глубокие провалы. По протяженности на поверхности кристалла выделяются относительно короткие трещины длиной до нескольких десятков микрон. Однако встречаются и более протяженные, представляющие собой, по существу, трещиноватые зоны, распространяющиеся на всю поверхность грани. Местами они могут переходить в нанотрещины и прерываться, но затем вновь появляются на поверхности (рис. 38).

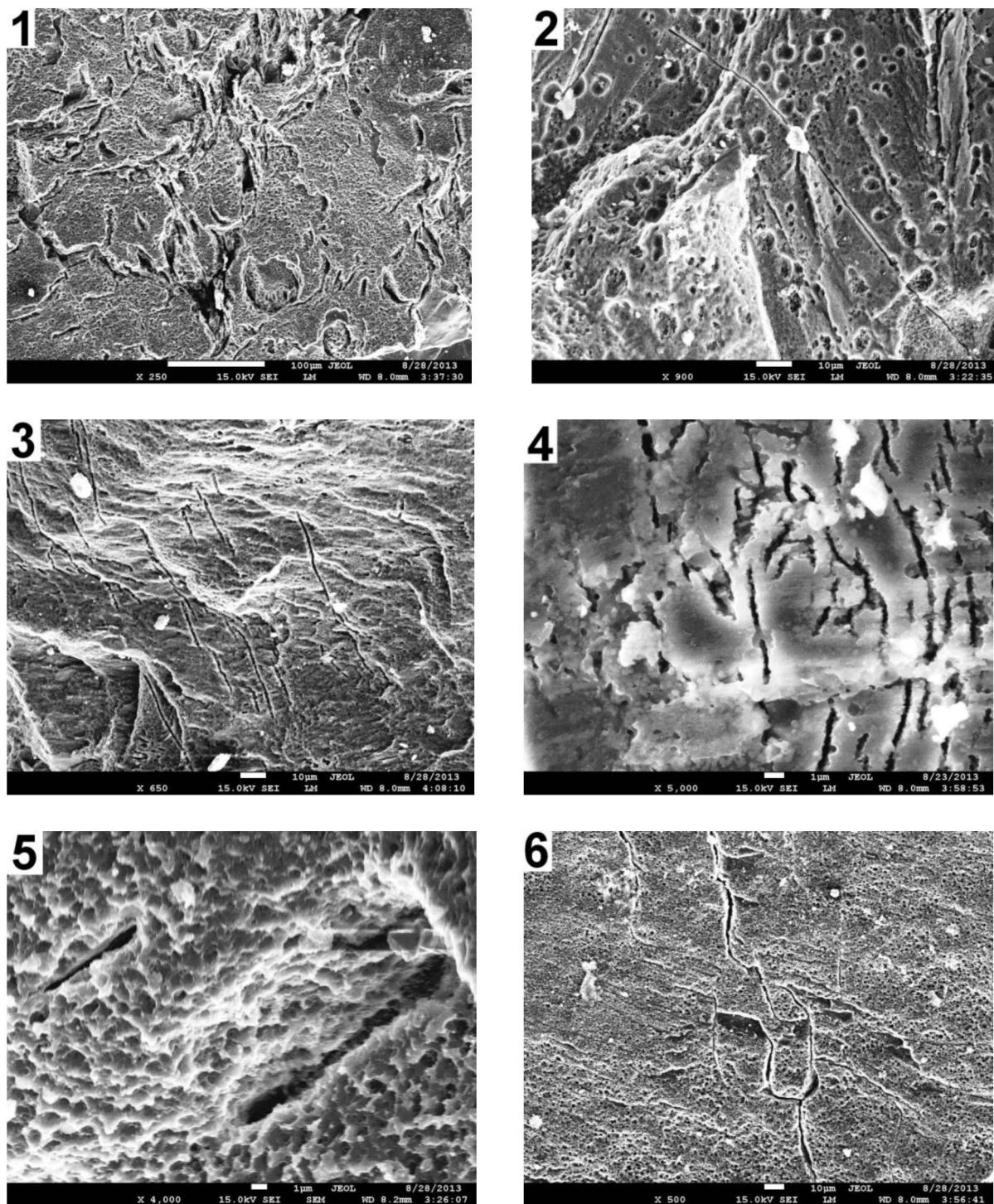


Рис. 33. Микротрещины на поверхности импактных алмазов: 1–3, 5, 6 – Попигайская астроблема; 4 – Красновишерский район. Масштабная линейка: 1 – 100 мкм; 2, 3, 6 – 10 мкм; 4, 5 – 1 мкм

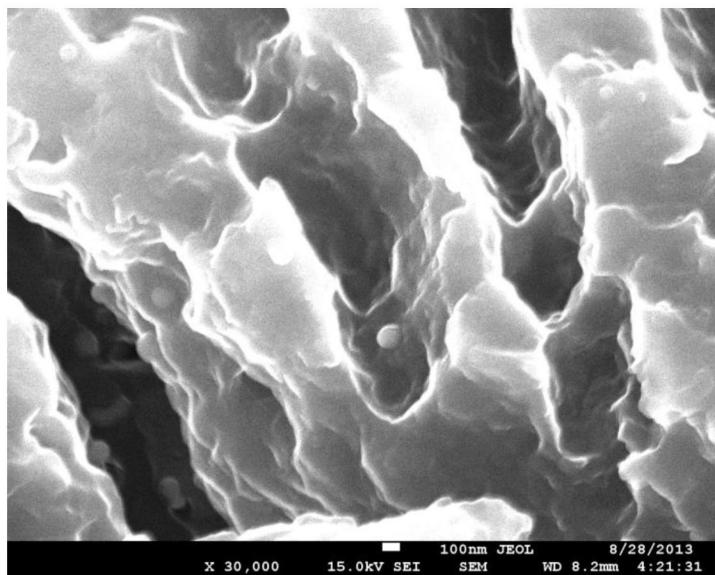


Рис. 34. Глубокие микротре-
щины на поверхности импактного
алмаза (Попигайская астроблема).
Масштабная линейка – 100 нм

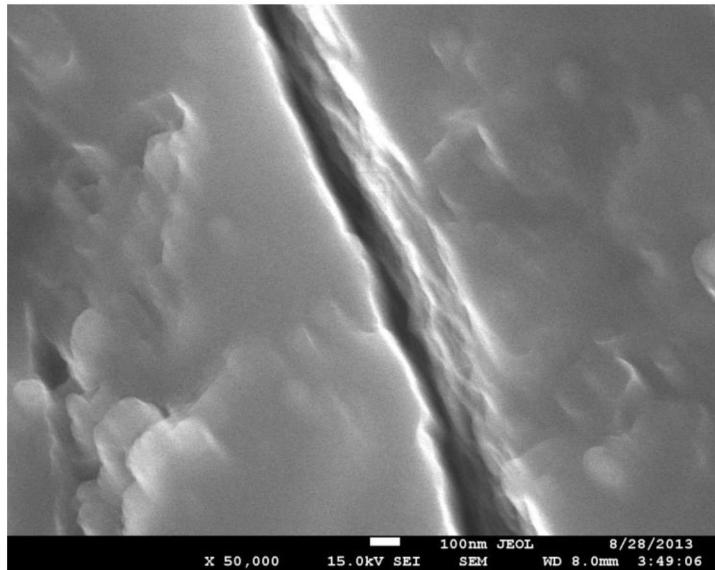


Рис. 35. Изолированная нанотре-
щина на поверхности зерна им-
пактного алмаза (Попигайская аст-
роблема). Масштабная линейка –
100 нм

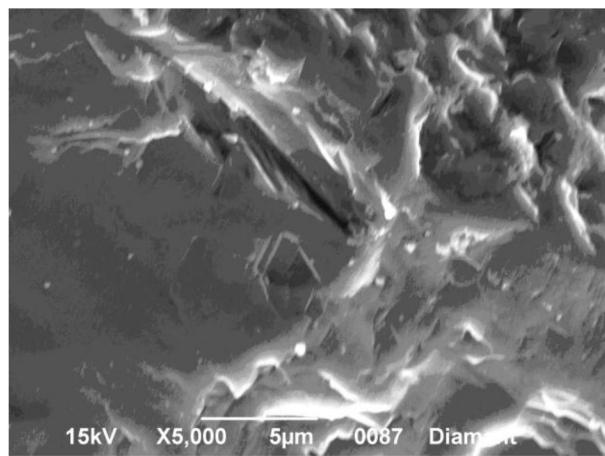
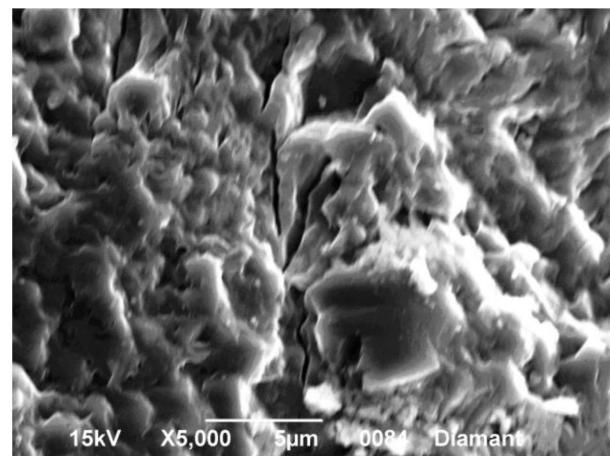


Рис. 36. Микротре-
щины на поверхности кубических кристаллов алмаза,
Вятско-Камская впадина. Масштабная линейка – 5 мкм

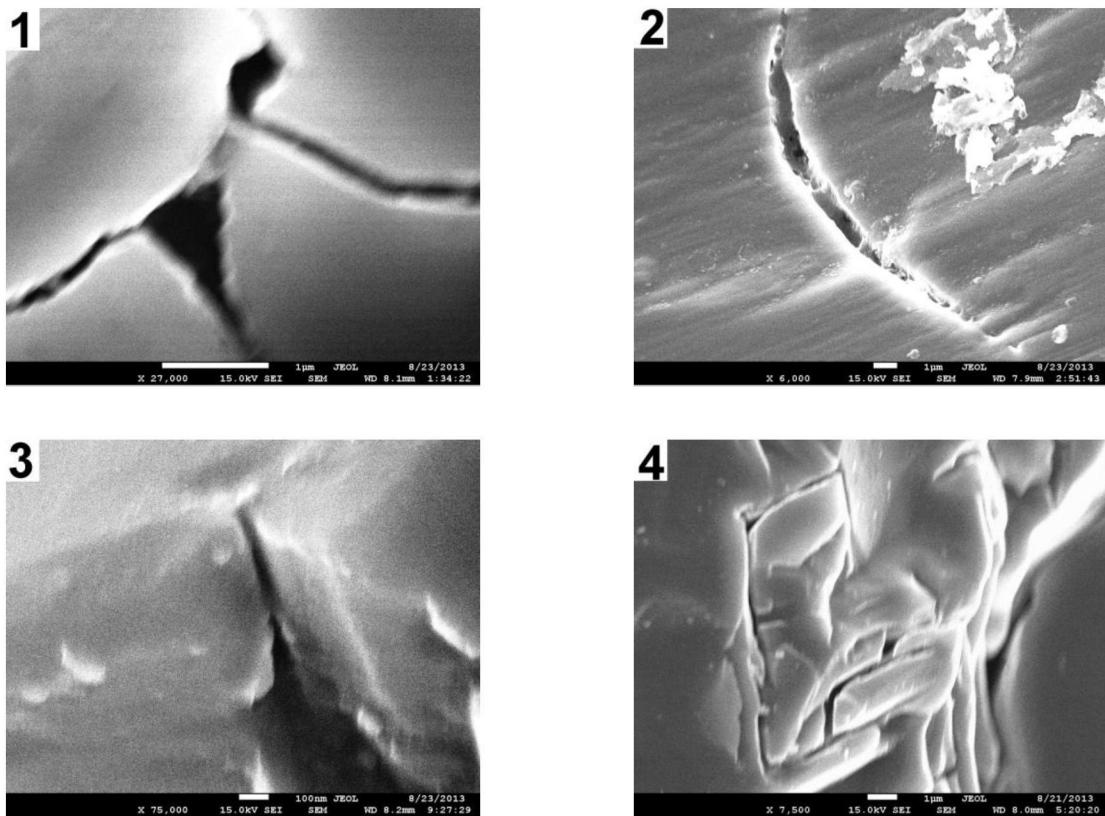


Рис. 37. Микро- и нанотрещины на поверхности октаэдрических алмазов, р. Волынка.
Масштабная линейка: 1, 2, 4 – 1 мкм; 3 – 100 нм

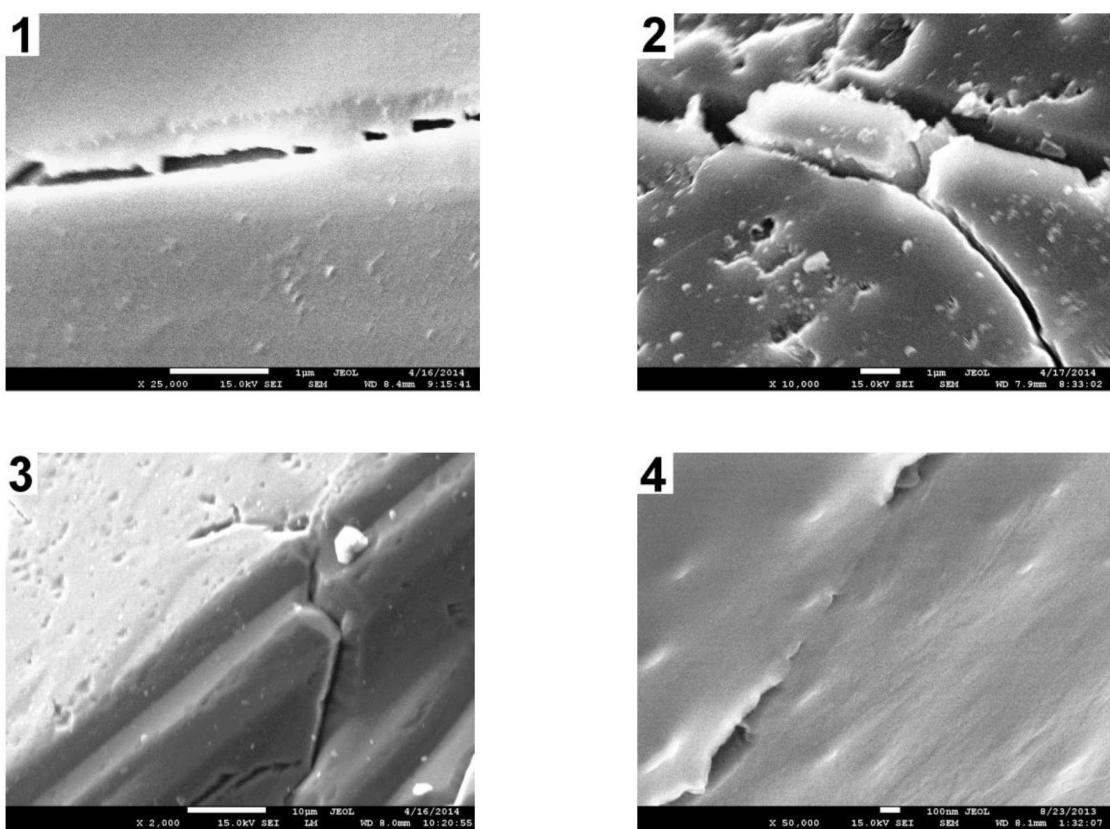


Рис. 38. Фрагменты протяженных трещиноватых зон на поверхности граней октаэдра:
1, 3 – р. Вижай; 2 – технический (искусственный) алмаз; 4 – р. Волынка.
Масштабная линейка: 1, 2 – 1 мкм, 3 – 10 мкм, 4 – 100 нм

3.3. Пористость и кавернозность

Наличие разного рода углублений окружной, овальной и неправильной формы как типичных поверхностных дефектов – широко распространенное явление для мелких алмазов. Среди них можно выделить наиболее мелкие окружные и овальные сравнительно неглубокие ямки (поры) и более крупные по размерам неправильной формы углубления, уходящие в глубь поверхности (каверны).

Высокая степень дефектности типична, прежде всего, для поверхности импактных алмазов. На ней присутствуют разнообразные углубления неправильной формы, которые имеют разную глубину. В частности, многие из них пронизывают несколько приповерхностных слоев (рис. 39). Каверны нередко сочетаются с системами микротрещин и, вероятно, отражают наличие в алмазах зон высокой степени нарушенности кристаллического строения.

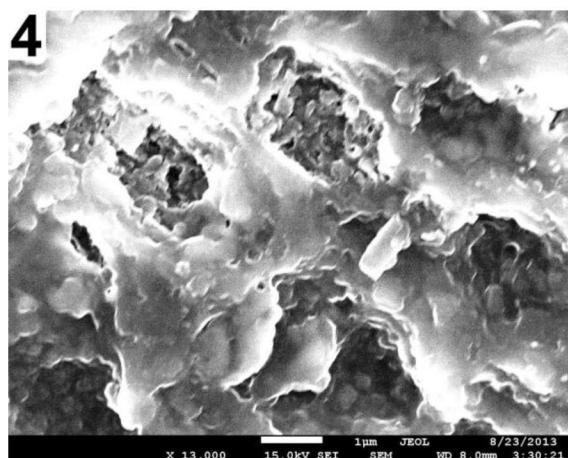
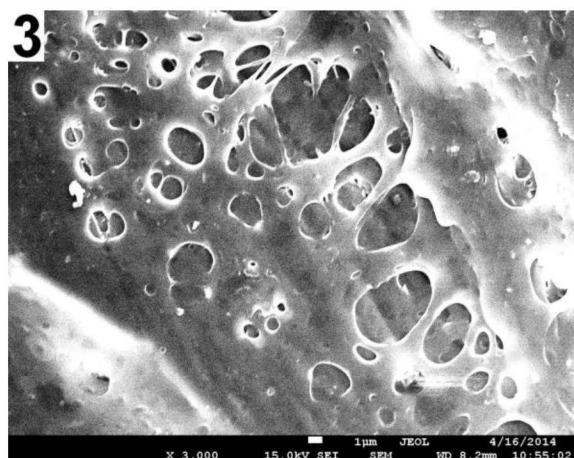
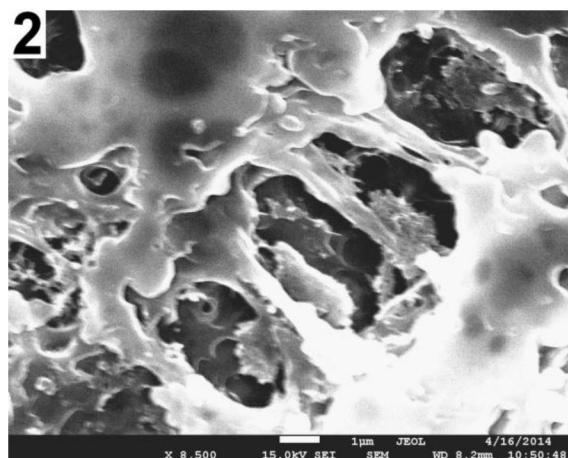
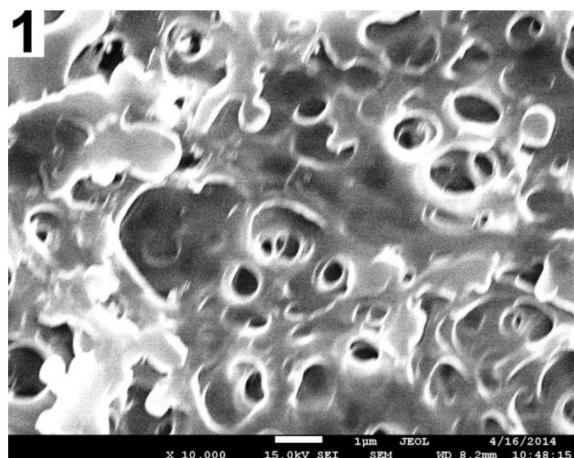


Рис. 39. Микропоры и каверны на поверхности импактных алмазов:
1, 2, 3 – Яйвинский алмазоносный район, р. Чикман; 4 – Красновишерский р-н.
Масштабная линейка – 1 мкм

Наличие большого количества микропор также характерно для отдельных участков поверхности импактных алмазов. На других участках они встречаются достаточно редко. Обычно микропоры имеют округлую и овальную формы, реже близкую к геометрически правильной (квазишестиугольной, квазичетырехугольной и др.). Размеры микропор обычно составляют единицы микронов и варьируют в сравнительно небольших пределах. Присутствие более крупных по размерам гантелеобразных и других сложных по форме пор является результатом перекрытия нескольких соседних микропор, разновременных по образованию. В целом пористый микрорельеф поверхности импактных алмазов напоминает лунный ландшафт в миниатюре.

В составе систем микропор и каверн присутствует определенное количество и наноуглублений разной формы (рис. 40). Вероятно, некоторая их часть перекрыта вышележащими приповерхносными слоями. Можно утверждать, что значительное количество микропор и каверн с глубиной постепенно переходит в нанопоры.

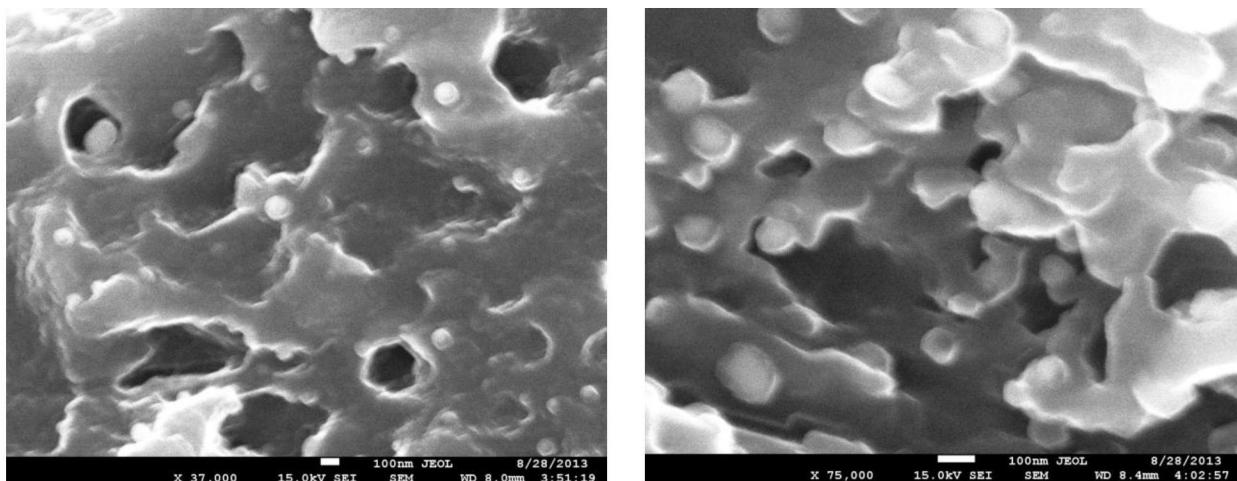


Рис. 40. Наноразмерные поры на поверхности импактных алмазов Попигайской астроблемы. Масштабная линейка – 100 нм

Высокая пористость и кавернозность импактных алмазов является следствием неравномерного распределения углеродистого вещества в исходной породе, подвергшейся ударному метаморфизму. Поэтому они особенно характерны для апоугольных разностей (Квасница и др., 1999).

На поверхности граней октаэдрических кристаллов также присутствуют овальные и неправильной формы углубления, природа которых может быть различной. Микропоры окружной формы обычно локализуются на отдельных участках поверхности октаэдрических кристаллов, образуя различные группировки. Нередко микропоры, имеющие диаметр в доли микрона, концентрируются в пределах округлого, более крупного по размерам понижения на поверхности грани. Это указывает на стадийный характер растворения участка грани. По мере развития процесса отдельные поры соединяют-

ся друг с другом, а далее процесс переходит на более глубокий уровень и начинается с образования небольших пор (рис. 41).

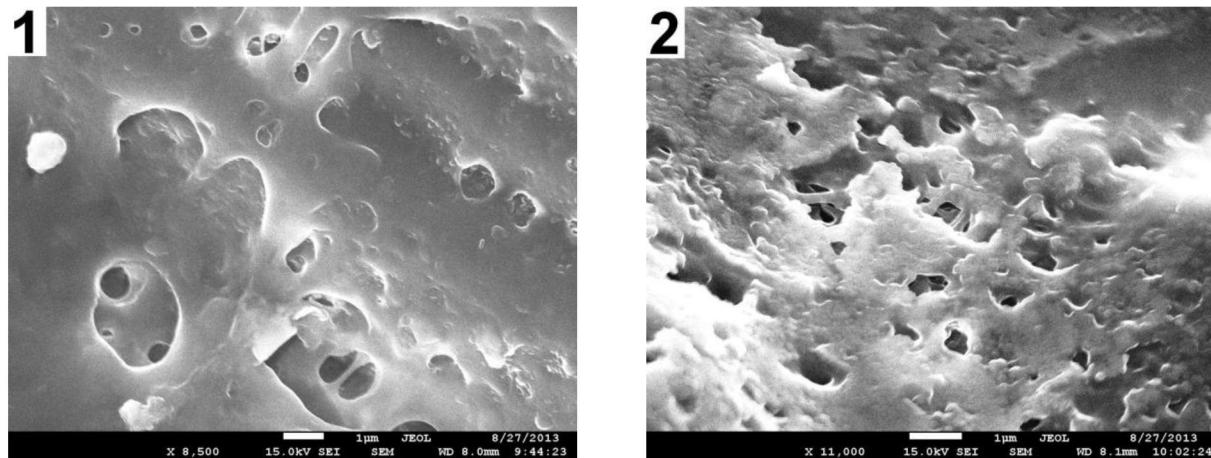


Рис. 41. Микропоры на поверхности граней куба (1) и октаэдра (2), Ю. Тиман.
Масштабная линейка – 1 мкм

Некоторые из них по размерам являются наноразмерными или приближаются к ним. Во многих случаях форма таких углублений в той или иной мере приближается к геометрически правильной (рис. 42). На этом основании их можно отнести к микроформам, образованным в нестабильных условиях растворения. Переход на наноразмерный уровень происходит в наиболее глубоких частях данных дефектов поверхности. Помимо микропор на поверхности граней октаэдров встречаются относительно неглубокие коррозионные рытвины, нередко группирующиеся на отдельных участках в системы параллельно ориентированных углублений.

Микропоры присутствуют также на поверхности гексаэдрических граней мелких кубических алмазов. Они представляют собой разрозненные микроуглубления округлой формы размером обычно менее 1 мкм (рис. 43).

3.4. Углубления геометрически правильной формы

На поверхности кристаллов природных алмазов обнаружено несколько видов углублений правильной геометрической формы. Все они отражают интенсивность и особенности процессов мантийного растворения алмазов. Форма этих углублений зависит как от морфологического типа кристалла, так и от условий среды. Так, в присутствии флюидной фазы с различными пропорциями CO_2 и H_2O на поверхности алмазов образуются дитригональные или обратнопараллельные тригональные формы углублений. Присутствие кремнезема приводит к образованию более сложных многогранных форм. Карбонатный расплав при отсутствии воды обуславливает образование гексагональных и обратнопараллельных глубоких ступенчатых тригональных углублений (Fedortchuk et al., 2014).

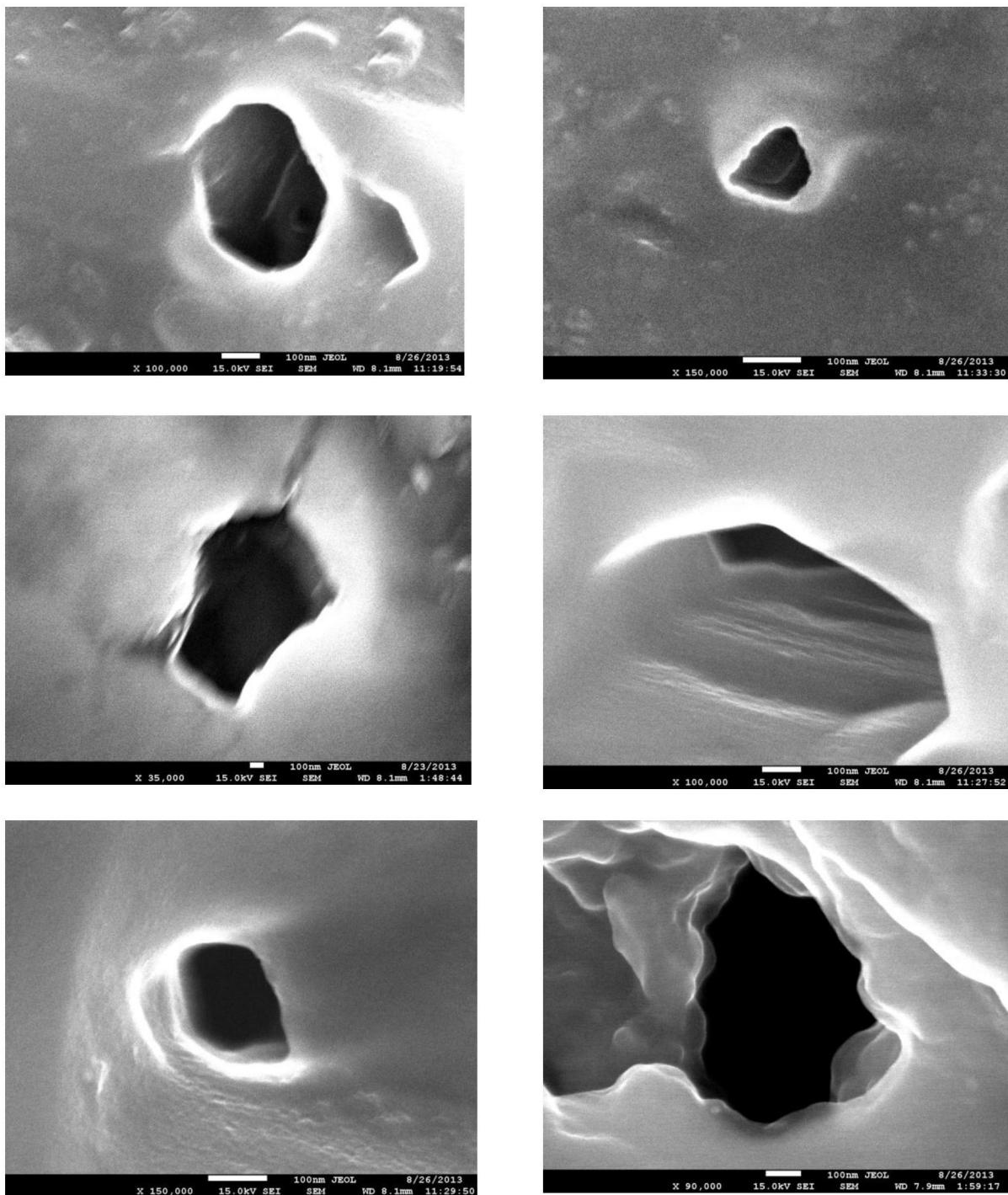


Рис. 42. Локальные микро- и наноразмерные углубления на поверхности кубических граней (р. Чикман). Масштабная линейка – 100 нм

Например, разнообразные микроуглубления правильной геометрической формы особенно характерны для поверхности октаэдрических алмазов мелких классов. Среди них наиболее распространены ромбические, треугольные, четырехугольные и шестиугольные. Происхождение того или иного вида углублений связано с особенностями процессов растворения алмазов в мантийных условиях. В частности, обратнопараллельные треугольные впа-

дины образуются при кристаллизации в условиях высоких температур и низкой фугитивности кислорода, в то время как прямопараллельные – при низких температурах и высокой фугитивности кислорода (Квасница и др., 1999). Слабо выраженные треугольные впадины фиксируют начало процесса растворения (Кудрявцева и др., 2005).

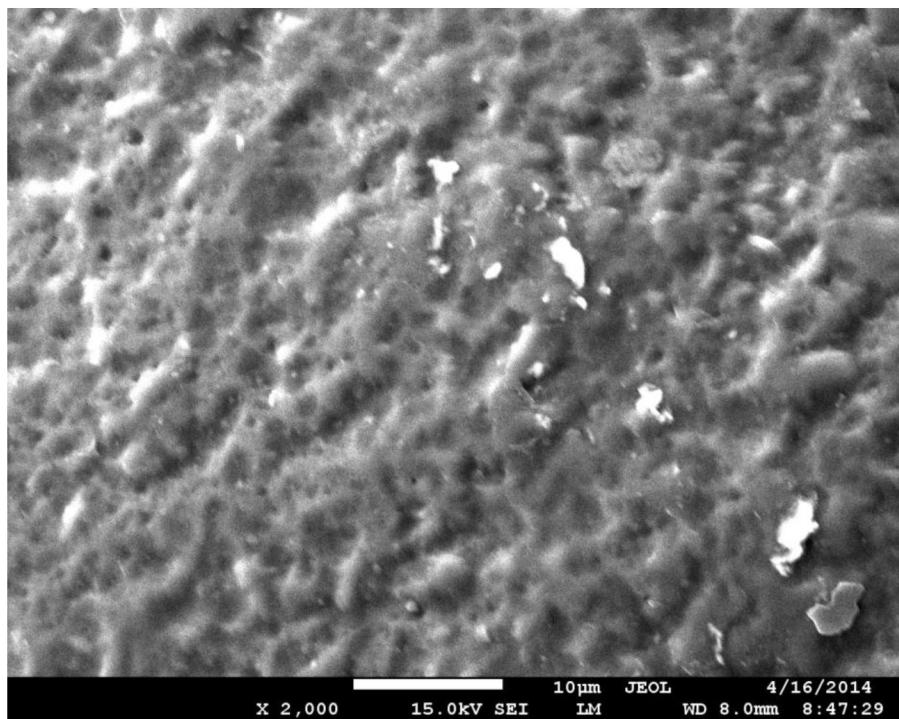


Рис. 43. Микропоры на поверхности грани кубического алмаза (Ю.Урал, меловой аллювий). Масштабная линейка – 10 мкм

На поверхности изученных нами мелких октаэдрических кристаллов наиболее распространены треугольные углубления, имеющие различные размеры (от нескольких до 1 мкм и менее). Они образуют закономерно расположенные в пространстве системы, приуроченные к отдельным участкам поверхности, вероятно, наиболее подвергнутым влиянию агентов агрессивной внешней среды. Характерной особенностью треугольных углублений является наличие многоступенчатой поверхности снижения к центру. Исследования на атомно-силовом микроскопе позволили наблюдать многочисленные последовательные ступеньки снижения высотой порядка 20–40 нм (Fedortchuk et al., 2011). Одной из причин, способствующих формированию такой поверхности, является дефектность кристаллической решетки алмаза, в частности наличие вакансационных кластеров (Bangert et al., 2009).

Аналогичные системы образованы и ромбическими углублениями. Четырехугольные отрицательные пирамиды на поверхности относительно редки. Шестиугольные углубления встречаются еще реже и часто имеют несколько искаженную форму (рис. 44).

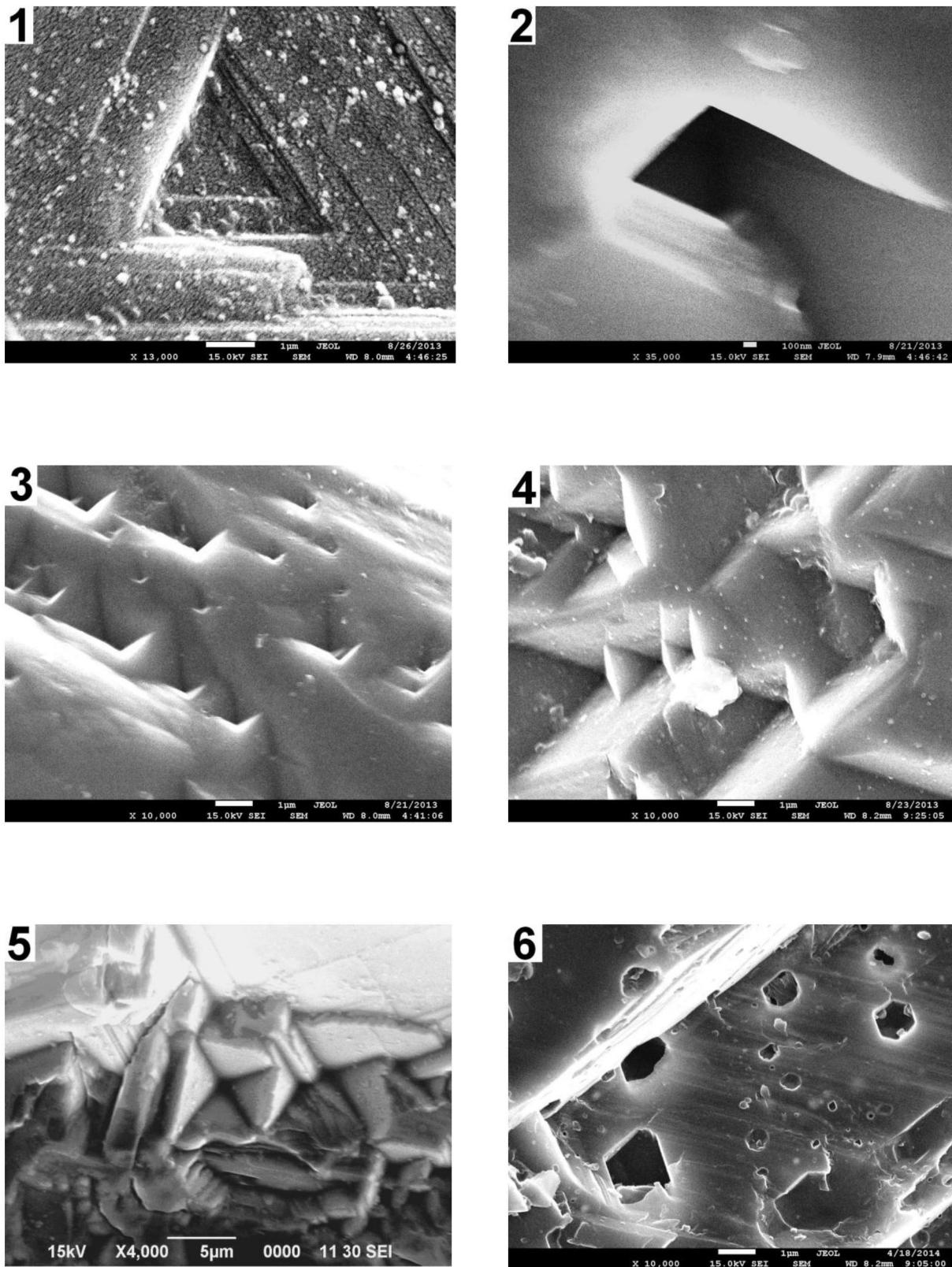


Рис. 44. Углубления правильной геометрической формы на поверхности алмазов: 1 – октаэдр, Ю. Тиман; 2, 3, 4 – ромбододекаэдры, р.Волынка; 5 – Вятско-Камская впадина; 6 – технический (искусственный алмаз). Масштабная линейка: 1, 3, 4, 6 – 1 мкм, 2 – 100 нм, 5 – 5 мкм

3.5. Пирамиды нарастания

Наряду с отрицательными микроформами рельефа поверхности, которые являются признаками растворения, на гранях мелких алмазов часто встречаются геометрически правильные положительные микроформы, которые, наоборот, относятся к формам роста. В частности, типичными формами роста являются пирамиды нарастания, которые нередко наблюдаются на ровных и относительно гладких гранях октаэдрических кристаллов.

Для пирамид нарастания характерно сложное полигональное строение с многочисленными наростами подчиненных по размерам пирамидок. Наиболее крупные по размерам пирамиды нарастания на мелких кристаллах алмаза достигают 30–50 мкм в длину и 10–20 мкм в высоту. Однако между крупными формами присутствует множество аналогичных более мелких, размеры которых не превышают нескольких микронов (рис. 45).

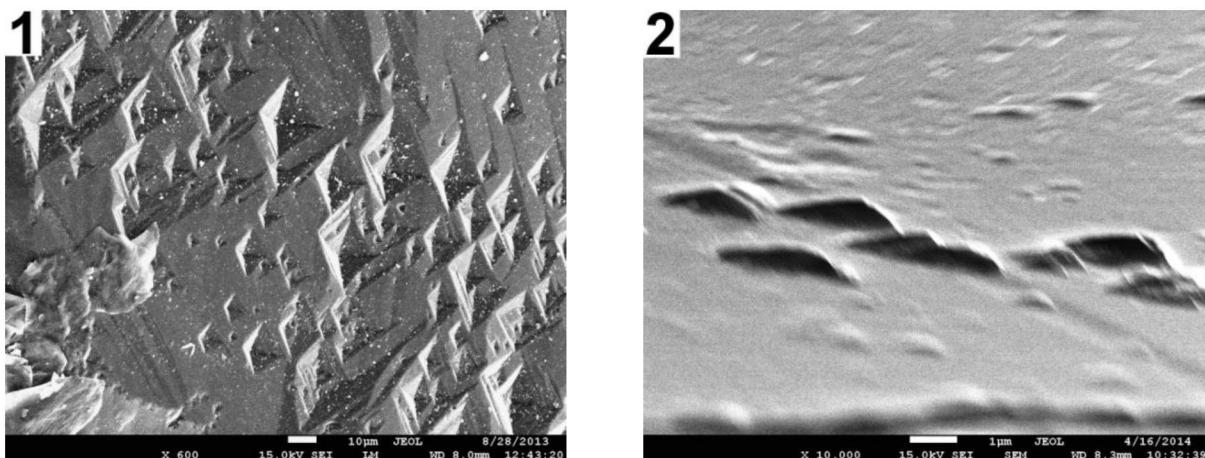


Рис. 45. Пирамиды нарастания на гранях алмазов: 1 – ромбододекаэдр, трубка Мир; 2 – октаэдр, р. Вижай. Масштабная линейка: 1 – 10 мкм, 2 – 1 мкм

3.6. Бугорчатость поверхности

Другими положительными микроформами рельефа поверхности, которые предположительно также относятся к ростовым, являются группировки гребнеобразных параллельно ориентированных наростов, не имеющих правильной геометрической формы.

Бугорчатый микро- и нанорельеф граней благородных металлов был установлен нами ранее (Осовецкий, 2012). Аналогичное строение имеют определенные участки граней алмаза. Системы микро- и нанобугорков на поверхности октаэдрических граней нередко вытянуты в определенном направлении, не совпадающем с направлением слоистости.

Наросты также наблюдаются на гранях ромбододекаэдрических кристаллов, где они иногда образуют скопления значительной протяженности (рис. 46, 47).

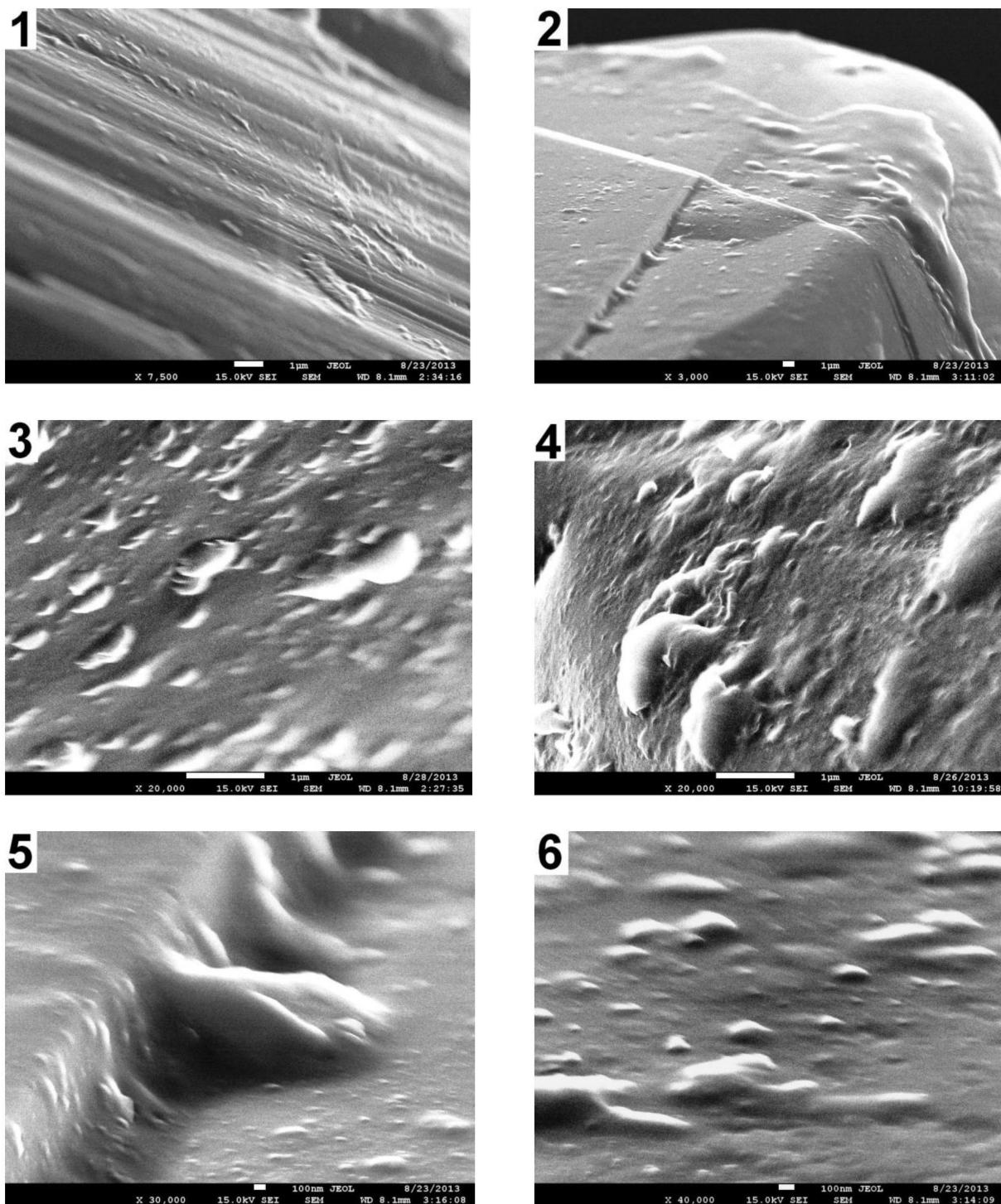


Рис. 46. Фрагменты бугорчатой поверхности на гранях алмаза: 1 – ромбододекаэдр, р. Волынка; 2, 5, 6 – ромбододекаэдр, р. Вишера; 3 – октаэдр, р. Вижай; 4 – октаэдр, р. Вишера. Масштабная линейка: 1–4 – 1 мкм, 5, 6 – 100 нм

Высота бугорков над поверхностью грани обычно составляет доли микрона. Соседние из них нередко соединяются друг с другом, образуя вытянутую цепь возвышений.

Одной из причин образования таких микроформ поверхности считаются различные флуктуации процесса роста реального кристалла. Формирование неровной поверхности грани кристалла обусловлено агрегацией частиц

питающего флюида, которая никогда не может быть равномерной, перед их присоединением к растущей грани (Шефтель, Кисенко, 1977).

Однако проведенными экспериментами по протравливанию поверхности природных алмазов доказано также появление аналогичных форм. Такие эксперименты были поставлены с использованием флюидов, обогащенных углекислотой и хлоридом натрия, при высоком давлении. Для проведения исследований использовались природные октаэдрические алмазы кимберлитов размером менее 2 мм. Условия эксперимента: давление 1 ГПа, температура в пределах 800–1350°C. Результаты экспериментов наблюдались путем изучения поверхности в атомно-силовом микроскопе (Fedortchuk et al., 2011).

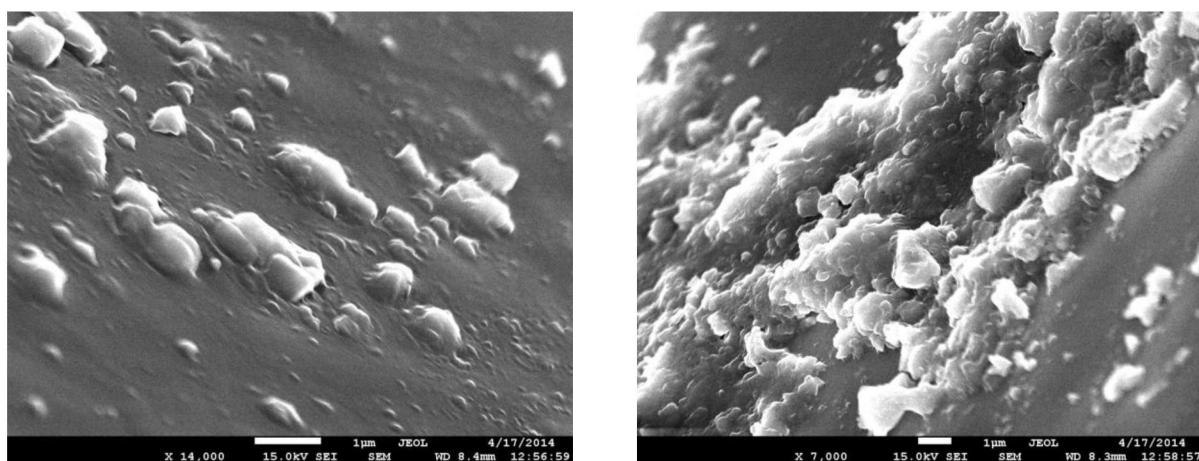


Рис. 47. Бугорчатые наросты на гранях ромбододекаэдрических кристаллов (Ю. Тиман).
Масштабная линейка – 1 мкм

Характерно, что только один из четырех кристаллов сохранил первоначальную октаэдрическую форму благодаря незначительной потере массы. Остальные кристаллы полностью изменились из-за существенного уменьшения в размерах (потеря массы 50–60%). На образовавшихся в результате протравливания бугорках присутствовали многочисленные ступеньки растворения высотой около 0,4 нм. Основная масса бугорков сгруппировалась в пространстве с некоторой степенью периодичности.

3.7. Слоистость

Слоистость, в отличие от рассмотренных выше дефектов поверхности алмазов, является типичным свойством, отражающим одно из проявлений на поверхности закономерностей их внутреннего строения.

Слоистое строение *импактных* алмазов наиболее отчетливо проявляется на поперечных сколах, ориентированных перпендикулярно поверхности «сланцеватых» зерен. На таких сколах может быть оценена толщина отдельных слойков, которая составляет единицы и доли микрона (рис. 48). Нерав-

номерное выклинивание слойков на сколах поверхности зерен обуславливает характерный для импактных алмазов ступенчатый микрорельеф.

Слоистое строение «сланцеватых» разностей импактных алмазов является результатом срастания гексагональных пластинчатых кристаллитов толщиной от сотых до десятых долей миллиметра (Квасница и др., 1999). Оно типично для апографитовых разностей и, таким образом, отражает унаследование импактным индивидом слоистого строения родоначальной углеродистой фазы.

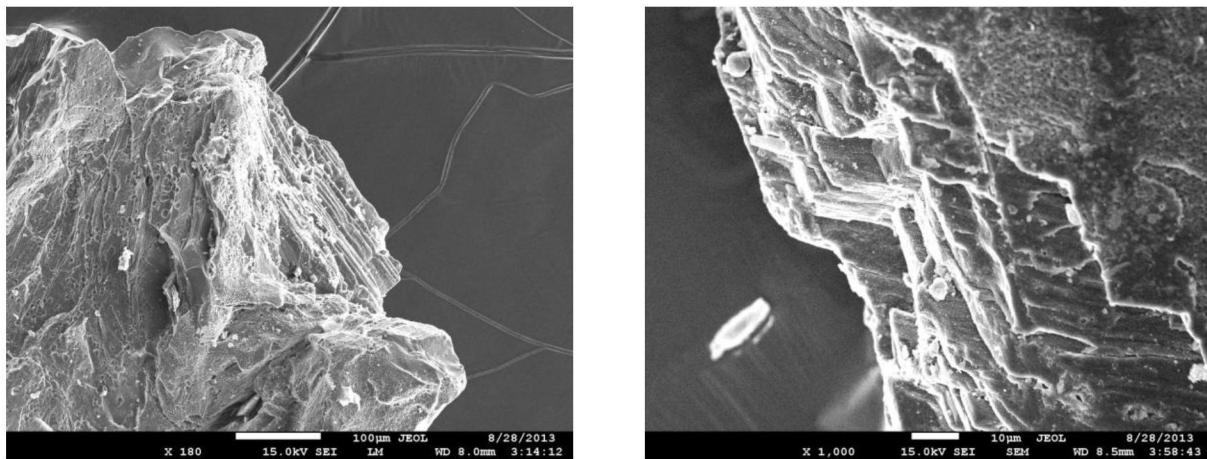


Рис. 48. Выходы микрослойков на поперечных сколах зерен импактных алмазов (Попигайская астроблема). Масштабная линейка: слева – 100 мкм, справа – 10 мкм

Исследование микрослоистости импактных алмазов под электронным микроскопом показало, что основными единицами их структуры являются микро- и нанослоечки. Выявляются многочисленные нарушения слоистого строения за счет разного рода внутренних дефектов. В связи с этим отмечены прерывистость слоистости на поверхности и на сколах зерен, многочисленные разрывы их сплошности и другие дефекты (рис. 49).

Микрослоистость октаэдрических алмазов заметно отличается от таковой импактных зерен. Прежде всего, это различие проявляется в виде тонкой штриховки или ступенчатого микрорельефа их поверхности граней. При этом характер внешнего выражения слоистости на гранях в деталях индивидуален для каждого кристалла.

При вертикальном расположении или близком к вертикальному относительно поверхности грани микрослойки отчетливо проявляются как округлые выпуклые протяженные формы микрорельефа поверхности грани параллельной ориентировки с ложбинами между ними (рис. 50). Отдельные слойки различаются по ширине и относительной высоте над поверхностью. Причем нередко наблюдаются две системы микрослойков. Одни имеют ширину порядка 0,5–1 мкм и в основном формируют характер микрорельефа грани. Другие имеют подчиненный характер, отличаются меньшей шириной

(0,1–0,2 мкм) и небольшой высотой. Последние встречаются поодиночке между более крупными микрослойками или группируются в пачки, состоящие из нескольких микрослойков.

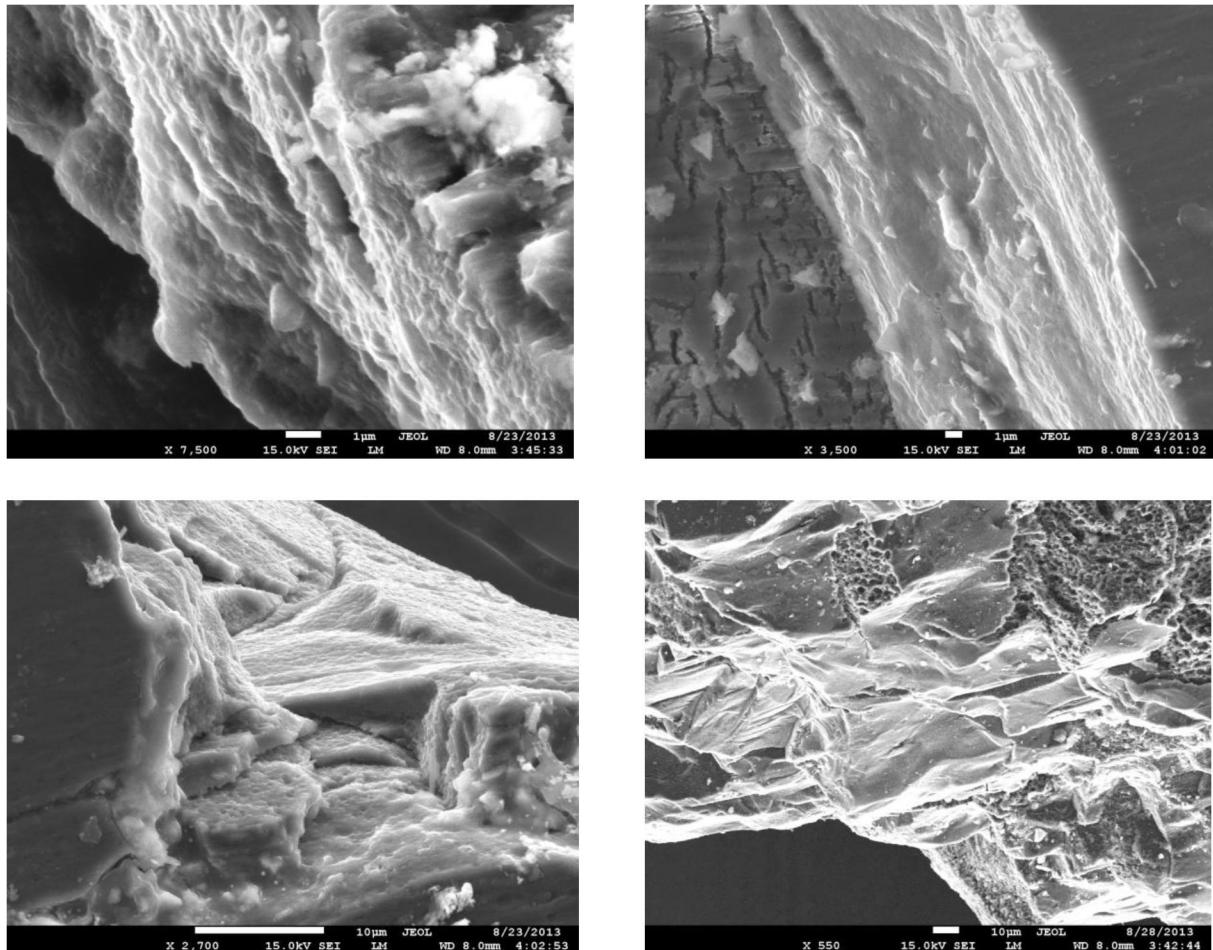


Рис. 49. Формы проявления слоистого строения импактных алмазов Красновишерского района. Масштабная линейка: вверху – 1 мкм, внизу – 10 мкм

При более детальном рассмотрении в составе слоистых пачек наблюдаются отдельные нанослоечки или даже их группы (рис. 51).

Однако чаще микрослойки располагаются параллельно граням октаэдра. В данном случае слоистое строение кристалла проявляется в некоторых характерных формах микрорельефа, видимых на поверхностях раскола. В частности, весьма часто на гранях наблюдаются разнообразные формы выклинивания отдельных микрослойков (рис. 52).

При использовании более высокого увеличения отчетливо видно, что выклиниваются целые пачки слоев, которые, в свою очередь, состоят из слоёчков подчиненного по толщине уровня, часто соответствующего наноразмерному. На уступах выклинивающихся слоев на стенках трещин и сколов наблюдаются признаки различия в строении отдельных пачек, которые проявляются в образовании ровных или, наоборот, неровных поперечных сечений.

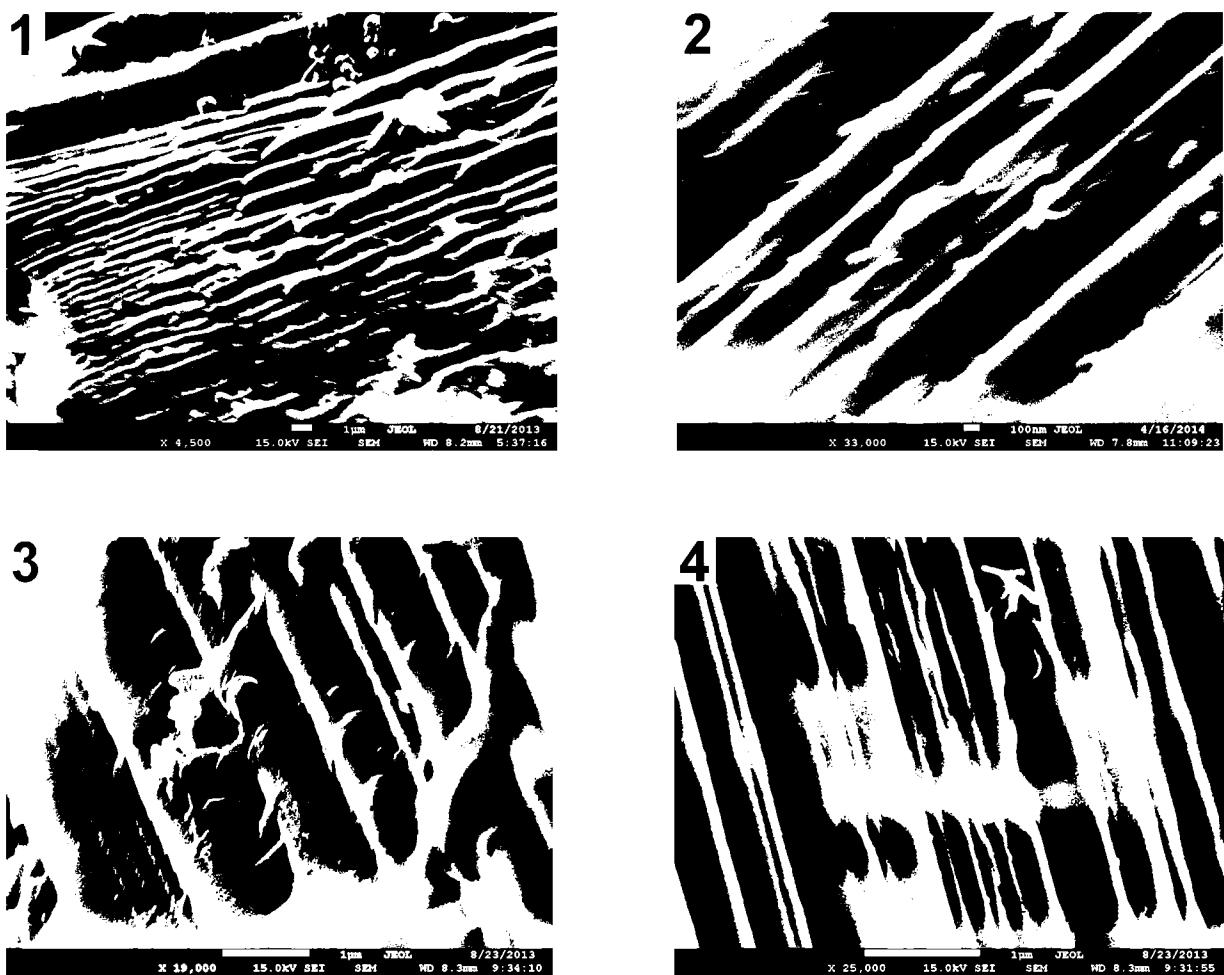


Рис. 50. Микрослоистое строение граней октаэдрических кристаллов: 1, 3, 4 – р. Волынка; 2 – технический (искусственный) алмаз. Масштабная линейка: 1, 3, 4 – 1 мкм, 2 – 100 нм



Рис. 51. Нанослоистость октаэдрического кристалла алмаза (выход нанослойков на боковых стенках трещины)

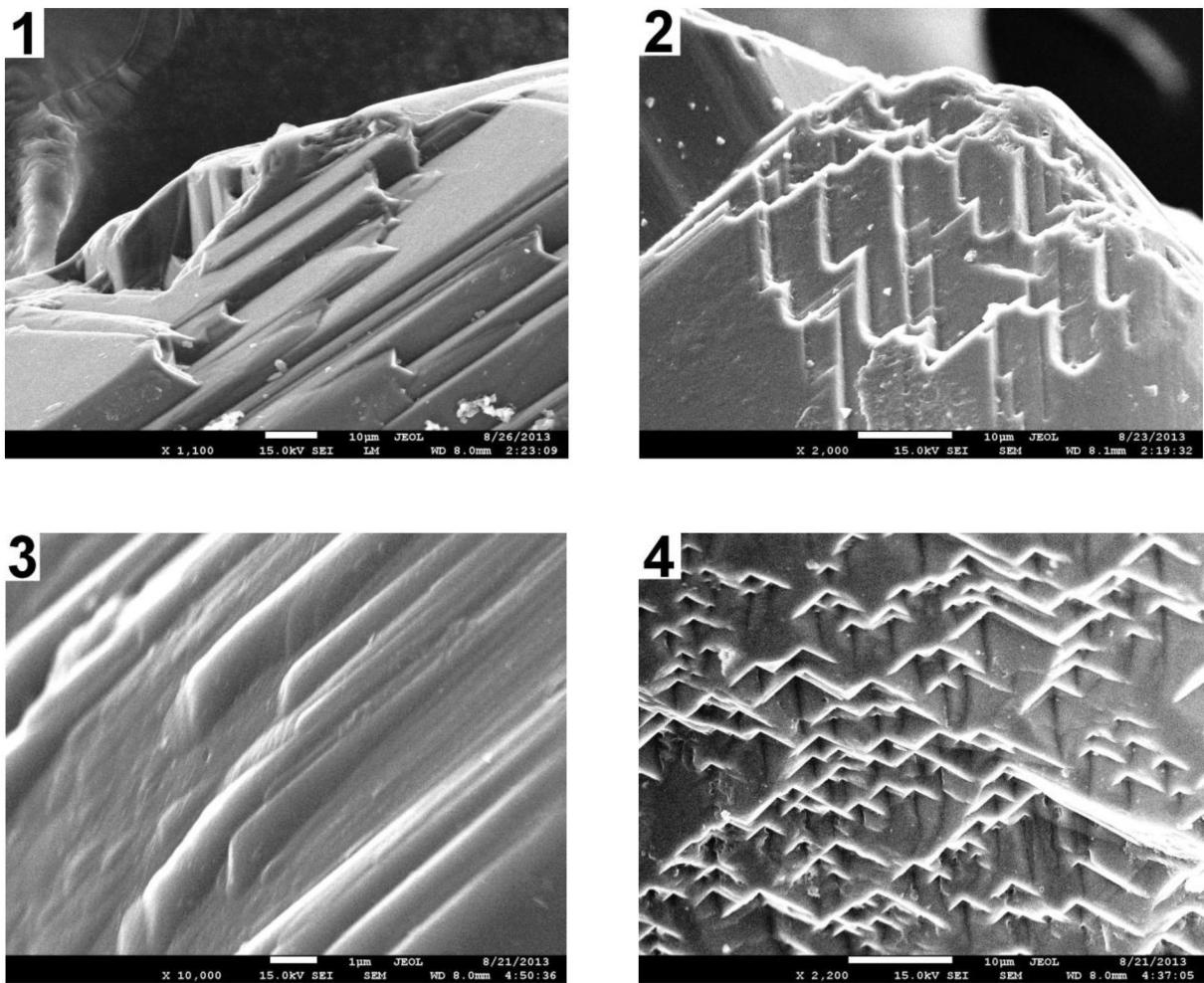


Рис. 52. Характерные формы выклинивания слойков на поверхности кристаллов алмаза:
 1 – октаэдр, Ю. Тиман; 2 – сросток октаэдров, р. Волынка; 3, 4 – ромбододекаэдр, р. Волынка. Масштабная линейка: 1, 2, 4 – 10 мкм, 3 – 1 мкм

Выклинивание микрослойков отмечается чаще всего близ вершин октаэдрических кристаллов. Данное явление может быть связано с особенностями нарастания плоских сеток кристалла в завершающую стадию их роста. Кроме того, возможно откалывание фрагментов кристалла по плоскостям спайности в момент механического воздействия, чему способствует повышенная хрупкость алмазов.

Одним из доказательств именно такого раскалывания кристаллов по плоскостям спайности является образование ровных сколов, поверхности которых имеют практически постоянные углы наклона друг к другу. Точные замеры этих углов показали значения порядка 60° , что соответствует углам между плоскостями спайности по октаэдру.

Однако в некоторых случаях на октаэдрических кимберлитовых алмазах встречаются и округлые вершины. Их образование рассматривается как результат начальной фазы растворения алмазов в мантийной обстановке (рис. 53).

Результатом выклинивания микрослойков на поверхности граней октаэдрических кристаллов является их ступенчатое строение, которое проявляется в весьма разнообразных формах микрорельефа (рис. 54). Характерно, что особенно заметно выступающие над поверхностью микрослойки выклиниваются на определенном расстоянии от конца грани. На поверхности грани со ступенчатым микрорельефом наглядно выявляются различная толщина отдельных слойков (или их пачек), присутствие микрокристаллов минералов-включений, дефектность отдельных зон кристаллов и т.д.

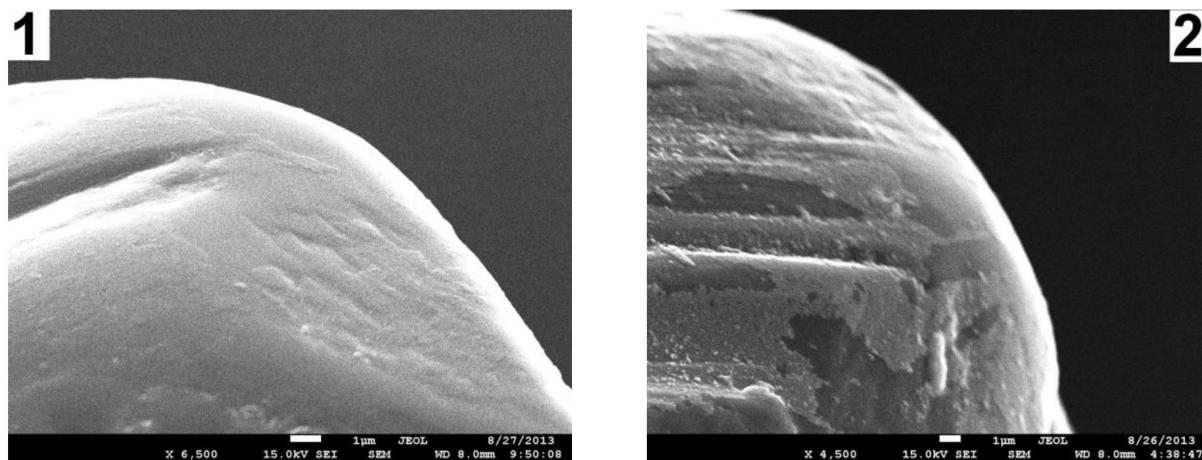


Рис. 53. Округлые вершины октаэдрических кристаллов алмаза, Ю. Тиман.
Масштабная линейка – 1 мкм

Наиболее разнообразные формы микрорельефа кристаллов слоистого строения наблюдаются на сколах. Одной из них являются своеобразные туннельные углубления (рис. 55). Их появление связано с особым характером слоистости алмазов, когда отдельные слойки отделены друг от друга на некоторое расстояние и периодически соединяются только поперечными перегородками. Размеры образующихся на сколах «туннелей» по высоте и ширине – единицы и десятки микронов, в глубину кристалла – неизвестны. Вполне возможно, что только отдельные зоны в структурах кристаллов алмаза отличаются наличием соответствующих пустот и их присутствие облегчает раскалывание при механическом воздействии.

Близ поверхностей раскола иногда наблюдается изгиб микрослоев (рис. 56). На электронных микрофотографиях видно, что изгиб сопровождается раскалыванием или другими деформациями слоистых поверхностей. Изогнутая слоистая структура ранее была зафиксирована на поперечных срезах октаэдрических алмазов из трубы Кимберли (Seal, 1965). Предложено несколько объяснений этому феномену: появление примесей в отдельных зонах роста, нарушения гомогенности среды кристаллизации, влияние диффузионных процессов и др.

Не менее отчетливо микрослоистость проявляется и на поверхности граней ромбододекаэдрических алмазов. По многим характерным особенно-

стям она не отличается от слоистости октаэдрических кристаллов. На основе относительно небольшой выборки изученных кристаллов установлено, что слоистость ромбододекаэдров характеризуется меньшим количеством дефектных слойков, более однообразным их распределением по толщине, характерным завершением на поверхности в виде полукруглых сводов (рис. 57). Для этих алмазов выявлены также туннельные углубления особой аркообразной формы (рис. 58).

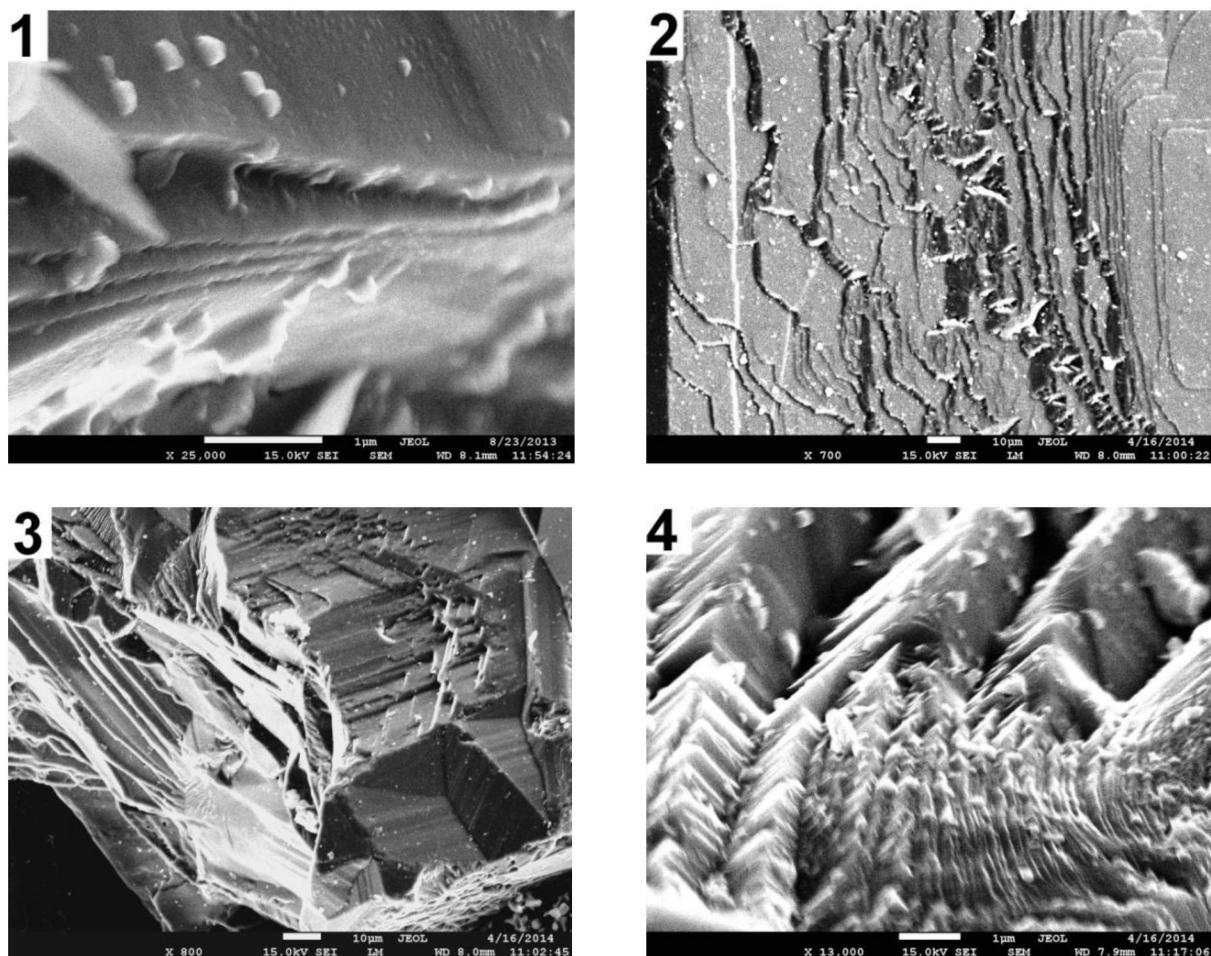


Рис. 54. Ступенчатая микроскульптура поверхности граней октаэдрических кристаллов:
1 – Красновишерский район; 2, 3, 4 – искусственные (технические) алмазы.
Масштабная линейка: 1, 4 – 1 мкм, 2, 3 – 10 мкм

Микрослоистое строение наблюдается и в кубических алмазах, однако на поверхности оно проявляется весьма нечетко (рис. 59). В частности, в отличие от октаэдрических и ромбододекаэдрических кристаллов, здесь размыты выходы слойков, что не позволяет точно замерить их толщину. Эти выходы имеют прерывистый характер и постоянно перекрываются другими поверхностными микроформами.

Специальные исследования с изучением поперечных срезов кубических кристаллов показали, что они действительно обладают весьма тонкой слоистостью. Особенностью проявления их слоистого строения на поверхно-

сти является присутствие уступов с высотой ступенек порядка 30 нм (Bovenkerk, 1961). Этот вывод подтверждается нашими наблюдениями.

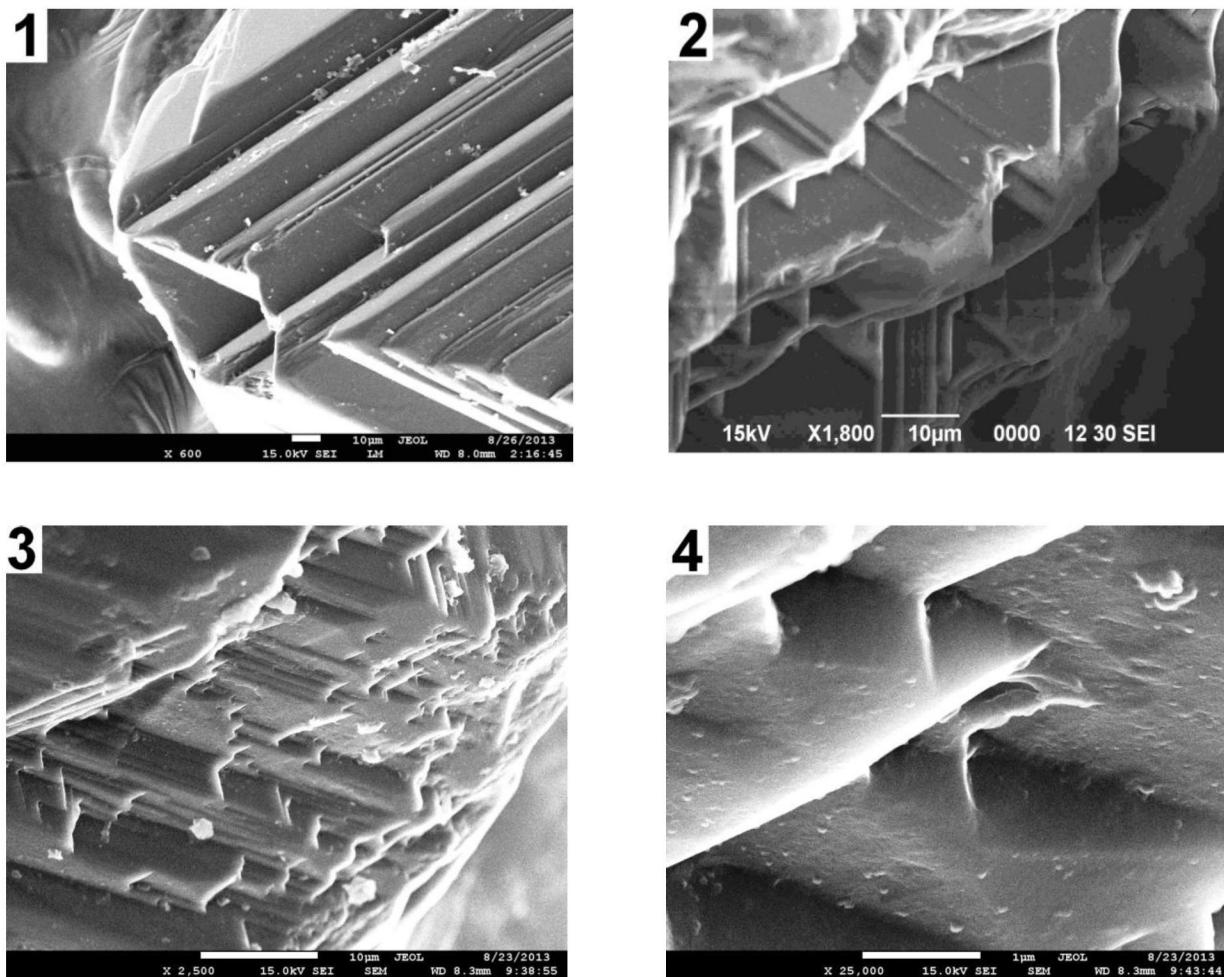


Рис. 55. Туннельные углубления на поперечных сколах октаэдрических алмазов:

1 – Ю. Тиман; 2 – Вятско-Камская впадина; 3, 4 – р. Волынка.

Масштабная линейка: 1, 2, 3 – 10 мкм, 4 – 1 мкм

3.8. Поликристалличность

Для многих генетических разностей алмазов характерно поликристаллическое строение, обусловленное совместным образованием многих кристаллов. Несмотря на малые размеры рассматриваемых нами зерен, их поликристаллическое строение – весьма типичное явление.

Поликристаллическое внутреннее строение характерно практически для всех *импактных* алмазов и проявляется на поверхности в виде серии параллельно ориентированных валообразных полос (кристаллитов), разделенных ложбинами. Ширина полос обычно составляет 1–2 мкм, ложбин между ними – доли микрона. В то же время в длину кристаллиты могут достигать относительно больших величин, по крайней мере, в несколько десятков микронов (рис. 60). Кристаллиты ориентированы субпараллельно друг другу. В

свою очередь, в структуре импактных алмазов наблюдаются блоки, на стыке которых отмечено изменение ориентировки кристаллитов. Данные элементы микрорельефа поверхности отчетливо выявляются только при увеличениях электронного микроскопа, составляющих нескольких тысяч раз и более.

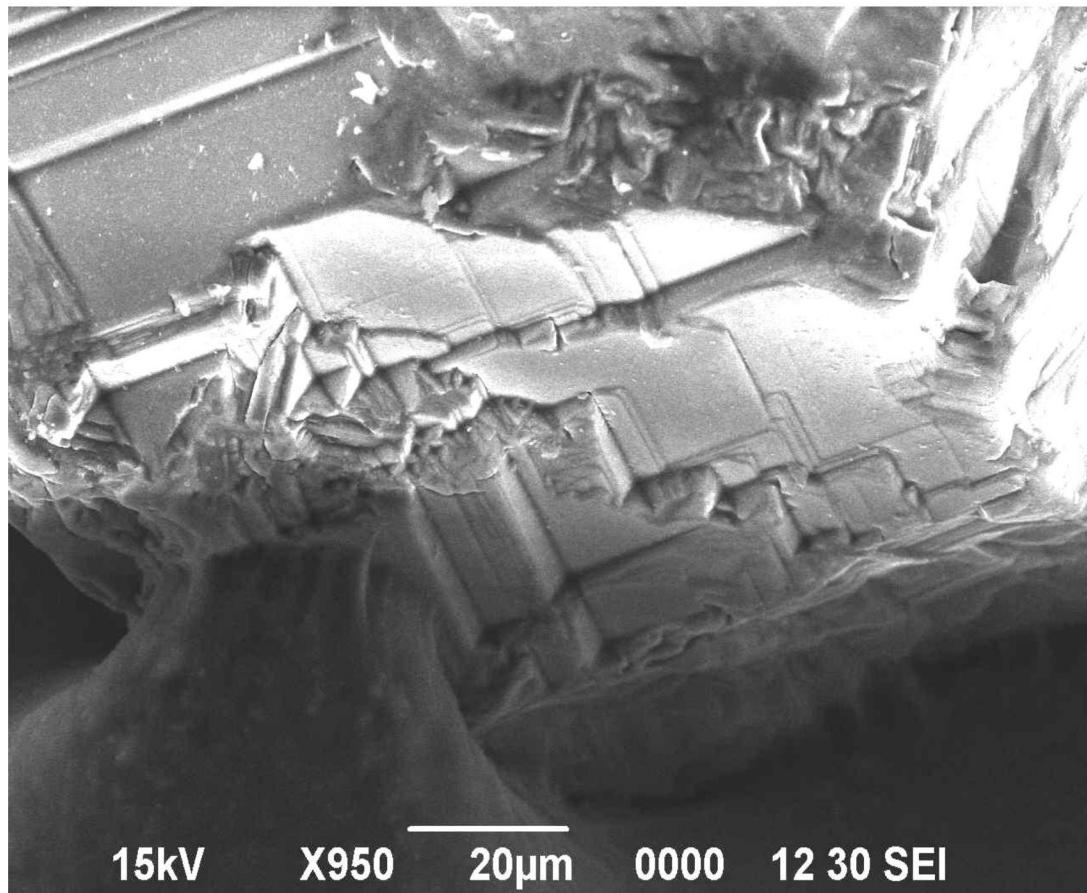


Рис. 56. Изгибы микрослойков и их выход на поперечном сколе октаэдрического алмаза (Вятско-Камская впадина)

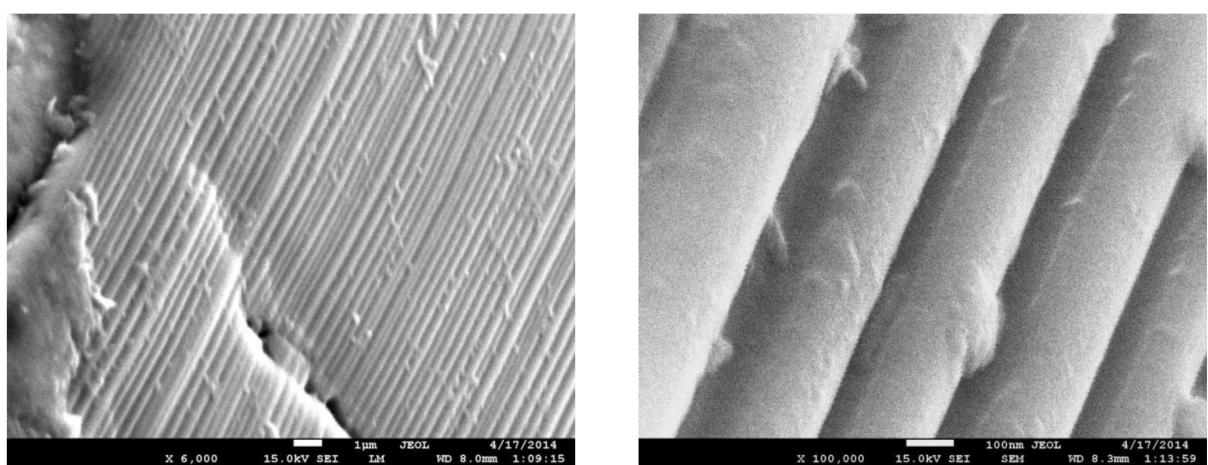


Рис. 57. Микрослоистость ромбододекаэдрических кристаллов (искусственные алмазы).
Масштабная линейка: слева – 1 мкм, справа – 100 нм

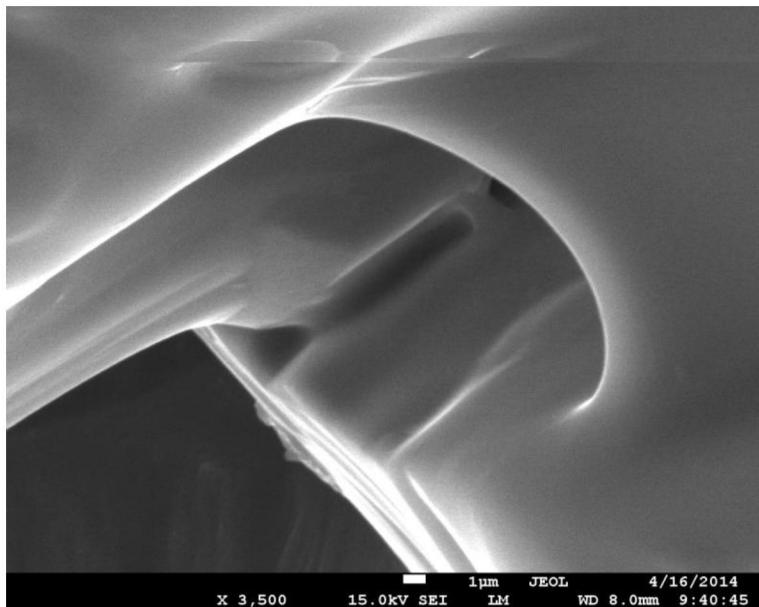


Рис. 58. Туннельное углубление на поверхности ромбододекаэдрического кристалла. Масштабная линейка – 1 мкм

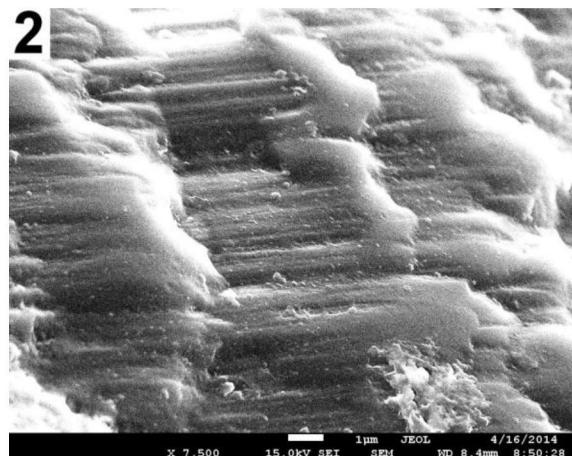
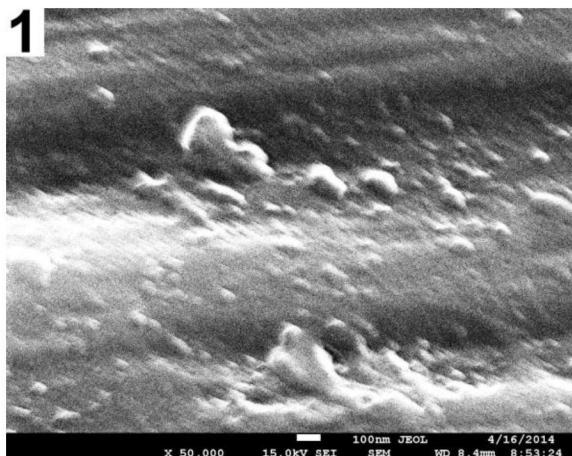


Рис. 59. Слабо выраженная слоистость на поверхности кубических алмазов (Ю. Урал, меловой аллювий). Масштабная линейка: 1 – 100 нм, 2 – 1 мкм

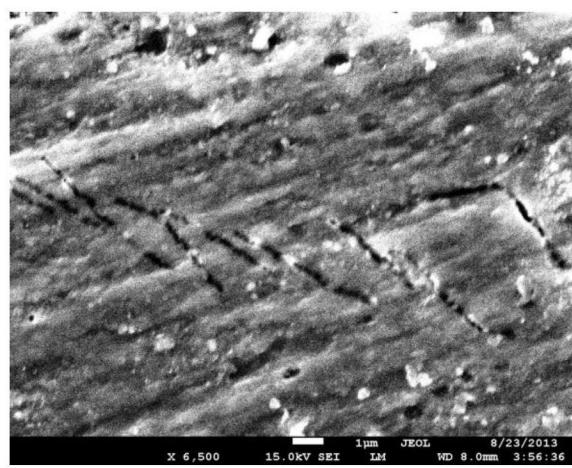
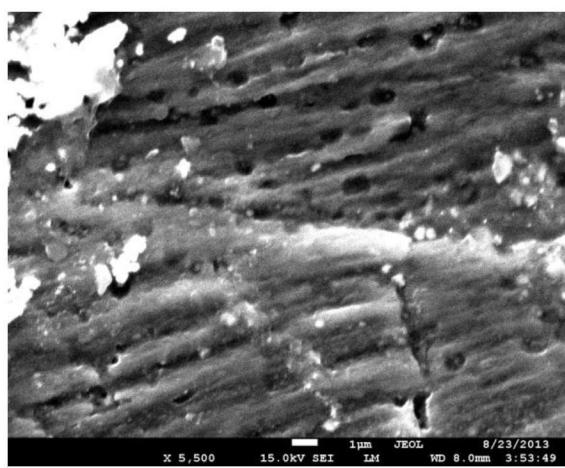


Рис. 60. Отражение поликристаллической структуры импактных алмазов Красновишерского района в поверхностных формах микрорельефа. Масштабная линейка – 1 мкм

Каждый из кристаллитов состоит из нескольких более мелких индивидуов толщиной в доли микрона, плотно сросшихся друг с другом. Отдельные кристаллиты микронных размеров распадаются на прерывистые гряды наноразмерной ширины. Эти наблюдения согласуются с результатами работ ряда исследователей с применением методов рентгенографии и электронографии. Ими было показано, что импактные алмазы сложены кристаллическими единицами (блоками) размером порядка десятков нанометров для алмазных фаз и единиц нанометров – для лонсдейлитовых (Квасница и др., 1999).

Особым характером поликристаллического строения отличаются *оболочечные алмазы*. Структурные частицы углерода, слагающие оболочку, имеют обычно округлую, иногда относительно правильную многогранную форму. Размер этих структурообразующих частиц обычно порядка 100 нм. Они образуют плотные агрегатные скопления различной формы размером в единицы микронов. В таких скоплениях между частицами углерода присутствует связующая масса, вероятно, также углеродного состава. Между скоплениями прослеживаются незаполненные веществом пустоты (рис. 61).

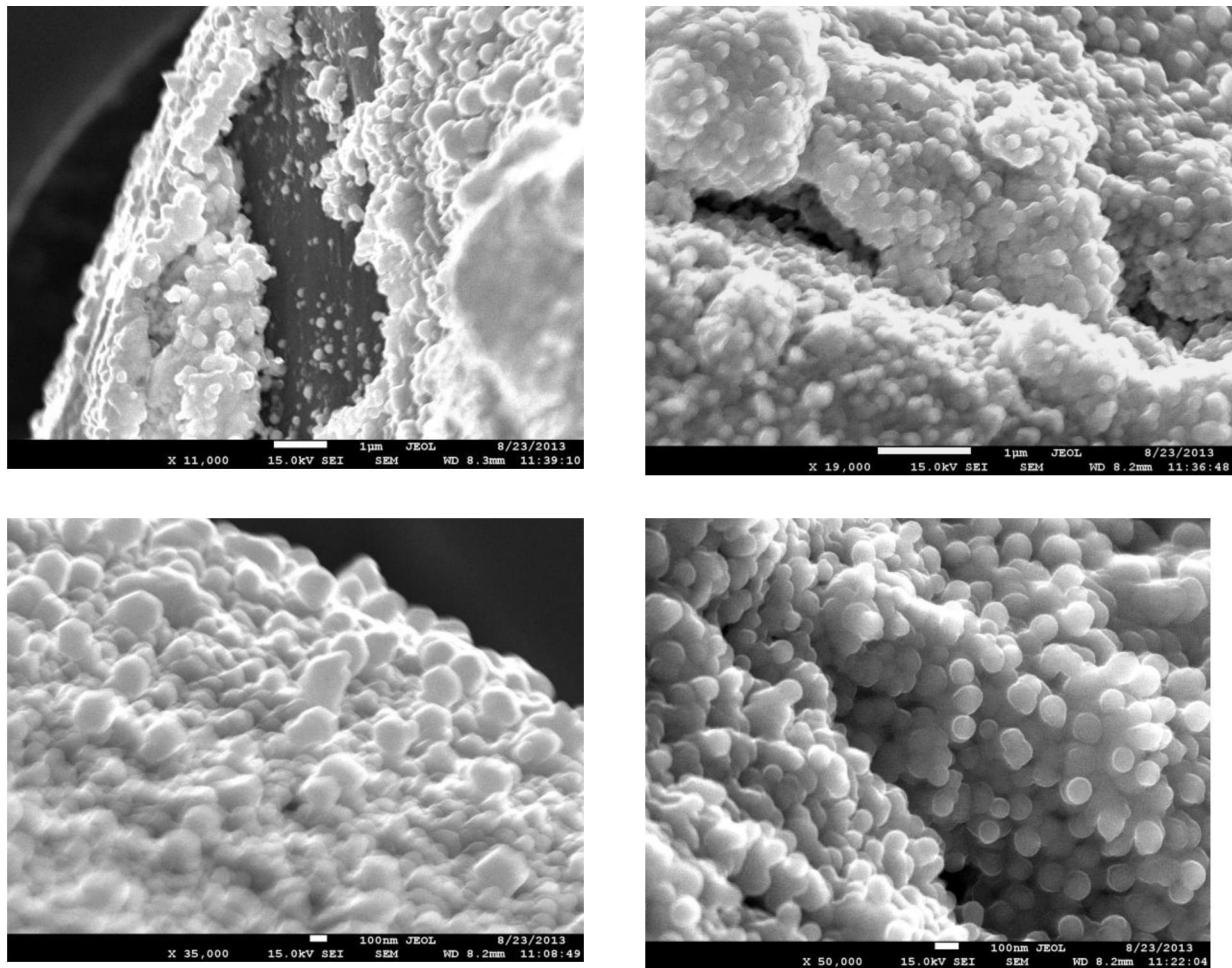


Рис. 61. Детали строения оболочки на алмазах (Красновишерский район).

Масштабная линейка: вверху – 1 мкм, внизу – 100 нм

Поликристаллическое строение характерно также для многих *срост-*

ков, состоящих из значительного количества разнородных микрокристаллов. Среди них обычно преобладают октаэдрические, однако нередко встречаются и кубические. Некоторая часть поликристаллических сростков сложена изогнутыми индивидами пластинчатой формы, которые образуют своеобразные фрагменты, выступающие наружу из приповерхностной зоны. Кроме того, на поверхности обнаруживаются выходы разноориентированных блоков, нередко с взаимно перпендикулярной ориентацией слоистости (рис. 62).

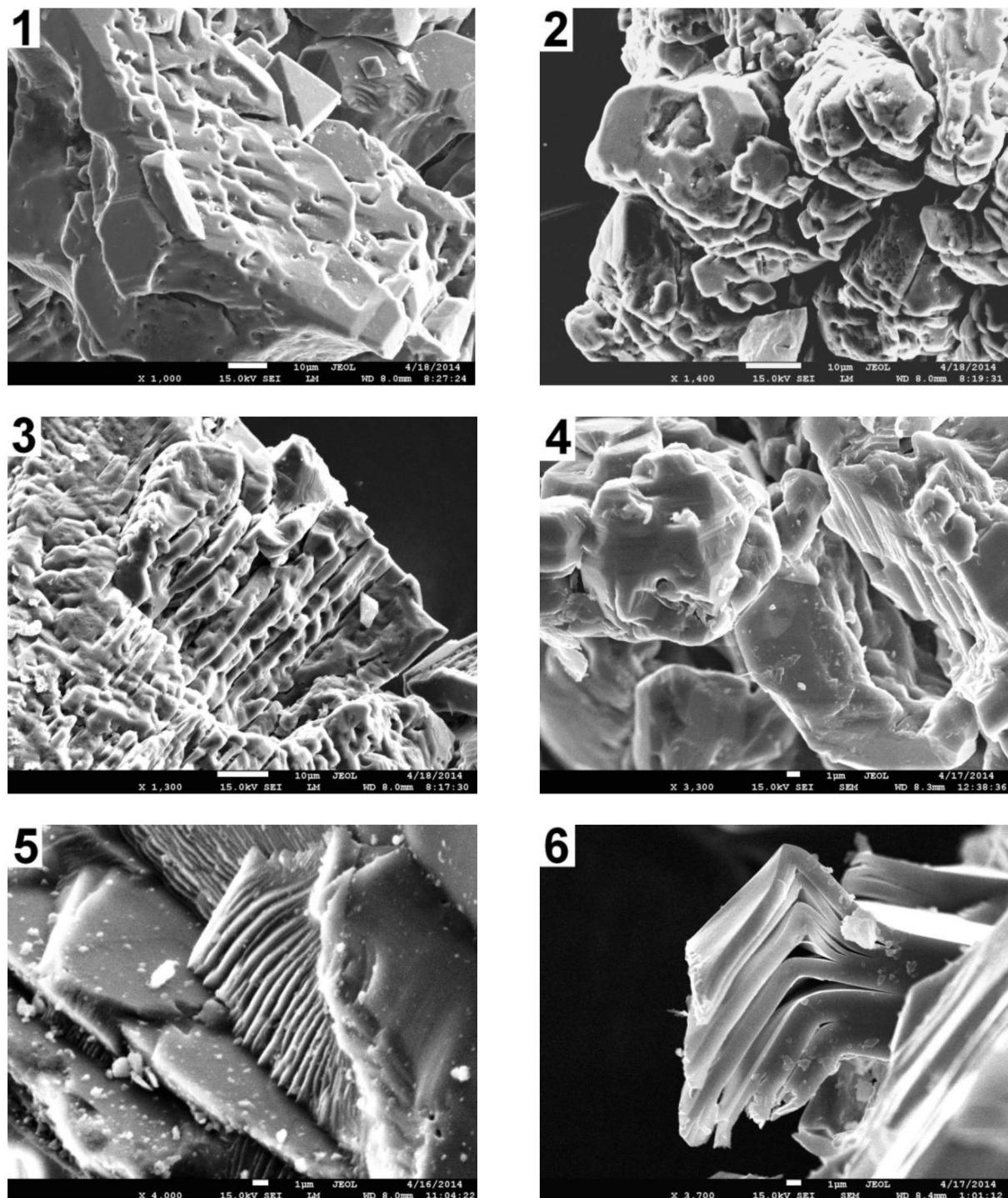


Рис. 62. Особенности строения поверхности поликристаллических сростков алмаза.
Масштабная линейка: 1, 2, 3 – 10 мкм, 4, 5, 6 – 1 мкм

3.9. Налеты и пленки на поверхности алмазов

Изучение налетов и пленок на алмазах представляет не только теоретический, но и практический интерес. В последние годы предложены различные направления использования алмазных пленок в технике и разработаны технологические способы их получения (Kshirsagar et al., 2005). Морфологически искусственные алмазные пленки выглядят как агрегаты алмазных микрокристаллов размером порядка 0,5–2 мкм. Они сложены в основном кубическими и кубооктаэдрическими кристаллитами.

Экспериментально доказано интенсивное воздействие радиации на структуру алмазных пленок. С использованием методов рамановской спектроскопии удается достаточно точно установить степень облучения, что позволяет на этой основе разрабатывать новые методы оценки радиационной обстановки (Newton et al., 2005).

Присутствие разнообразных налетов и пленок на поверхности природных алмазов фиксируется постоянно. В частности, на поверхности почти половины из изученной коллекции в 90 кривогранных алмазов месторождения Ичетью (Тиман) учеными Института геологии Коми НЦ УрО РАН обнаружены тонкие металлические пленки разного состава (золото-палладиевые, золото-серебряные, серебряные, латунные, бронзовые) толщиной от 0,1 до 1 мкм, изученные с применением микрозондового анализа (Макеев, 2000; Мальков, Швецова, 2006). Они сохранились только в углублениях микрорельефа поверхности алмазов. Кроме преобладающих металлов и интерметаллидов, в составе пленок установлены также некоторые силикаты, фосфаты и оксиды. Обычно толщина пленок и примазок составляет доли или единицы микронов. Некоторые из них оказались многослойными с чередованием слоев разного минерального состава.

Точки зрения на их происхождение различны. Одни ученые считают их сингенетичными алмазу и, таким образом, имеющими определенное поисковое значение, другие – эпигенетичными, указывающими на среду их пребывания в экзогенных условиях.

На поверхности зерен *импактных* алмазов часто присутствуют пленки и налеты различных веществ. Под электронным микроскопом они обнаруживают агрегатное (хлопьевидное) строение, обусловленное сложным сочетанием индивидов размером в доли микрона. Поверхностные пленки нередко пересекаются трещинами, из чего следует, что они являются компонентами первичного происхождения, а не вторичными новообразованиями (например, гипергенными) (рис. 63).

Данные о химическом составе пленок на импактных алмазах, приведенные в работах других авторов, свидетельствуют о преобладании в них таких элементов, как Si, Ca, Al, Mg и Fe. Считается, что ассоциация этих элементов может указывать на состав первичных пород, подвергавшихся ударному метаморфизму. Так, повышенное содержание кальция и алюминия характерно для импактиков, образованных в результате преобразования гней-

сов и кристаллических сланцев. Присутствие Pb, Sn, Zr указывает на гранитоидный состав первичных пород (Квасница и др., 1999).

Полученные нами результаты микрозондового анализа поверхностных образований агрегатного строения на импактных алмазах Попигайского кратера свидетельствуют о сложном сочетании компонентов. Среди них, вероятно, присутствуют силикаты, оксиды, хлориды, амальгамы, сульфаты, фосфаты, сульфиды, интерметаллиды и др. В связи с тем что анализ проводился без изготовления шайбы на неровной поверхности, суммы компонентов заметно отличались от 100%; поэтому полученные содержания приходилось нормировать.

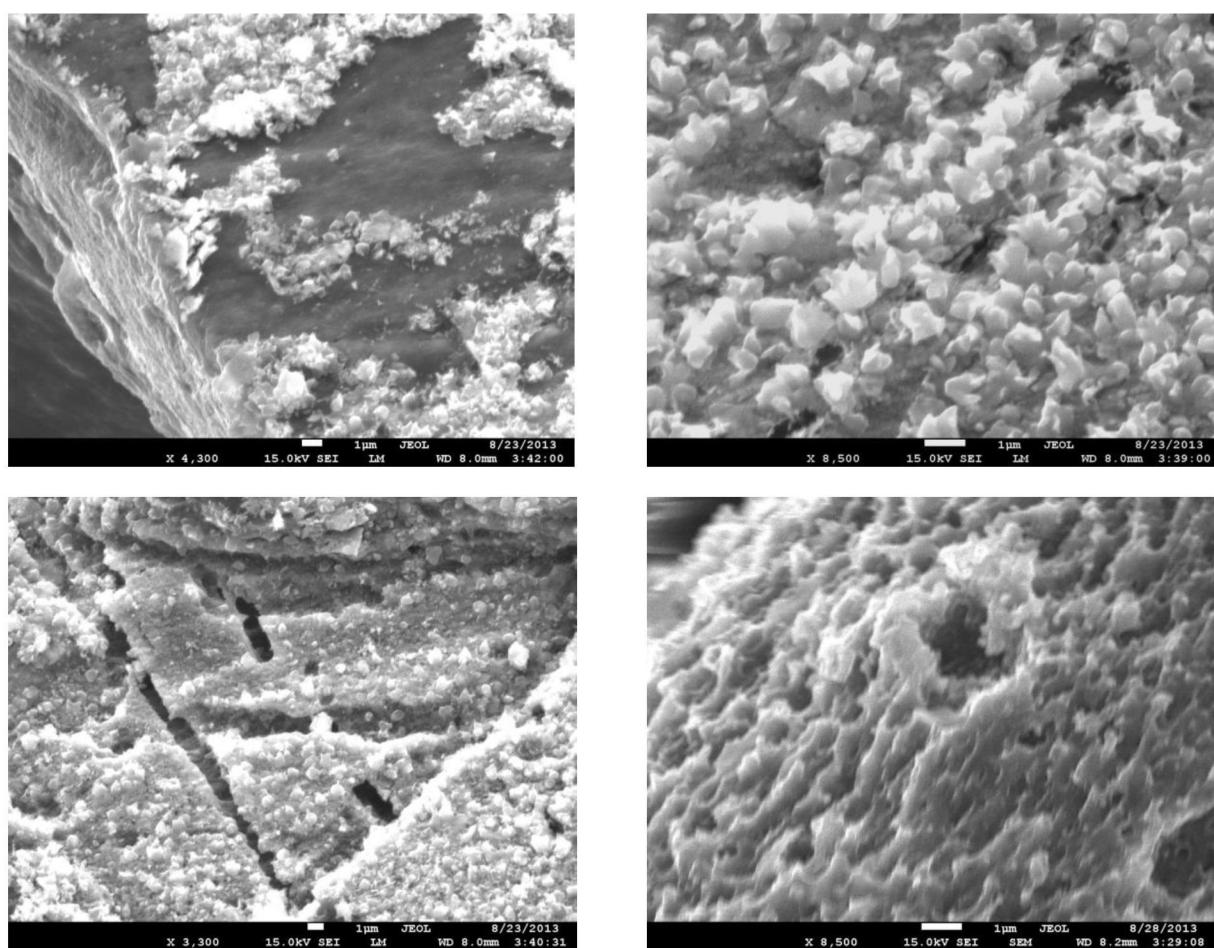


Рис. 63. Налеты на поверхности импактных алмазов (белые): Красновиsherский район.
Масштабная линейка – 1 мкм

Характерными элементами в составе поверхностных пленок, корочек и агрегатных скоплений частиц, кроме Si, Al, Ca, Mg, Fe, Na и K, являются разнообразные металлы – Ti, Cu, Zn, Mo, Tl, Ag, Au, Ce, Nb, Sn и др. (табл. 9, 10). Установление минеральных форм нахождения этих элементов требует применения специальных методов анализа. Однако по данным химических определений состава отдельных частиц в поверхностных агрегатах можно предполагать, что среди кислородных соединений в них обычны кварц (или

другие молиморфные модификации кремнезема), полевые шпаты, сульфаты и фосфаты, лейкоксен с микрозернами интерметаллидов меди и цинка, карбонаты кальция и магния (доломит?). Отдельные корочки, агрегаты и пленки на поверхности импактных алмазов могут быть представлены амальгамами меди, молибдена и других металлов, хлоридами серебра, медно-цинковыми природными сплавами (см. табл. 10).

Таблица 9

Химический состав кислородных соединений в агрегатах и корочках на поверхности импактных алмазов Попигайского кратера, мас. %

Компонент	1	2	3	4	5	6	7
MoO ₃	-	1,64	-	-	-	-	-
SO ₃	-	-	-	6,86	12,17	-	-
P ₂ O ₅	-	-	-	3,05	16,24	-	-
SiO ₂	60,80	66,27	51,03	22,47	11,25	-	6,41
TiO ₂	5,44	4,42	-	7,22	-	51,26	0,77
Al ₂ O ₃	5,81	6,46	24,49	8,09	10,41	2,00	3,21
Ce ₂ O ₃	-	1,45	-	-	-	-	-
FeO*	0,84	1,42	0,94	8,91	-	5,25	1,29
MgO	2,16	0,73	0,41	-	7,33	-	28,43
CaO	4,80	1,45	6,41	8,00	9,65	3,82	33,72
CuO	1,61	2,49	1,08	6,35	6,42	20,64	2,77
ZnO	1,31	1,74	1,00	4,78	7,61	16,50	1,85
Na ₂ O	9,88	4,11	6,26	4,19	10,51	-	-
K ₂ O	0,92	4,12	0,58	12,28	1,79	-	0,43
Tl ₂ O	5,30	2,83	6,89	-	-	0,53	18,44
Cl	1,13	0,86	0,91	7,80	6,60	-	2,68
Сумма	100	99,99	100	100	99,98	100	100

Примечания: 1, 2 – агрегаты, 3 – моночастица, 4 – 7 – корочки.

На поверхности граней октаэдрических и ромбододекаэдрических кристаллов корочки и агрегаты также широко распространены (рис. 64). Они нередко имеют локальное распространение и часто приурочены к понижениям микрорельефа. Частички, из которых состоят агрегаты, обычно имеют округлую или правильную (кубы, гексагональные пластины и т.д.) форму. Размеры этих частиц измеряются несколькими сотнями нанометров, но некоторые из них являются наноразмерными (менее 100 нм). Плотность агрегатов заметно меняется на разных участках грани. Среди агрегатных скоплений на поверхности октаэдров можно выделить однослойные и многослойные.

С использованием электронной микроскопии высокого разрешения было установлено, что агрегаты на отдельных участках поверхности имеют преимущественно нанозернистый состав (рис. 65). При этом наночастицы нередко соединяются в более крупные образования благодаря цементирующему массе вторичного вещества.

Таблица 10

Химический состав хлоридных и металлических агрегатов на поверхности импактных алмазов Попигайского кратера, мас. %

Элемент	1	2	3	4	5
Al	0,55	0,51	0,48	5,20	5,27
Ti	0,41	-	-	1,12	-
Ca	-	-	-	-	1,81
Fe	-	-	-	1,75	10,79
Nb	-	1,37	-	-	-
Cu	34,08	2,78	13,08	46,94	43,19
Zn	1,97	1,46	2,25	44,99	38,93
Mo	-	-	27,13	-	-
Po	-	-	7,51	-	-
Au	0	5,82	-	-	-
Ag	1,40	73,65	-	-	-
Sn	1,79	-	-	-	-
Hg	45,83	2,49	49,56	-	-
S	13,97	1,24	-	-	-
Cl	-	10,66	-	-	-
Сумма	100	99,98	100,01	100	99,99

Примечания: 1, 2 – корочки, 3 – агрегаты сферул, 4, 5 – пленки.

По химическому составу агрегаты (табл. 11) на поверхности мелких октаэдрических кристаллов обычно представлены интерметаллидами меди и олова (анализы 1, 2), свинца и олова (анализы 3, 4), золота и меди (анализы 5, 6), амальгамами меди и молибдена (анализ 7) и другими более сложного состава, а также хлоридными солями, которые отличаются кубической формой микрокристаллов размером 150–200 нм (анализ 8).

Существует множество признаков, которые позволяют рассматривать агрегатные скопления на поверхности октаэдрических кристаллов как сингенетические образования. Наряду с ними встречаются иные по морфологии поверхностные образования, которые представлены игольчатыми индивидами, нарастающими на ранее образованные отложения вещества. Эти индивиды, скорее всего, являются эпигенетическими формами (рис. 66).

Присутствие в составе поверхностных налетов и пленок наноразмерных частиц самородного золота и интерметаллидов золота является вполне закономерным и подтверждается специальными экспериментальными исследованиями. Эти эксперименты основаны на использовании исключительно высокой химической активности наночастиц золота и соответствующих свойств поверхности алмазов (Carabineiro et al., 2012).

Кроме агрегатных скоплений, на поверхности мелких алмазов обнаружены очень тонкие пленки, которые заметно выделяются на электронных микрофотографиях более светлой окраской. Из этого можно сделать предпо-

ложение об их металлическом составе (с учетом отчетливо выраженного вещественного контраста).

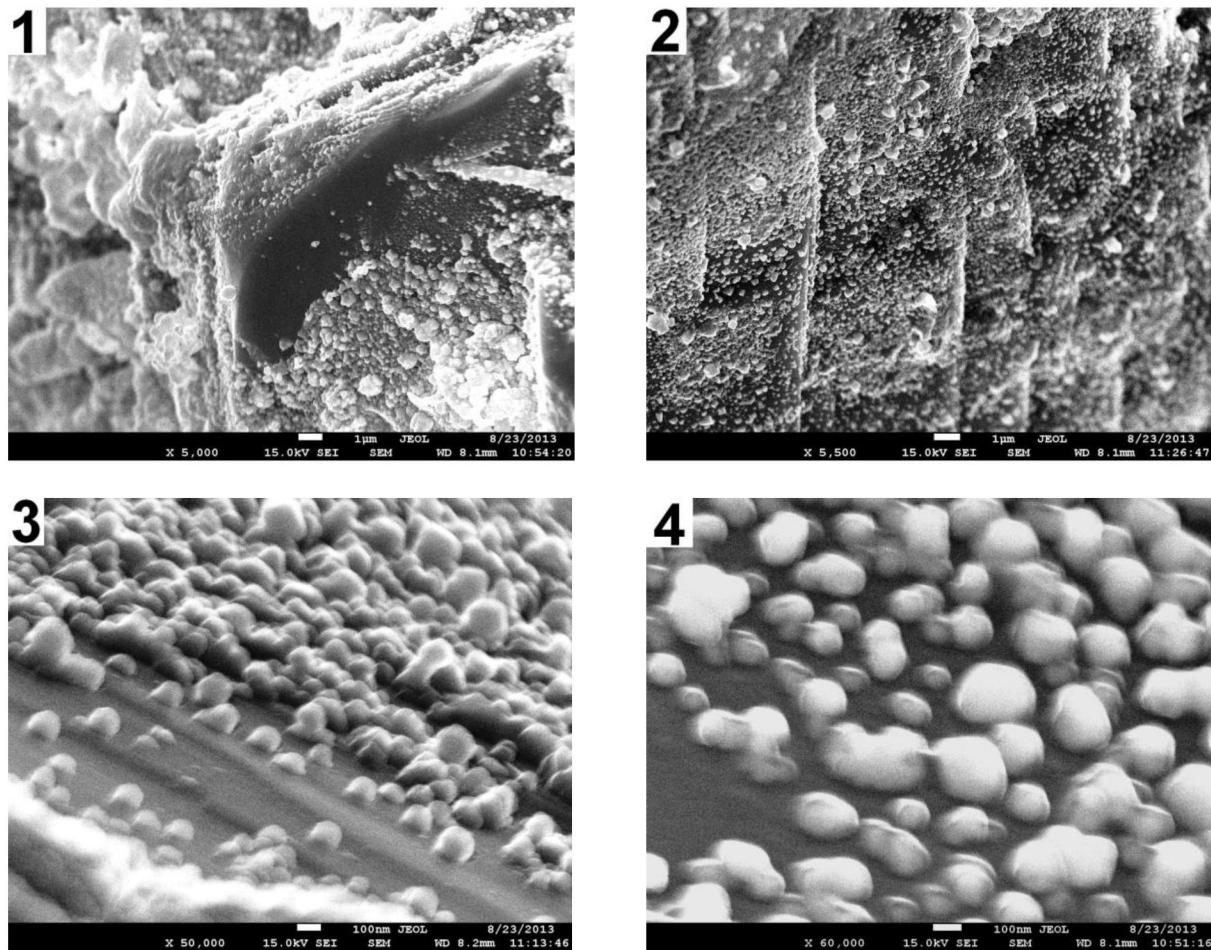


Рис. 64. Агрегатные скопления на поверхности октаэдрических алмазов Красновишерского района. Масштабная линейка: 1, 2 – 1 мкм, 3, 4 – 100 нм

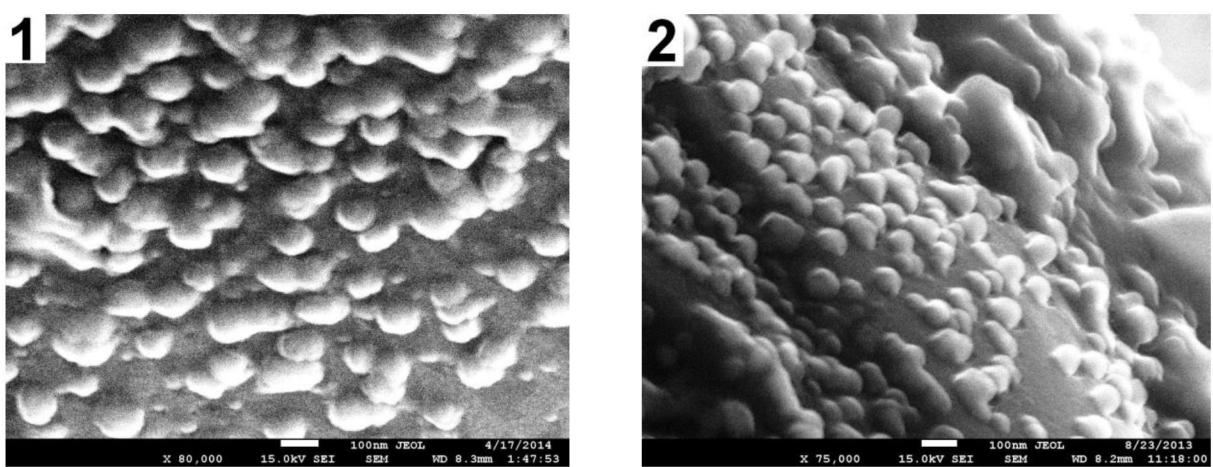


Рис. 65. Участки поверхности октаэдрических кристаллов с заметным присутствием наночастиц в составе агрегатов: 1 – технический алмаз (Ю. Тиман); 2 – Красновишерский район. Масштабная линейка – 100 нм

Таблица 11

**Химический состав агрегатных налетов на поверхности
октаэдрических кристаллов, мас. %**

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Cu	88,38	75,97	3,75	6,83	20,32	5,40	44,52	9,56	53,43
Pb	-	-	15,82	70,00	-	-	-	-	-
Sn	8,28	10,84	73,47	16,16	-	-	5,40	-	1,57
Zn	1,55	3,18	2,94	5,65	5,00	4,59	2,68	5,53	3,42
Mo	-	-	-	-	-	-	21,61	-	-
Au	-	2,80	-	-	70,69	88,01	-	-	19,50
Hg	-	-	-	-	-	-	22,82	-	10,71
Al	1,26	1,88	1,37	1,36	0,97	1,16	0,80	-	0,79
Si	-	1,03	-	-	-	-	0,36	-	-
K	-	-	-	-	-	-	-	45,13	-
Na	-	-	0,47	-	-	-	-	4,58	-
Cl	-	4,30	2,17	-	3,02	0,83	1,11	35,20	1,17
P	0,53	-	-	-	-	-	0,70	-	-
S	-	-	-	-	-	-	-	-	9,40
Сумма	100	100	100	100	100	100	100	100	100

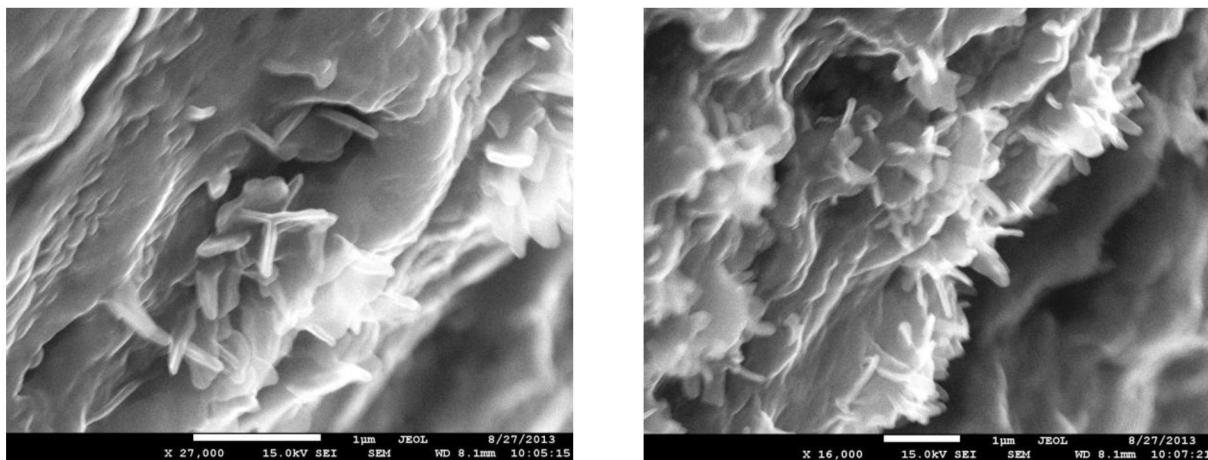


Рис. 66. Игольчатые наросты в составе поверхностных образований:
куб розовато-сиреневый, Ю. Тиман. Масштабная линейка – 1 мкм

Тонкие пленки либо почти полностью покрывают грани октаэдра, либо образуют разветвляющиеся или пересекающиеся полосы сложной конфигурации (рис. 67).

При увеличениях до 10 тысяч раз в составе полос выявляется присутствие множества плотно расположенных мельчайших частиц, а при увеличениях порядка 50–100 тысяч раз и более они представляются в виде плоских

микроагрегатов размером 100–150 нм, образованных наночастицами размером в несколько десятков нанометров (рис. 68).

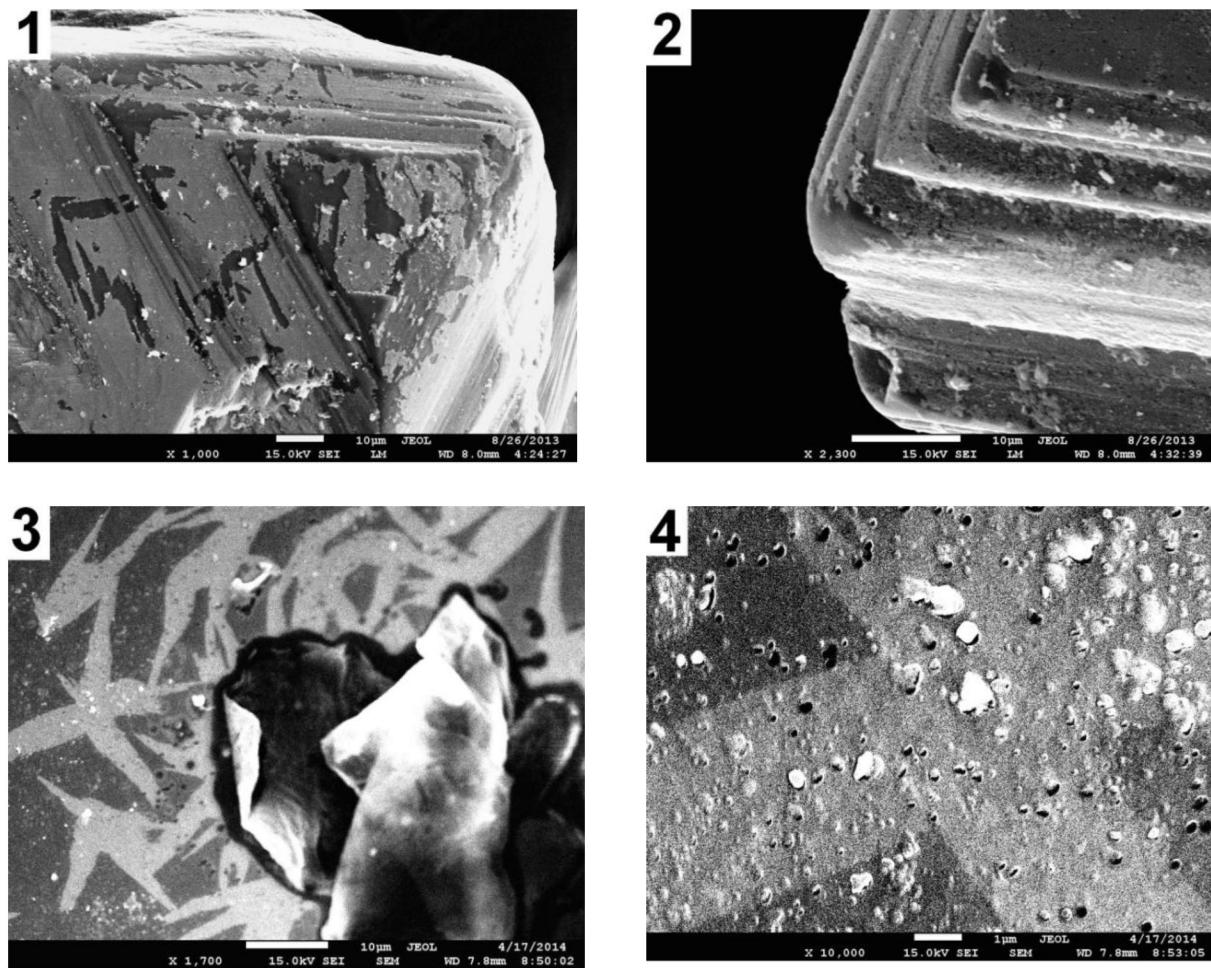


Рис. 67. Тонкие пленки (светлые) на поверхности октаэдрических кристаллов:
1, 2 – Ю. Тиман; 3, 4 – искусственные алмазы

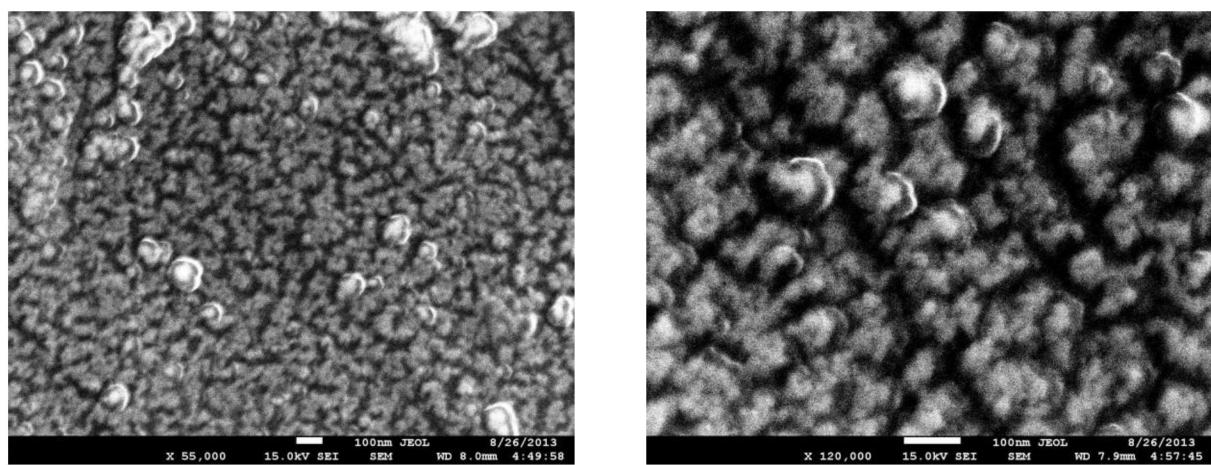


Рис. 68. Агрегаты и слагающие их наночастицы в строении тонких пленок:
октаэдр, Ю. Тиман (см. рис. 67). Масштабная линейка – 100 нм

3.10. Микровключения на поверхности алмазов

Включения в алмазах имеют большое значение при установлении глубины их образования, генетических особенностей, перспективности месторождений и т.д. Нередко включения обнаружаются непосредственно на поверхности кристаллов или их осколков, что облегчает процедуру их изучения.

Например, среди разнообразных включений, выходящих на поверхности кристаллов алмазов россыпи Ичетью (Тиман), установлены хлорит, флогопит, редкоземельные алюмофосфаты, перовскит, шеелит, графит, пиропальмандин, каолинит, гидрослюдя, рутил, ильменит, титаномагнетит и др. (Макеев, 2005).

В изученных нами мелких кристаллах алмаза микровключения прежде всего обнаружаются в трещинах и других углублениях поверхности. Они обычно представлены единичными округлыми зернами размером в несколько микронов, чешуйчатыми скоплениями слоистых минералов или более крупными плотными агрегатами (рис. 69).

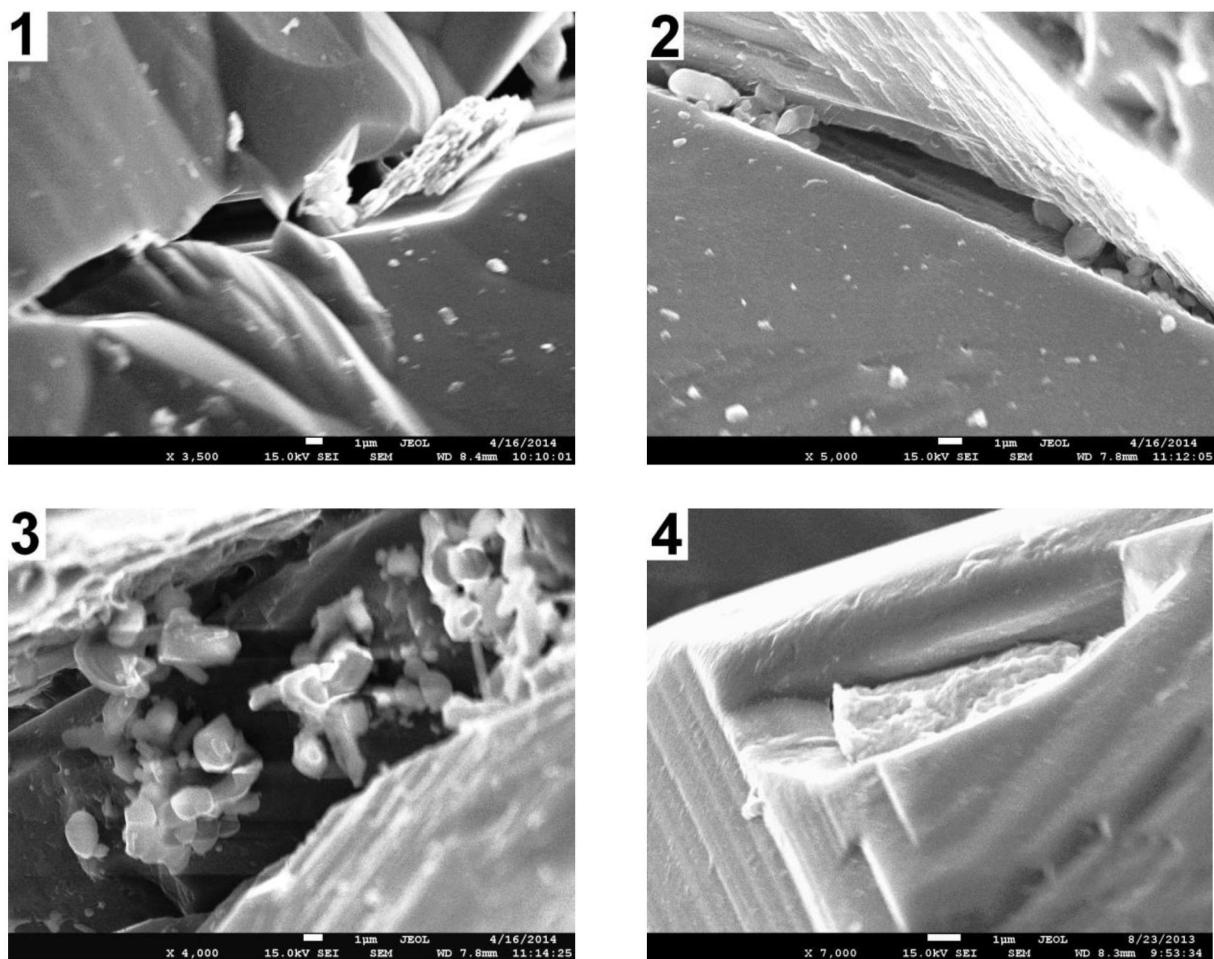


Рис. 69. Включения в трещинах и углублениях на поверхности алмазов: 1 – Ю. Тиман; 2, 3 – искусственные алмазы; 4 – р. Волынка. Масштабная линейка – 1 мкм

Определение химического состава последних микрозондовым методом показало наличие только одного углерода. Вполне вероятно, что они представляют собой фрагменты заключительных фаз алмазообразования.

Кроме того, некоторые включения выступают на поверхности, будучи заключенными в более глубокие приповерхностные слои кристалла. Одно из них, имеющее округлую форму, по данным микрозондового анализа состоит целиком из углерода и, по-видимому, является алмазом (рис. 70).

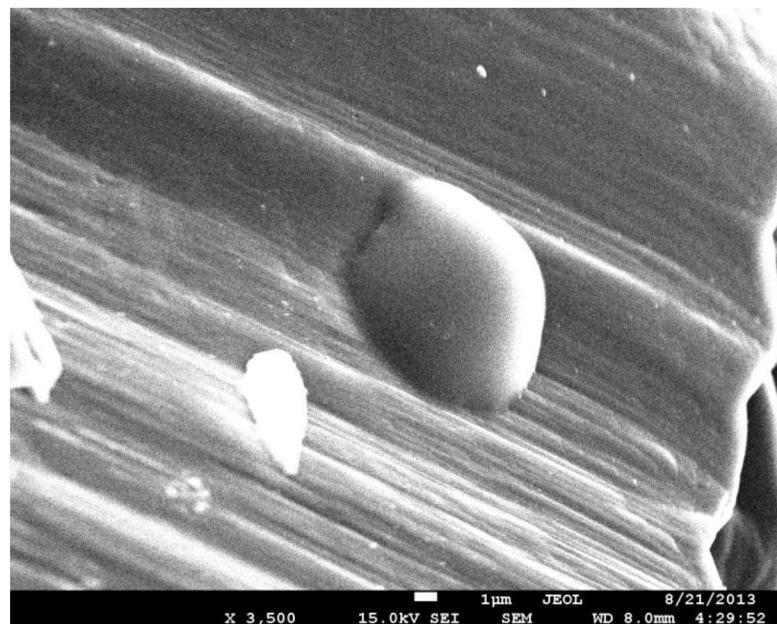


Рис. 70. Микровключение размером 10 мкм на поверхности ромбододекаэдра, р. Волынка.
Масштабная линейка – 1 мкм

В октаэдрических кристаллах алмазов из трубы Диавик (кратон Слэйв) обнаружены необычные микровключения нитевидных алмазов (Araujo et al., 2008). Они были приурочены к сильно изъеденным поверхностям кристаллов с многочисленными треугольными углублениями. Размеры микровключений составляли менее 0,5 мкм, и они концентрировались в приповерхностных слоях на глубине порядка 10–15 мкм. Характерно, что на участках кристаллов, не испытавших влияния эффекта растворения, данные микровключения отсутствуют. В составе микровключений с применением методов лазерной абляции установлено присутствие в повышенных количествах Ba, K и TR. Предполагается, что обнаруженные приповерхностные прослои, обогащенные нитевидными микроалмазами, указывают на высокие скорости их роста.

Глава IV. ПОИСКОВОЕ ЗНАЧЕНИЕ МЕЛКИХ АЛМАЗОВ

В данной главе после краткого описания существующих методов поисков коренных источников алмазов приводятся сведения об использовании мелких алмазов при поисках новых алмазоносных районов и оценке алмазоносности кимберлитов. Характеризуется состояние изученности новых алмазоносных территорий, на которых коренных месторождений алмазов промышленного значения пока не обнаружено. В заключение рассматриваются особенности рекомендуемой методики поисков коренных алмазов на основе малообъемного опробования вторичных коллекторов.

4.1. Методы поисков коренных месторождений алмазов

Среди основных методов поисков коренных алмазов, прежде всего, следует выделить поиски по самим алмазам, которые при опробовании делявиальных, пролювиальных или элювиальных рыхлых отложений вблизи кимберлитовой трубы могут быть встречены даже в шлиховых пробах (Харьков и др., 1997). История открытия многих алмазоносных кимберлитовых трубок показывает, что на первом этапе освоения крупнейших алмазоносных кимберлитовых провинций такие события происходили довольно часто. Данный метод является весьма эффективным, особенно с учетом того, что большинство кимберлитовых трубок вообще не содержат алмазов. При этом находки крупных алмазов считаются наиболее весомым признаком перспективности новых территорий на обнаружение промышленно алмазоносных кимберлитов или лампроитов.

В предшествующий период нередко новые алмазоносные районы открывались благодаря находкам непосредственно промышленных алмазов. Однако к настоящему времени возможности обнаружения новых месторождений таким способом практически исчерпаны. Сейчас приходится искать месторождения, которые по разным причинам относятся к весьма трудным для обнаружения. Это могут быть тела, перекрытые относительно мощным чехлом осадочных пород, породы с необычным минеральным составом и т.д. При их открытии все большую роль начинают играть другие, в т.ч. новые, методы поисков.

Более распространенным методом, получившим широкое распространение в поисковой практике с середины прошлого века, является шлихоминералогическое опробование рыхлых отложений с выделением минералов-спутников кимберлитовых алмазов. Их разнообразие и вариации химического состава потребовали выработки определенных критериев разбраковки зерен каждого минерального вида и выделения среди них разностей, являющихся непосредственными индикаторами алмазоносности. В результате для каждого минерала-спутника были предложены генетические диаграммы с полями, соответствующими индивидам разного происхождения, в т.ч. алмазоносного парагенезиса.

Шлихоминералогическому методу при поисках коренных алмазов придается особое значение. Все геолого-геофизические критерии, принимаемые во внимание на первом этапе прогнозно-поисковых работ, являются косвенными, лишь минералогические данные (наличие ореолов минералов-индикаторов близкого сноса) дают прямую информацию о наличии поблизости алмазоносных объектов (Ваганов и др., 2005). В то же время попутно при выявлении зерен минералов-спутников в шлихах могут быть встречены и алмазы, что значительно повышает эффективность шлихового опробования. Однако такие удачи являются чрезвычайно редкими. К этому можно добавить, что и шлихоминералогические методы не всегда являются полностью надежными.

Одновременно с шлиховым опробованием может быть применен *обломочно-валунный* метод, который позволяет иногда существенно повысить результативность поисков. В данном случае крупный обломочный материал рыхлых отложений (размером более 25 или 50 мм) просматривается непосредственно в полевых условиях. Для его отделения можно использовать сетку с соответствующим размером ячеек или ручной грохот. Обломки, похожие на кимберлиты, отбираются для более детального лабораторного исследования с изготовлением шлифов. При их диагностике рекомендуется определить минеральный состав дифрактометрическим методом и химический состав – рентгенофлюoresцентным методом.

Особенно большую конкуренцию шлиховому опробованию обломочно-валунный метод составляет на северных территориях с широким распространением ледниковых отложений. Здесь шлихоминералогический метод также применяется в больших масштабах, однако интерпретация его данных связана с рядом трудностей, обусловленных большим территориальным разносом зерен минералов-спутников. Напротив, обнаружение обломков кимберлитов вполне возможно, если учитывать тот факт, что ледниковая форма переноса крупнообломочного материала не приводит к истиранию валунов и галек кимберлитовых пород в процессе транспортировки. Перенос таких же обломков в реках сопровождается довольно быстрым их механическим разрушением.

В частности, обломочно-валунным методом была оконтурена Северо-Западная алмазоносная кимберлитовая провинция на территории Канады. Необходимость применения здесь обломочно-валунного метода была обоснована спецификой геоморфологического строения территории и широким распространением ледниковых отложений. В Сибири данным методом были открыты первые кимберлитовые трубки в бассейне р. Улаах-Муна (Харьков и др., 1997).

В последние годы все более важную роль при поисках кимберлитов играют *геофизические* методы поисков, особенно магниторазведка и, реже, гравиразведка. В данном случае серьезные требования предъявляются к методам разбраковки магнитных аномалий, поскольку заверить бурением на первом этапе по экономическим соображениям удается только небольшую их часть.

Их выбор нередко решает судьбу поискового района, на изучение которого уже были затрачены значительные средства.

Именно геофизическим методам принадлежит решающая роль в открытии Архангельской кимберлитовой провинции. В настоящее время геофизические методы являются обязательными при проведении комплексных поисковых работ на коренные источники алмазов.

Наконец, разработаны *геохимические*, в т.ч. лито-, гидро- и биохимические, методы поисков кимберлитов, основанные на выявлении сформировавшихся в рыхлых отложениях, поверхностных и подземных водах, а также в биосфере геохимических аномалий индикаторных на кимберлиты химических элементов – никеля, хрома, кобальта и др. Данный метод пока не может составить конкуренцию вышеперечисленным ввиду невозможности надежной разбраковки геохимических аномалий. Известно, что аналогичные аномалии могут быть обнаружены и вблизи обычных ультраосновных тел. Кроме того, история открытия кимберлитовых трубок не имеет соответствующих precedентов (Харьков и др., 1997).

Однако ни геофизические, ни геохимические методы не позволяют сделать уверенное заключение о присутствии на глубине кимберлитовых трубок и тем более об их алмазоносности. Не всегда геофизическими методами можно оценить глубину залегания кимберлитового тела. Экономические расчеты показывают, что при вскрыше свыше 200 м разработка любого месторождения алмазов, даже весьма крупного по запасам, будет нерентабельной.

Несмотря на разнообразие методов поисков алмазоносных кимберлитов и положительный опыт их применения, в различных странах мира существует много территорий, на которых имеются россыпи алмазов, но длительные поиски коренных источников не дают положительных результатов. Такие районы известны и в России (Западный Урал, северные районы Якутской алмазоносной провинции и др.). Задача обнаружения здесь алмазоносных кимберлитовых трубок требует как усовершенствования прогнозных, так и дальнейшего развития поисковых методов. Усиление их научно-методического обеспечения в настоящее время считается одной из приоритетных задач российской геологии (Голубев и др., 2008).

В настоящее время отдельно не выделяется метод поисков, основанный на обнаружении *мелких алмазов*, хотя он, по существу, относится к рассмотренным вначале прямым поискам, т.е. поискам «алмазов по алмазам». В развитие этой идеи сотрудниками Пермского госуниверситета еще в 60-х гг. прошлого века было рекомендовано применить малообъемное опробование отложений с целью установления присутствия в них мелких алмазов (Лунев и др., 1980; Лунев, Осовецкий, 1996).

С учетом данных о гранулометрическом спектре алмазов кимберлитов и лампроитов можно утверждать, что в пробах, отобранных из элювия или делювия около коренных объектов при проведении малообъемного опробования, мелкие алмазы будут встречаться значительно чаще, чем крупные, и

тем самым имеют важнейшее поисковое значение. Однако высказываются принципиальные соображения против применения поисковых методов, основанных на выявлении мелких алмазов.

В развернувшейся дискуссии о принципиальной возможности использования мелких алмазов при поисках коренных источников обосновывается точка зрения о том, что мелкие алмазы образуются не одновременно с крупными, а значительно позднее. Условия для их образования в мантии существенно иные, чем таковые для макрокристаллов. На основе этого делается вывод об отсутствии закономерной связи между ними (Pattison, Levimson, 1995).

В подкрепление такой точки зрения приводились данные о том, что в классе мелких алмазов присутствует слишком много различных морфогенетических разностей: евгедральные микрокристаллы, резорбированные зерна, их осколки, неправильной формы кристаллы, двойники, поликристаллические агрегаты и др. (Harris, 1992; Harris et al., 1994; McCandless et al., 1994). Отмечалось также резкое различие форм макро- и микрокристаллов алмаза в некоторых кимберлитовых месторождениях. Это считалось верным признаком существования разных механизмов образования крупных и мелких алмазов в одной и той же кимберлитовой или лампроитовой трубке (Haggerty, 1986; Gurney, 1989; Boyd, 1989). В частности, были высказаны мнения об особых механизмах образования мелких алмазов в кимберлитах: в результате инфильтрационного метасоматоза, дезинтеграции алмазоносных ксенолитов и др. (McCandless, 1989; Otter et al., 1994).

Обращалось также внимание на очевидный парадокс, который заключается в существенной корродированности макроалмазов и часто идеальной форме некорродированных микрокристаллов, присутствующих в одной кимберлитовой трубке. Этот парадокс также был объяснен тем, что мелкие алмазы образовались позднее крупных, когда условий для растворения алмазов в мантийной обстановке уже практически не существовало (Pattison, Levinson, 1995).

Приходится признать, что рыхлые отложения часто засорены мелкими алмазами различного генезиса. Широкая распространенность в природе пород, содержащих мелкие алмазы, и большое разнообразие их генетических типов считаются отрицательными факторами при оценке их поискового значения. По крайней мере, именно такой позиции придерживались авторитетные специалисты, высказавшие отрицательное мнение о перспективности ряда территорий на обнаружение кимберлитов (например, Воронежской области).

Причинами, ограничивающими использование мелких алмазов при поисковых работах, являются проблемы с их надежным извлечением в процессе гравитационного обогащения (при отмывке шлиховых проб в лотках или обогащении малообъемных проб на винтовом сепараторе). Невысокая плотность и небольшой размер зерен алмазов вызывают необходимость промывки проб до серого шлиха с сохранением значительной доли легких минера-

лов. При обогащении на сепараторе требуется получать концентрат довольно значительной массы. В том и другом случаях следствием является заметное удорожание последующих лабораторных работ. Так, на лабораторной стадии обработки шлихов и концентратов предполагается выполнить много разнообразных операций (разделение в тяжелой жидкости, магнитная и электромагнитная сепарация, химическое травление в щелочи и др.). Наконец, для отбора зерен алмазов под бинокуляром и их диагностики необходима высокая квалификация специалиста и наличие соответствующей аналитической аппаратуры (в частности, микрозонда).

Все указанные выше причины не являются веским основанием для исключения мелких алмазов из поисковой практики. Хотелось бы особо подчеркнуть, что одновременные находки крупных и мелких алмазов в поисковых пробах являются особенно благоприятным фактором, свидетельствующим о близости кимберлитового тела. Об этом можно судить по данным гранулометрического состава алмазов в россыпях близкого сноса (например, Нюробинской россыпи) (см. гл. I).

Наличие отчетливо выраженных типоморфных особенностей мелких алмазов кимберлитов, в частности, характерных морфологических признаков и деталей строения поверхности, позволяет провести надежную разбраковку их находок и вычленение тех разностей, которые имеют явно кимберлитовое происхождение. Материалы, приведенные в данной монографии, дают дополнительную полезную информацию, позволяющую надежно разбраковывать мелкие алмазы.

При этом нередко обнаружение некимберлитовых мелких алмазов также представляет определенный поисковый интерес. В частности, находки импактных и коровых алмазов являются поисковыми индикаторами проявлений технических алмазов соответствующего генетического типа.

Широкое внедрение в полевую практику современных малогабаритных винтовых сепараторов, не требующих электроснабжения, позволяет успешно решать задачи обогащения малообъемных проб с достаточно полным извлечением мелких алмазов. Эффективность современных лабораторных методов обработки концентратов, выделения алмазного ультраконцентрата и диагностики мелких алмазов подтверждена многочисленными работами. Относительно особенностей лабораторной стадии обработки концентратов можно заметить, что во многом операции выделения и диагностики для мелких алмазов и минералов-спутников совпадают.

Что касается генетического своеобразия мелких алмазов кимберлитов, то оно ни в коей мере не препятствует их отнесению к типичным мантийным минералам, присутствующим в кимберлитах. Это подтверждается данными гранулометрического состава общей совокупности кристаллов алмазов, которая представляет собой однообразную генерацию, характеризующуюся одновершинной логнормальной кривой распределения зерен по крупности.

Можно выделить еще одну причину, способствующую привлечению внимания к мелким алмазам при поисках кимберлитов. Этой причиной явля-

ется неалмазоносность большинства кимберлитовых трубок, усилия по открытию которых приводят к значительным потерям времени и средств, потраченных практически впустую. Именно поэтому обнаружение мелких алмазов наряду с минералами-спутниками при условии квалифицированной разбраковки их по генетическим группам значительно повышает перспективы выхода на алмазоносные коренные источники.

Анализ научной литературы последних десятилетий показывает постоянное увеличение числа работ, посвященных изучению мелких алмазов и их поисковой роли. Многие исследователи считают, что мелкие алмазы весьма полезны при оценке перспектив новых алмазоносных территорий и разбраковке промышленной ценности уже обнаруженных кимберлитов. Последняя задача может быть решена в два этапа: 1) подтверждением присутствия алмазов в обнаруженных кимберлитовых трубках и 2) оценкой содержаний алмазов промышленной крупности по находкам мелких алмазов в малообъемных пробах – от 20 до 100 кг (Deakin, Boxer, 1989; Jennings, 1990; Rombouts, 1994; Pattison, Levinson, 1995; Chapman, Boxer, 2004).

Информация по мелким алмазам обрабатывается, анализируется и хранится в научных фондах. Например, при прогнозно-поисковых исследованиях в ЯНИГП ЦНИГРИ используется база данных, обобщающая результаты более чем 50-летних работ на Сибирской платформе. Одной из составных частей базы данных является сводка по результатам морфологического описания алмазов, в которой аккумулируется информация раздельно по размерным фракциям, начиная с 32–16 мм и заканчивая классами 1–0,5 и 0,5–0,2 мм (Ковальчук и др., 2005).

Ниже приводится конкретная информация о роли мелких алмазов при проведении поисковых работ на кимберлиты, об оценке степени их алмазоносности и рекомендуемая методика малообъемного опробования с извлечением мелких алмазов.

4.2. Роль мелких алмазов при открытии кимберлитовых и лампроитовых провинций и полей

При работе над этим параграфом нами обработаны многочисленные литературные источники по истории открытия кимберлитовых и лампроитовых провинций, а в их пределах – полей и отдельные тел. Во многих источниках упоминается о находках алмазов на новых перспективных территориях, однако, к сожалению, не указывается их крупность. В конечном итоге ниже приводится информация только о тех алмазоносных площадях или объектах, при открытии и изучении которых было акцентировано внимание на прогнозно-поисковой роли мелких алмазов.

Находки мелких алмазов сыграли особенно важную роль при открытии лампроитовой трубки Аргайл-1 в Австралии. Этому способствовали два фактора: с одной стороны, заметное смещение гранулометрического спектра зерен алмазов в лампроитах в сторону мелких классов и, с другой – повышен-

ная встречаемость мелких алмазов в лампроитах, по сравнению с кимберлитами. История открытия месторождения Аргайл-1 является наиболее показательным примером, который свидетельствует об эффективности использования мелких алмазов в качестве поискового признака на коренные источники.

В 1967 г. были подведены итоги ранее проведенных поисковых работ на коренные источники алмазов на территории Западной Австралии. Отмечено, что общий объем опробованных пород на это время составил 650 т. В них было обнаружено 52 алмаза, средний размер которых не превышал 0,2 мм. Следовательно, встречаемость мелких алмазов в среднем составила один кристалл на 12,5 т породы. На данном этапе предпосылкой продолжения, активизации и выбора объектов дальнейших поисковых работ являлись геологические, геофизические данные и находки мелких алмазов.

В 1976 г. на намеченных к изучению площадях в пробах общей массой 40 т было обнаружено уже 300 алмазов, также преимущественно мелких классов. Следовательно, встречаемость мелких алмазов, которые являлись основным критерием при выборе направлений поисковых работ, существенно возросла и составила один алмаз на 133 кг породы.

Наконец, на выявленных по мелким алмазам перспективных участках в пределах изучаемых площадей было развернуто широкомасштабное поисковое опробование с отбором и обогащением проб массой 40 кг, что и привело в 1979 г. к открытию трубки Аргайл-1 (Каминский, 1987; Гаранин, 1989).

История проведения поисковых работ на кимберлиты в Канаде является другим наглядным подтверждением разумного и эффективного комплексного использования современных методов поисков кимберлитов с учетом поисковой роли мелких алмазов.

На одной из перспективных поисковых площадей (Екати) в пределах Северо-Западных территорий Канады на ранней стадии прогнозно-поисковых работ были использованы традиционные шлихоминералогические методы с опробованием речных, флювиогляциальных и ледниковых отложений на участках площадью в десятки квадратных километров. При обработке шлихов в лаборатории из тяжелой фракции были выделены минералы-спутники и микроалмазы. Они взвешивались и детально описывались. При интерпретации результатов в качестве первоочередных на продолжение поисковых работ выделялись участки, в пределах которых в шлихах были обнаружены микроалмазы. При этом учитывалось их количество, качество и размер зерен.

Результаты работ на данной стадии были признаны многообещающими. В связи с этим на следующей стадии на перспективных участках были применены геофизические методы. В свою очередь результаты геофизических методов подтвердили перспективность площади на обнаружение кимберлитов. Примерно 350 точек, намеченных на основе выделения геофизических и шлихоминералогических аномалий, а также находок мелких алмазов, были разбурены. В результате было обнаружено 150 кимберлитовых тел (Heimersson et al., 2013).

Исключительно широкое распространение алмазоносных кимберлитов, не перекрытых вскрышными породами, на территориях Южной и Центральной Африки способствовало обнаружению алмазов даже на стадии первичного опробования рыхлых отложений. В последние годы в связи с поисками более сложных по геологическим условиям залегания кимберлитовых тел мелкие алмазы учитываются как важный поисковый индикатор. Например, в конце прошлого века при региональном шлихоминералогическом опробовании в пределах ряда площадей на территории Мавритании были обнаружены пиропы, хромдиопсиды и микроалмазы, что дало возможность выделить эти площади как новый алмазоносный район, перспективный на поиски кимберлитов. Всего же в период с 1997 по 1999 г. в отобранных 15 тысячах шлиховых проб здесь было обнаружено несколько тысяч зерен минералов-спутников и сотни микроалмазов, а на отдельных участках – и макроалмазы. В течение одного года при заверке магнитных аномалий на территории одной из площадей были вскрыты четыре кимберлитовые трубки, одна из них оказалась алмазоносной (Подчасов и др., 2005).

В Северо-Припятском районе Белоруссии выявлены 31 трубка взрыва щелочно-ультраосновных пород (Жлобинское и Уваровичское поля). В восьми трубках обнаружены кристаллы алмаза размером 0,17–0,3 мм (Савко, Шевырев, 2005). К настоящему времени на территории республики выделено 7 перспективных площадей на обнаружение алмазоносных кимберлитов.

Средний Тиман на протяжении половины столетия является районом напряженных поисковых работ на алмазы. Основное внимание при этом на первом этапе уделялось шлиховому и малообъемному опробованию. Первые успехи были достигнуты еще в 50-х гг. прошлого века и заключались в обнаружении семи мелких кристаллов алмазов с полным отсутствием следов износа в аллювии рек Цильмы, Мезенской и Печорской Пижмы.

В 70-х гг. при разбуривании магнитных аномалий были обнаружены три трубки – Умбинская, Средненская и Водораздельная, первоначально принятые за кимберлитовые. В Умбинской трубке был найден мелкий осколок алмаза. Дальнейшее изучение и опробование обнаруженных тел привело к изменению представления об их генезисе. В частности, была высказана точка зрения об их принадлежности к особому типу альнеитов с эруптивными брекчиями и туфобрекчиями (Мальков, Холопова, 1995). Данные образования были признаны неперспективными на промышленные алмазы.

При продолжении работ в бассейне р. Цильмы в конце 70-х гг. в аллювии р. Б.Крутой были найдены пиропы и мелкий осколок алмаза. Затем алмазы были обнаружены в современном аллювии рек Умбы и Средней, а далее – в среднедевонских грубозернистых породах месторождения Ичетью. На Косьюском участке были обнаружены кимберлитовые трубки, в т.ч. с алмазом. Эти работы позволяют считать Средний Тиман одним из перспективных алмазоносных районов России (Плякин, Щербаков, 2006).

Мелкие алмазы играют заметную роль при проведении поисковых работ на кимберлиты в Карелии. Здесь широко применялась методика опробо-

вания речных и ледниковых отложений, основанная на отборе проб массой 40–80 кг. Обработка проб проводилась с использованием операций грохочения, гравитационного обогащения на шейкере, разделения концентрата в тяжелой жидкости. Из тяжелой фракции отсеивалась фракция размером более 0,4 мм, которая просматривалась под бинокуляром с отбором зерен алмазов и индикаторных минералов.

Результатом исследований явилось обнаружение двух алмазов размером 0,4 мм совместно с пиропами и хромшпинелидами на поисковой площади Укшозера. Всего исследований по данной методике было проведено на нескольких поисковых площадях, примыкающих к ранее обнаруженному кимберлиту Кимозеро. Только на одной из них совместно с минералами-спутниками были найдены мелкие алмазы, что выдвинуло данную площадь в число первоочередных на продолжение поисковых работ.

В пределах Лужского кимберлитового района, который входит в Псковскую кимберлитовую область, опробованы базальные отложения верхнего девона – конгломератобrekции, в которых обнаружено 12 алмазов размером от 0,5 до 1,5 мм (Савко, Шевырев, 2005).

Относительно недавно обнаруженное Приазовское кимберлитовое поле, располагающееся в зоне сочленения Воронежской антеклизы и Украинского щита с Днепровско-Донецкой впадиной, сопровождается ореолом распространения минералов-спутников и мелких алмазов.

4.3. Установление алмазоносности кимберлитов по мелким алмазам

Известно, что абсолютное большинство кимберлитовых тел не содержит алмазов. Поэтому предварительная оценка их алмазоносности непосредственно после обнаружения представляет собой важный этап исследований. С учетом необходимости дробления и трудоемкости обогащения кимберлитов, желательности отбора нескольких проб, характеризующих разные фации и разновременные фазы внедрения, на первом этапе рекомендуется применить малообъемное опробование с отбором и обогащением образцов массой в несколько десятков или сотен килограммов. Кроме того, нередко приходится использовать материал керна скважин, весьма ограниченный по массе. Такие пробы вполне представительны для обнаружения мелких кристаллов алмазов. При отсутствии алмазов в пробах можно сделать вывод о неперспективности данного объекта в качестве промышленного месторождения.

Обнаружение мелких алмазов дает основания для перехода на более представительное крупнообъемное опробование (масса проб более 1 т). Кроме того, количественное содержание мелких алмазов может быть использовано для предварительной оценки степени алмазоносности кимберлита. В связи с этим некоторые исследователи уделили большое внимание установлению зависимости между содержанием крупных и мелких алмазов.

Специализированные работы в этом направлении были проведены на примере кимберлитов Северо-Западных территорий Канады (площадь Лак де

Грас) в 1991–1994 гг. С этой целью использованы результаты опробования семи кимберлитовых трубок с отбором и обогащением малообъемных проб массой от 59 до 314 кг. Ниже на рис. 71 отражены сопоставительные данные по находкам крупных и мелких алмазов, причем число находок алмазов приведено к условной пробе массой 100 кг (Pattison, Levinson, 1995).

Связь между количеством находок крупных и мелких алмазов в кимберлитах Канады оказалась прямо пропорциональной, причем число мелких алмазов в 3–6 раз превышало количество крупных.

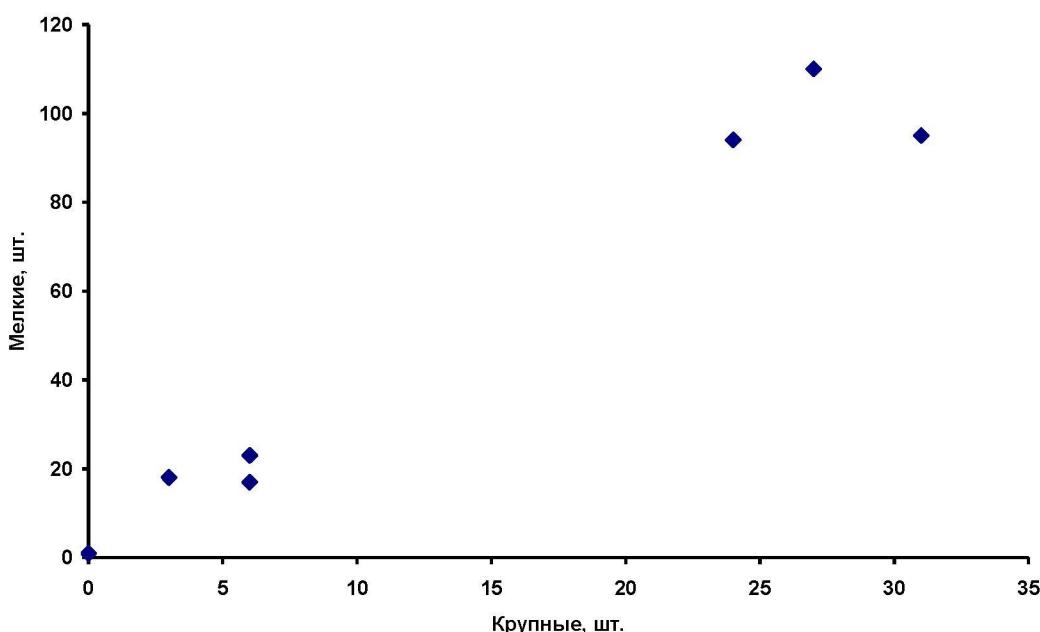


Рис. 71. Связь между количеством крупных и мелких алмазов в кимберлитах площади Лак де Грас (Северо-Западные территории Канады)

Это вывод наглядно подтверждается гораздо более представительными данными, полученными при изучении достаточно полного гранулометрического спектра алмазов из трубок Удачная-Западная и Удачная-Восточная. На графике (рис. 72) приведены сопоставительные данные по количеству находок крупных (крупнее 1 мм) и мелких (от 1 до 0,2 мм) алмазов для этих трубок (по данным Барашкова, Алтуховой, 2005; см. гл. I). Как и в предыдущем случае, количество находок мелких кристаллов в 3–8 раз превышало число крупных.

Устойчивое соотношение числа находок мелких и крупных алмазов в кимберлитах дает возможность использовать его с целью предварительной оценки степени алмазоносности кимберлитовых тел. Преимуществом такого подхода является возможность отбора относительно небольшой по массе исходной пробы, которая может быть целиком разложена термохимическим способом или подвергнута тщательному гравитационному обогащению (Граханов и др., 2007). Даже если при обработке такой пробы в ней будут найде-

ны только мелкие кристаллы алмаза (менее 1 мм), то их количество может свидетельствовать о вероятном содержании алмазов промышленного размера.

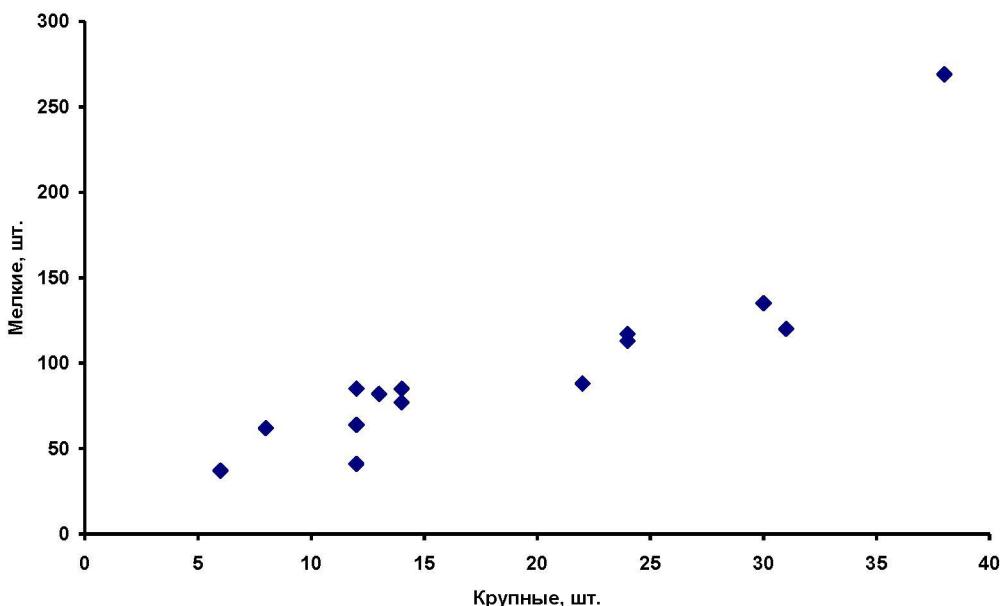


Рис. 72. Связь между количеством крупных и мелких алмазов в трубке Удачная (Якутия)

Кроме того, специалисты компании «Де Бирс» установили зависимость между содержанием алмазов и количеством микрокристаллов определенного морфологического типа. Для дополнительной проверки этого вывода на примере российских объектов были изучены коллекции микрокристаллов алмаза из трубки имени В.Гриба и месторождения имени Ломоносова (Веричев и др., 2005), которые существенно различаются как по степени алмазоносности, так и по морфологии мелких алмазов. В частности, в высокоалмазонесной трубке Гриба среди микрокристаллов алмазов преобладают октаэдры, а в значительно менее алмазонесной трубке Пионерская – сильно растворенные алмазы, вплоть до коробчатых скелетных форм.

Полученные данные подтверждают вывод о связи морфологических особенностей макро- и микрокристаллов алмазов и позволяют проводить предварительную оценку качества алмазного сырья при сравнительно небольших объемах опробования по типоморфным особенностям обнаруженных микрокристаллов алмаза.

Данная стратегия опробования обнаруженных кимберлитовых тел успешно применяется на практике. Показательным примером использования мелких алмазов при оценке алмазоносности кимберлитов являются работы, выполненные в провинции Саскачеван на площади Форт а ля Корне (*Канада*). Первые предсказания о том, что данная площадь перспективна на обнаружение кимберлитов, были высказаны сотрудниками Геологической службы Канады в июле 1988 г. после анализа результатов магнитометрической

съемки. В кратчайшие сроки геофизиками была проведена разбраковка выделенных магнитных аномалий и намечены объекты для бурения. Уже в июле следующего года первая скважина вскрыла кимберлитовое тело, а до конца 1989 г. все семь заложенных в этом году скважин пересекли кимберлиты.

Следующей задачей, которую решали геологи Канады, было выполнение малообъемного опробования обнаруженных тел кимберлитов с отбором и обогащением проб массой от 30 до 50 кг. Соответственно перед минералогами была поставлена задача установления присутствия в пробах мелких кристаллов алмазов и индикаторных минералов, характерных для алмазоносных кимберлитов. В результате опробования были получены ожидаемые положительные результаты: в большинстве проб извлечены мелкие кристаллы алмазов (размером менее 0,5 мм); в некоторых из них – отдельные кристаллы размером более 0,5 мм, которые отличались высоким качеством. Кроме того, в пробах были обнаружены все типичные минералы-спутники алмазов. С учетом количества и ювелирного качества обнаруженных мелких алмазов, а также химического состава и морфологических особенностей минералов-спутников некоторые кимберлитовые тела были оценены как потенциально промышленные месторождения, а другие – как малоперспективные.

Следующая проблема оказалась еще более сложной. Обнаруженные кимберлитовые тела были перекрыты вскрышными породами мощностью до 100 м. Для выполнения крупнообъемного опробования, которое могло бы достоверно подтвердить промышленную ценность кимберлитов, необходимо было провести бурение большим диаметром, что является чрезвычайно дорогостоящей операцией. Исходя из этого решено было ограничиться разбуриванием только нескольких тел с увеличением диаметра части скважин со 150 до 280 мм. Всего было пробурено в 1990–1991 гг. 12 скважин большого диаметра и 20 – малого диаметра. Оценку степени алмазоносности кимберлитов предложено было проводить одновременно с учетом содержания макро- и микрокристаллов алмазов, а также наличия соответствующих минералов-спутников. Всего было отобрано из керна скважин, вскрывших 18 кимберлитовых тел, 35 проб общей массой 186 т.

В общей сложности было обнаружено 160 кристаллов алмазов. Наиболее крупный из них имел размеры 5,5x5,0 мм. В большинстве проб содержание алмазов оказалось менее 0,02 кар/т, в трех пробах оно было выше, а в одной из них достигало 0,1 кар/т. Однако расчеты показали, что минимальное содержание, необходимое для рентабельной отработки месторождения, должно быть не менее 0,3 кар/т.

Тем не менее, учитывая большое количество выделенных магнитных аномалий и ранее вскрытых, но еще не опробованных кимберлитовых тел, изученная площадь представляется в целом перспективной на продолжение поисковых работ (Lehnert et al., 1992).

Наиболее масштабные опробовательские работы выполнены на Северо-Западных территориях Канады. Здесь после обнаружения первого кимберлитового тела (1991 г.) в процессе бурения скважины до глубины 280 м

было применено предварительное опробование с обработкой керна массой 59 кг. В этой пробе был найден 81 кристалл алмаза размером менее 2 мм, преобладающая их часть относилась к мелким. На следующий год бурением было обнаружено еще девять кимберлитовых тел. В первой же керновой пробе массой 40 кг было обнаружено 10 микрокристаллов алмаза и один более крупный алмаз промышленного размера. Наконец, в дальнейшем на той же территории было открыто несколько десятков кимберлитовых трубок, которые также подвергались малообъемному опробованию по керну. В кимберлите одной из трубок было установлено повышенное количество алмазов размером менее 0,5 мм (Харьков и др., 1997).

После обнаружения кимберлитов на перспективной площади Екати (Северо-Западные территории Канады) были выбраны трубки, приоритетные для постановки крупнообъемного опробования. Во внимание принимались данные о находках микроалмазов и химическом составе минералов-спутников, полученные при шлиховом опробовании. На основе этих показателей были опробованы на промышленные алмазы 40 кимберлитовых трубок с отбором материала керна скважин большого диаметра или крупнообъемных проб с поверхности. В результате для 17 трубок получены положительные результаты, основанные на содержании макроалмазов.

При статистической обработке всех полученных результатов крупнообъемного опробования были построены графики соотношения числа находок микро- и макроалмазов (крупнее 0,85 мм). Связь оказалась прямая и достаточно тесная, при этом количество микроалмазов примерно на порядок превышало число макрокристаллов (Heimersson et al., 2013).

С применением комплекса геофизических и шлихоминералогических методов на территории Канады была оконтурена еще одна значительная по площади щелочно-ультраосновная Восточная провинция юрского возраста, в пределах которой обнаружены кимберлиты. Все кимберлиты содержали типичные минералы-индикаторы мантийного происхождения (пироп, пикрольменит, высокохромистый хромшпинелид). На этапе первичного опробования с обогащением проб массой до нескольких сотен килограммов в ряде кимберлитовых тел были обнаружены мелкие алмазы (Харьков и др., 1997).

На территории Зимбабве первые кимберлитовые тела (трубка Коллес и силл Веселье) были открыты еще в начале прошлого века. Позднее, в 70–80-х гг. было выявлено несколько десятков кимберлитовых тел, но только некоторые из них содержали повышенное количество алмазов. В двух из них на предварительном этапе опробования были обнаружены микроалмазы, которые сопровождались находками пиропов алмазной ассоциации (Харьков и др., 1997). Совместное обнаружение мелких алмазов и минералов-спутников в малообъемных пробах геологами принято в качестве надежного критерия алмазоносности кимберлитов.

Для слабо- и убогоалмазоносных трубок Золотицкого, Ижемского и Кепинского полей (*Архангельская кимберлитовая провинция*) также была установлена тенденция увеличения количества микроалмазов с возрастанием

степени алмазоносности пород (Ларченко и др., 2005). На основе этого факта дана рекомендация определять содержание мелких алмазов на ранней стадии изучения кимберлитов с целью предварительной оценки степени их алмазоносности.

Здесь же в одной из вновь открытых (2005 г.) кимберлитовых трубок – ЦНИГРИ-Архангельская – на Кепинской площади Зимнебережного кимберлитового поля с целью установления степени ее алмазоносности была отобрана пробы массой свыше 1 т. В результате ее обогащения было обнаружено 6 кристаллов алмаза общей массой 8,76 мг. Самым крупным из них оказался октаэдрический алмаз в классе 1–0,5 мм (Голубева и др., 2008).

С использованием данных о находках мелких алмазов была доказана алмазоносность двух кимберлитовых трубок *Терского берега*. В диатреме Ермаковская-7 в пробе массой 8,2 т было обнаружено 132 зерна алмаза размером от 1 до 0,1 мм; в диатреме Ермаковская-20 из пробы массой 0,42 т извлечено 5 кристаллов. Первая из них была признана наиболее перспективной на обнаружение промышленной алмазоносности и в связи с этим была подвергнута дополнительному контрольному опробованию. В новой пробе из трубы Ермаковская-7 снова были найдены алмазы, включая кристаллы промышленного класса 2–1 мм. Однако алмазы размером 1–0,5 мм преобладали по количеству штук, что характерно для всех кимберлитов с промышленной алмазоносностью (Савко, Шевырев, 2005).

В США при установлении алмазоносности кимберлитовой трубы Шафер, вместо трудоемкого и затратного процесса обработки валовой пробы кимберлита, было применено избирательное обогащение ксенолитов глубинных пород. В одном из них, представленном серпентинизированным гранатовым лерцолитом, после растворения в плавиковой кислоте было обнаружено несколько кристаллов алмаза размером около 1 мм в поперечнике. Данный результат был принят как прямое доказательство алмазоносности кимберлита, а принятая методика опробования оказалась экономически весьма эффективной.

По другой методике были опробованы кимберлиты нескольких трубок, расположенных в штатах Колорадо и Вайоминг. Всего из изученных проб было извлечено 78 алмазов, из которых 54 зерна имели размер менее 1 мм. В то же время самый крупный алмаз имел массу 11,8 мг. Среди кристаллов алмазов преобладал октаэдрический тип (McCallum et al., 1979).

На территории Венесуэлы малообъемному опробованию подвергались выветрелые разности кимберлитовых силлов, обнажающихся на поверхности. Из пробы объемом 30 л было извлечено около 70 мелких осколков алмазов размером в основном от 0,5 до 0,25 мм, среди них присутствовало два кристалла размером около 1,5 мм (Подчасов и др., 2005).

На территории штата Мадхья-Прадеш (*Индия*) в 2002 г. было проведено контрольное опробование четырех кимберлитовых трубок. Результаты опробования показали, что все трубы являются алмазоносными, но в одной из них установлено особенно высокое содержание микроалмазов (более

0,35 кар/т). Эти результаты позволили продолжить поисковые работы с опробованием в более широких масштабах (Подчасов и др., 2005).

Все приведенные выше примеры наглядно показывают полезность и экономическую эффективность применения методики малообъемного опробования с извлечением мелких алмазов на первой стадии оценки алмазоносности вновь обнаруженных кимберлитов. В то же время в научной литературе приводится и негативная информация, основанная на неудачных попытках использования мелких алмазов при прогнозировании промышленной алмазоносности кимберлитов. Так, применение той же зависимости, которая была установлена для кимберлитов площади Лак де Грас в Канаде (см. рис. 70), для оценки алмазоносности кимберлитов другого кимберлитового поля не привело к положительному результату (Patterson, Levinson, 1995). Было предложено следующее объяснение: крупные алмазы могли превратиться в мелкие или даже быть уничтожены в результате интенсивного растворения. Если принять данное предположение как вероятное, то можно оценивать влияние фактора мантийного растворения с применением методов электронной микроскопии и детальным изучением морфологии и поверхности алмазов. С учетом этого необходимо внести соответствующие корректизы в методику оценки алмазоносности кимберлитов с использованием мелких алмазов.

Аналогичная методика предварительной оценки алмазоносности с определенными ограничениями может быть успешно применена и для россыпей. В качестве подтверждения приведем сопоставление данных о встречаемости крупных (более 1 мм) и мелких кристаллов алмазов в россыпях западного склона Урала. В среднем для Вишерского алмазоносного района их соотношение составляет 1:40, для Яйвинского – 1:9. На примере одной из детально опробованных россыпей установлено, что один крупный кристалл алмаза в среднем встречен в 172 м^3 породы, в то время как один мелкий – в $2,1 \text{ м}^3$. Для россыпей бассейна р. Чикман аналогичное соотношение составляет 24 и $2,5 \text{ м}^3$. Примечательно, что при опробовании одного из объектов (бассейн р. Акчим) в поисковых пробах объемом до 1 м^3 мелкие алмазы вообще не были обнаружены. Крупнообъемное опробование показало, что изученное россыпепроявление не является промышленно алмазоносным (Лунев, Осоворецкий, 1996).

4.4. Перспективные районы с находками мелких алмазов

К настоящему времени на территории земного шара установлено большое количество районов, перспективных на обнаружение кимберлитов. Специалистами применяется специальное ранжирование этих территорий по степени перспективности на обнаружение кимберлитов с присвоением соответствующего рейтинга.

Отнесение районов поисков к перспективным, в первую очередь, производится на основе анализа истории развития земной коры, глубинного геологического строения, наличия кратонов (соответствие правилу Клиффорда)

и ослабленных (проницаемых) зон земной коры – авлакогенов и др. При отсутствии других данных этим территориям, удовлетворяющим типичным для кимберлитовых провинций геолого-тектоническим критериям, обычно присваивается наиболее низкий рейтинг по перспективности на коренные источники алмазов.

Более высокий рейтинг присваивается территориям, на которых наряду с благоприятными геолого-тектоническими критериями обнаружены минералы-спутники алмаза и даже обломки кимберлитов. При этом разбраковка индикаторных минералов на основе данных химического состава с использованием генетических диаграмм (особенно для пиропов, пикроильменита, хромшпинелидов и хромдиопсида) должна показывать их соответствие алмазоносному парагенезису. Вместе с тем на достаточную близость коренных источников могут указывать крупные размеры зерен минералов-спутников и их морфологические признаки (низкая степень окатанности, сохранность мантийной поверхности кристаллов и т.д.).

Следующим критерием, способствующим значительному повышению рейтинга перспективности района на коренные источники, является обнаружение, наряду с минералами-спутниками, мелких алмазов с единичными находками алмазов промышленных классов (крупнее 1 мм). При характеристике мелких алмазов на основе их тщательной разбраковки должно быть обосновано явное преобладание разностей кимберлитового происхождения. Особенno благоприятным признаком близости кимберлитов (или лампроитов) является преобладание осколков достаточно крупных размеров (более 0,5 мм), реконструкция которых позволяет отнести их к фрагментам дробления кристаллов алмаза промышленного размера. В этом отношении большую помошь могут оказать методы электронной микроскопии, которые позволяют по характерным микроформам поверхности даже мельчайших сохранившихся фрагментов граней установить кристаллографическую принадлежность алмазов.

В данной главе характеризуются только те районы, которые соответствуют последнему рейтингу. Приведенный анализ имеющейся информации отражает роль мелких алмазов при оценке перспектив территории на обнаружение кимберлитов.

4.4.1. Территория Якутской кимберлитовой провинции и прилегающие районы

Огромная площадь территории Якутской кимберлитовой провинции и труднодоступность многих районов создает определенные трудности при поисках новых кимберлитовых площадей. Например, в северных районах Якутии открыты россыпи с необычными свойствами алмазов, первоисточниками которых предположительно являются еще не обнаруженные кимберлитовые трубки.

На многих площадях, непосредственно примыкающих к территории Якутской алмазоносной провинции, в настоящее время ведутся поисковые работы на кимберлиты, сопровождающиеся находками минералов-спутников и алмазов, в т.ч. мелких.

Одним из перспективных районов является *Енисейский кряж*. В частности, в бассейне р. Большой Пит, в Заангарской части Енисейского кряжа, выделен Большепитский алмазоносный район. Здесь в аллювиальных отложениях обнаружены мелкие алмазы. Так, в бассейне нижнего течения данного водотока найдено 8 алмазов массой от 1 до 130 мг. Другим перспективным районом является Вельминский, приуроченный к бассейну одноименной реки. Здесь обнаружено 12 кристаллов алмаза (Курганьков, Кузьмин, 2006).

К районам, обладающим определенными перспективами на обнаружение коренной алмазоносности, относится ряд площадей в пределах южной окраины Сибирской платформы, территориально принадлежащих *Красноярскому краю*. С учетом опыта проведения прогнозно-поисковых работ на новых площадях здесь алмазоносные объекты выявляются на основе использования стадийной технологии геологого-разведочного процесса. На начальной стадии работ проводится комплексное изучение и опробование осадочных коллекторов алмазов разного возраста (Митюхин, Лелюх, 2005). В них, наряду с выявлением минералов-спутников, важное поисковое значение могут иметь и мелкие алмазы.

Одной из детально изученных является Тангуй-Удинская алмазоносная площадь, расположенная в Нижнеудинском районе *Иркутской области*. На этой площади установлены три перспективных участка с находками алмазов промышленных классов крупности. Они сопровождаются также находками мелких алмазов. Так, на Таловском участке в устье р. Таля и в 0,5 км вверх по ее течению обнаружено 7 алмазов размером менее 0,5 мм в форме поликристаллических сростков ромбододекаэдов и октаэдов. Среди них присутствуют и осколки кристаллов, которые по оценке отнесены к разностям ближнего сноса. На Болотном участке (р. Тарма) обнаружено 144 алмаза общей массой 5675 мг, среди которых присутствуют как крупные (начиная с класса 8–4 мм), так и мелкие (менее 0,5 мм). Отсутствие сортировки алмазов по крупности и большое количество обнаруженных алмазов разного размера рассматриваются как надежные признаки присутствия на данной территории кимберлитовых трубок с промышленной алмазоносностью (Черкасов, Сержантова, 2005).

4.4.2. Украинский кристаллический щит

Территория Украинского кристаллического щита и прилегающих к ней районов является одной из наиболее детально исследованных в отношении предпосылок на обнаружение кимберлитов. При этом выявлению и изучению мелких алмазов придается большое значение. Работы по поискам алмазов здесь начались еще в 50-х гг. прошлого века. Они довольно быстро привели к

определенным результатам. Так, мелкие алмазы и единичные более крупные индивиды (масса наиболее крупного составила 40,1 мг, размер около 2,5 мм) были обнаружены в русловом аллювии рек Днестра, Ирши, Синюхи и Базавлуга (Юрк и др., 1973).

После этих находок украинскими геологами была предложена принципиально новая стратегия поисков, предусматривающая возможность массового выявления мелких алмазов, благодаря опробованию мелкозернистых песков титаноциркониевых россыпей Украинского щита. Работами, проведенными сотрудниками Института минеральных ресурсов в 1963–1970 гг. по опробованию прибрежно-морских титаноциркониевых россыпей неогенового возраста на территории Среднего Приднепровья и Днепровско-Донецкой впадины, удалось выделить значительное количество алмазов размером менее 0,25 мм. При этом содержание алмазов в россыпных песках варьировало пропорционально выходу тяжелой фракции, что отражает влияние волнового механизма их концентрации.

Морфология обнаруженных мелких алмазов в одной из детально изученных россыпей правобережья Среднего Приднепровья характеризовалась преобладанием уплощенных зерен и осколков кристаллов (55–69%), доля целых кристаллов составляла 24–36%. Последние в основном представлены кубами, в существенно меньших количествах присутствовали комбинационные и октаэдрические кристаллы. На некоторых кристаллах отчетливо прослеживались следы механического износа, что позволяло сделать вывод о длительном перемещении их в водных потоках от источников питания. Вероятно, именно эта особенность прибрежно-морского россыпнеобразования обусловила отсутствие минералов-спутников, которые вполне могли быть механически уничтожены в процессе волновой сортировки.

В другой опробованной россыпи при обогащении пробы массой несколько тонн было выделено и детально исследовано несколько сотен алмазов с размером зерен от 0,05 до 0,38 мм. Среди них также преобладали осколки кристаллов (58%), на долю правильных кристаллических форм приходилось 36%. В составе последних кубы составляли 42%, комбинации с присутствием граней куба, октаэдра и ромбододекаэдра – 37%. Октаэдрические кристаллы имели резко подчиненное значение.

Изучение распространенности мелких алмазов в различных россыпях позволяло сделать вывод о том, что один из первоисточников алмазов мог быть расположен в северо-западной части Украинского кристаллического щита. С другой стороны, находки алмазов на территории Днепровско-Донецкой впадины указывали на возможность существования еще одного источника питания, приуроченного к Воронежской антеклизе.

К настоящему времени подведены итоги многолетних работ по изучению алмазоносности территории Украины, в которых данные по находкам мелких алмазов играют наиболее важную роль. В частности, составлена прогнозная карта алмазоносности территории Украины масштаба 1:1000000 с учетом тектономагматических, минералогических и геофизических критери-

ев. На ней выделено 6 перспективных минерагенических зон: Волыно-Подольская, Побужская, Приднепровская, Приазовская, Кухотско-Вольская и Донецкая.

Первая из них приурочена к зоне Волыно-Подольского перикратона. Для данной минерагенической зоны характерно присутствие нескольких перспективных алмазоносных формаций. Однако достаточно надежно в настоящее время могут быть охарактеризованы только те, в отложениях которых обнаружены концентрации мелких зерен алмаза. В частности, к таковым относятся метаморфические формации докембрия, в т.ч. формация эклогитов и (или) эклогитоподобных пород с алмазами кокчетавского типа, формация алмазоносных слюдитов и формация филлитов, алмазоносность которых предполагается по аналогии с бразильскими филлитами. Кроме того, мелкие алмазы характерны для четвертичных отложений галечно-песчаной формации с обломочным материалом преимущественно ледникового происхождения (флювиогляциальные и озерные фации) (Яценко, 2005).

При изучении вендских отложений Волыно-Подолии обнаружены алмазы размером менее 1 мм, совместно с ними найдено 5 кристаллов размером от 1 до 3,25 мм. Из них 60% представлены октаэдрами, есть округлые, комбинационные и кубические формы. На основе наличия на ряде кристаллов зеленых пятен пигментации предполагается, что их первоисточниками являлись древние по возрасту кимберлиты (Савко, Шевырев, 2005).

В пределах Новоград-Волынской площади выделены Городницкий и Зубковичский перспективные участки, на которых установлены ореолы рассения индикаторных минералов алмазной ассоциации в четвертичных и сарматских отложениях с хорошей сохранностью зерен, а также обломков и кристаллов алмаза крупностью до 0,5 мм (Гейко и др., 2005).

На территории Побужской зоны в районе г. Кировограда скважинами вскрыты кимберлиты дайкового типа позднепротерозойского возраста, не содержащие алмазов. Алмазы кимберлитового генезиса обнаружены в аллювии бассейна р. Южный Буг. Мелкие алмазы (0,06–0,4 мм) кимберлитового, метаморфогенного, импактного и невыясненного генезиса содержатся в неогеновых прибрежно-морских циркон-ильменитовых россыпях Тарабовского и Зеленоярского месторождений.

В пределах Приднепровской минерагенической зоны (северо-восточный склон Украинского щита) из Самотканской россыпи и неогеновых прибрежно-морских мелкозернистых песков выделены тысячи зерен алмаза размером до нескольких десятых миллиметра. Среди них в процессе детальной разбраковки установлены разности всех известных генетических типов: кимберлитов, лампроитов, импактитов и метаморфитов.

В Восточном Приазовье выделено 6 кимберлитовых тел, в т.ч. 4 трубы. Оценка алмазоносности кимберлитов, выполненная по пробам массой 6–13 т, показала практическое отсутствие алмазов. Лишь в кимберлитах трубы Надия обнаружены 3 обломка алмаза размером 0,1–0,3 мм. В Западном Приазовье выявлены небольшие тела щелочных ультрабазитов. В пробе

одного из этих тел обнаружен обломок округлого бесцветного алмаза размером $0,32 \times 0,25$ мм, сходный с кимберлитовыми разностями. В прибрежных отложениях Азовского моря на большом протяжении встречаются алмазы размером $0,1\text{--}0,38$ мм.

В пределах Донецкой минерагенической зоны на участке сочленения Донбасса с Приазовским массивом выявлены наиболее древние терригенные отложения, содержащие пиропы и мелкие алмазы, – песчаники, гравелиты и конгломераты аллювия самарской свиты нижнего карбона. Здесь найден алмаз размером $0,63 \times 0,43 \times 0,3$ мм ромбододекаэдрической формы. Мелкие алмазы найдены и в отложениях верхнего карбона (Чашка, Князев, 2005). В центральном Донбассе алмазоносны грубообломочные аллювиальные отложения трех свит верхнего карбона (алмазы, в основном, размером менее 1 мм), имеются также данные об обнаружении мелких алмазов в песчаниках картамышинской свиты нижней перми (Савко, Шевырев, 2005).

Таким образом, для обширной территории Украинского щита и прилегающих районов характерно значительное количество находок мелких алмазов, большая часть которых сосредоточена в узком размерном классе – 125–220 мкм, что объясняется присутствием их в хорошо отсортированных по гидравлической крупности мелкозернистых песках титаноциркониевых россыпей. В.Н.Кvasница (2005) приводит следующую типизацию находок мелких алмазов в разновозрастных отложениях юго-западной части Восточно-Европейской платформы, особенностью которых является специфическое соотношение основных габитусных форм кристаллов. Обычно преобладают в общей совокупности находок мелких алмазов осколки октаэдрических и кубических алмазов (до 70% общего количества). Остальную часть находок составляют кристаллы, среди которых наиболее распространены кубические формы. Например, в Самотканской россыпи среди 2 тысяч кристаллов преобладают кубические – 42–67%, затем следуют комбинационные формы – 25–37%, додекаэдры и октаэдры – 9–23%. Из других особенностей отмечены повышенное содержание окрашенных разностей, высокая интенсивность их окраски, по сравнению с алмазами из кимберлитов, необычный набор и соотношения примесных и структурных дефектов.

На основе обобщения результатов изучения мелких алмазов Украины делается вывод о возможности обнаружения нетрадиционных коренных источников алмаза – например, определенных типов лампрофиров и коматитов (Кvasница, 2005).

Казалось бы, обнаружение тысяч зерен мелких алмазов и отдельные находки алмазов промышленной крупности открывают возможности быстрого выхода на коренные источники. Можно отметить ряд причин, объясняющих, по нашему мнению, очевидное противоречие между фактом находок на данной территории большого количества мелких алмазов и отсутствием обнаруженных промышленно алмазоносных кимберлитовых трубок.

Во-первых, выделенные из титаноциркониевых россыпей алмазы размером менее 0,25 мм не могут служить надежными поисковыми индикатора-

ми близкорасположенных коренных источников. Такие мелкие зерна, обладающие к тому же небольшой плотностью, отличаются исключительно высокой миграционной способностью. Они могут быть перенесены на тысячи километров от родоначальных кимберлитовых тел. Зоны их концентрации никоим образом не отражали расстояние до коренного источника, а всего лишь соответствовали благоприятным для накопления «естественных» шлихам участкам побережий древних морей.

Во-вторых, преобладание среди мелких алмазов кубических кристаллов и осколков неясного морфологического типа затрудняет решение вопроса об их генетической принадлежности. Детальные исследования показали, что в прибрежно-морских зонах происходит смешивание алмазов разных генетических типов. Среди них, как указано выше, установлены кимберлитовые, импактитовые, гнейсовые (коровые), космогенные, техногенные и т.д. Для россыпей Среднего Приднепровья надежные признаки кимберлитового происхождения имеют только 20% алмазов, метеоритного – 1%, импактного – около 10%, корового (из эклогито-гнейсов) – 24%. Однако большая часть зерен мелких алмазов (40%, среди них обычно кубические) отнесена к разностям неясного генезиса (Савко, Шевырев, 2005).

В-третьих, отсутствие в прибрежно-морских отложениях минералов-спутников кимберлитового происхождения, особенно обладающих малой миграционной способностью (хромдиопсидов, оливина), ограничивает возможности прогнозирования коренных источников.

В-четвертых, находки алмазов в каменноугольных и пермских отложениях свидетельствуют о более древнем возрасте питающих их алмазоносных кимберлитов. Основная же масса мелких алмазов найдена в палеогеновых и неогеновых россыпях, т.е. промежуточных коллекторах, значительно удаленных от источников питания в возрастном отношении.

Из проведенного выше анализа следует вывод, имеющий важное значение для продолжения прогнозно-поисковых работ на территории Украины: необходим переход на опробование наиболее древних коллекторов алмазов.

4.4.3. Восточные районы Восточно-Европейской платформы

Территориями, благоприятными для прогнозирования и поисков кимберлитов, являются восточные районы Восточно-Европейской платформы. Основанием для поисков кимберлитов в этих районах является присутствие двух алмазоносных полос, протягивающихся вдоль западного склона Урала от районов бассейна р. Березовой (приток р. Колвы) на севере до бассейнов рек Чусовой и Белой на юге. В пределах западной полосы добыча алмазов велась из россыпей в трех алмазоносных районах: Горнозаводском, Красновишерском и Яйвинском. Кроме того, попутно алмазы добывались и в комплексном месторождении Ичетью на Тимане, что позволяет предположить продолжение, по крайней мере, одной из алмазоносных полос в северном направлении вдоль Тимана.

Во всех этих районах вместе с алмазами присутствуют и минералы-спутники кимберлитового происхождения (пиропы, пикроильмениты, оливин, высокохромистые хромшпинелиды, хромдиопсиды). Минералогической особенностью Уральской алмазоносной провинции является существование здесь же зоны распространения муассанита, по площади практически совпадающей с западной алмазоносной полосой.

Проблема нахождения первоисточников уральских россыпных алмазов длительное время является объектом острых дискуссий. Было предложено много различных точек зрения, в соответствии с которыми коренными источниками уральских алмазов считались пикриты, дуниты, лампроиты и др. (Кухаренко, 1955; Лукьянова и др., 1987). Предполагалось, что выходы коренных пород располагались непосредственно вблизи головных частей россыпей. Все эти предположения не подтвердились в ходе непосредственного опробования.

В то же время многие авторитетные ученые давно высказались в пользу гипотезы о кимберлитовом происхождении уральских россыпных алмазов (Вербицкая, Гапеева, 1959; Ружицкий, 1960; Орлов, 1963; Смирнов, 1965; Беккер, 1970). Данная точка зрения поддерживается и современными специалистами (Мальков, 2005; Граханов и др., 2007). Вероятными зонами расположения кимберлитовых тел назывались Котласская потенциально алмазоносная кимберлитовая провинция (Скороспелкин, 1994), Краснокамская и Вятская площади (Ваганов, 2000), Вятско-Камская впадина (Нельзин, 2005), Вятско-Камская кимберлитовая провинция (Степанов, 2005) и др.

О кимберлитовом генезисе уральских алмазов свидетельствуют данные определения изотопного состава углерода, который практически не отличается от такового для алмазов всех кимберлитовых провинций мира (Галимов и др., 1989). В россыпях уральских алмазов присутствует типичная кимберлитовая ассоциация минералов-спутников. Специфика морфологии алмазов (округлая форма) объясняется особенностями состояния мантии и кимберлитообразования в пределах окраинных районов платформ. Состав минералов-включений также обычен для кимберлитовых алмазов.

Тем не менее в настоящее время мнения специалистов относительно перспектив и стратегии проведения поисковых работ на обнаружение кимберлитов в восточных районах Восточно-Европейской платформы существенно расходятся. Сотрудниками Института геологии Коми НЦ УрО РАН они оцениваются довольно высоко. При этом обосновывается возможность обнаружения различных типов алмазоносных пород: кимберлит-лампроитовых тел, метаморфических алмазосодержащих пород и импактитов, а также россыпей (Юшкин и др., 2006).

Наоборот, сотрудники ЦНИГРИ, которые проводили детальное шлиховое опробование на территории Кировской области и в других районах, считают, что обнаруженные здесь минералы-спутники алмазов (хромшпинелиды и хромдиопсиды) не связаны с кимберлитами. Присутствующие в современ-

ном аллювии пиропы относятся к кимберлитовому парагенезису, но имеют дальнеприносной характер (Ваганов, Дорофеев, 2008).

Анализ геологической позиции залегания и строения алмазоносных россыпей на западном склоне Урала, а также результатов изучения вторичных коллекторов показывает, что первоисточниками алмазов в них являются, скорее всего, древние (возможно, протерозойские) кимберлиты. Об этом свидетельствуют следующие факты: приуроченность основной массы алмазов к отложениям переотложенной мезозойской коры выветривания, слабая алмазоносность россыпей при высоком качестве камней, хорошая отсортированность их по крупности, наличие алмазов в нижнедевонских (такатинская свита), нижнесилурийских (колчимская свита) и ордовикских (полюдовская свита) породах и др.

Приходится признать, что проведение поисковых работ на древние кимберлиты, например, на территории прилегающей к Красновишерскому россыпному району окраины Восточно-Европейской платформы, до сих пор не обосновано с геолого-тектонических позиций. Они могли быть существенно перемещены к настоящему времени как в плане, так и на глубину за счет движения плит, уничтожены эрозией и т.д. Соответствующие поисковые работы потребуют немалых затрат.

Более перспективными на данном этапе представляются поиски на Восточно-Европейской платформе кимберлитов раннемезозойского возраста. Существование нескольких циклов внедрения кимберлитов отмечается практически во всех кимберлитовых провинциях мира. Некоторые ученые связывают периодичность их внедрения с пульсационным развитием Земли. В частности, мезозойские кимберлиты широко распространены на территориях Африки и Сибири. Считается, что они приурочены к периоду фазы расширения Земли. Первые внедрения, свидетельствующие о начале развития данной фазы, наблюдаются в середине триаса, последние – в меловом периоде (Епифанов, 2006).

Поисками раннемезозойских кимберлитов на территории восточных районов Восточно-Европейской платформы занимались сотрудники многих организаций (ЦНИГРИ, Архангельскгеология, ОАО «Пермгеологодобыча», ООО «Эдельвейс-Поиск», Пермский госуниверситет и др.). К настоящему времени на обширной площади, охватывающей южные районы Архангельской области, северные районы Кировской области, южные районы Республики Коми и Вятско-Камскую впадину, установлен сплошной шлейф распространения в современном аллювии, среднеюрских и нижнетриасовых отложениях всех минералов-спутников алмаза кимберлитового происхождения – пиропов, хромдиопсидов, пикроильменита, оливина, высокохромистого хромшпинелида (Осовецкий, 2008, 2011). Определение химического состава микрозондовым методом с анализом соответствующих генетических диаграмм показывает принадлежность этих минералов к низкоалмазоносным или даже неалмазоносным кимберлитам. Здесь же в заметном количестве находятся минералы, присутствие которых возможно в кимберлита – пироп-

альмандины, уваровит, муассанит, флогопит, хромистые клинопироксены, платиноиды, первоскит. Кроме того, дополнительно в тех же отложениях обнаружены минералы карбонатитов – бадделеит, кальциртит, щелочные амфиболы, колумбит-танталит, монацит.

В южных районах Архангельской области обнаружены мелкие алмазы и единичные кристаллы промышленной крупности в нижнетриасовых и четвертичных отложениях. Их первоисточниками считаются раннемезозойские или позднепермские кимберлиты (Третьяченко, 2008).

На территориях Кировской области, южных районов Республики Коми и северо-запада Пермского края обнаружены мелкие алмазы размером 0,5–0,3 мм. Практически все они являются осколками октаэдрических кристаллов. Редкие находки очень мелких кристаллов (менее 0,15 мм) представлены кубами. В частности, только на одной из площадей на территории Вятско-Камской впадины, приуроченной к бассейну р. Дозовки (приток р. Весляны), в среднеюрских базальных отложениях – продуктах перемыва раннемезозойской коры выветривания – обнаружено пять зерен мелких алмазов. В среднем одна находка алмаза в пределах данной площади находится на 5 м³ породы.

Для территории Вятско-Камской впадины и прилегающих районов Восточно-Европейской платформы поисковая роль мелких алмазов может рассматриваться как весьма высокая. Мощность пород осадочного чехла (отложения девона, карбона, перми, триаса и юры) здесь не превышает 2 км. Находки мелких алмазов располагаются в непосредственной близости к зоне Казанско-Кажимского авлакогена – структуре древнего заложения, отличающейся активным тектоническим режимом вплоть до современного времени. Алмазы в базальном горизонте средней юры крупностью более 0,3 мм имеют явно кимберлитовое происхождение. Они сопровождаются минералами-спутниками кимберлитового происхождения, встречаемость которых достигает сотни зерен на шлиховую пробу, а также индикаторными минералами карбонатитового генезиса. Наконец, относительно близко расположены промышленные россыпи алмазов Красновишерского района.

В краевой части платформы, прилегающей к Красновишерскому алмазоносному району, может быть обнаружено проявление технических алмазов импактного происхождения. Об этом свидетельствуют результаты детального изучения мелких алмазов россыпей западного склона Урала, среди которых установлены разности как кимберлитового, так и импактного происхождения. Последние представлены в основном «сланцеватыми» разностями размером менее 50 мкм, но присутствуют и более крупные (до 0,75 мм). Соотношение кимберлитовых и импактных мелких алмазов заметно меняется в разных районах. Например, в Яйвинском алмазоносном районе доля импактных разностей среди мелких алмазов достигает 80%, в то время как в Красновишерском районе – только 10%. Находки импактных алмазов сопровождаются значительным количеством зерен муассанита. В ряде опробованных водотоков присутствует муассанитовая минеральная ассоциация тяжелой фракции современного аллювия (Лунев, Осовецкий, 1996).

4.4.4. Северный и Южный Тиман

Находки мелких алмазов известны в терригенных отложениях девона, протягивающихся вдоль западного склона Тиманского кряжа, – как на Среднем Тимане, где уже обнаружены кимберлитоподобные породы (см. выше), так и на Северном и Южном Тимане.

На Северном Тимане установлена алмазоносность конгломератов нижнего силура и надеждинской свиты среднего девона (Щербаков и др., 2005). В лампрофировых зонах Северного Тимана были опробованы дайки камптонитов, в которых обнаружены кристаллы алмаза кимберлитового типа в классах 1–0,5 и 0,5–0,25 мм (Савко, Шевырев, 2005). Кроме того, в силурийских отложениях на полуострове Канин были найдены изношенные пиропы алмазной ассоциации и единичные зерна мелких алмазов.

Южно-тиманские алмазопоявления приурочены к антиклинальным структурам возвышенностей Джежимпарма и Очпарма. В эйфельских песчаниках и гравелитах Джежимпарминского массива мелкие алмазы обнаружены в процессе совместных работ сотрудников Вычегодской ГРП Воркутинского ПО и Пермского университета. Опробован разрез терригенных пород среднего девона, представленный переслаиванием гравелитов и разнозернистых песчаников. Последние непосредственно залегают на конгломератах докембрия. После дробления до крупности 1 мм и обогащения обломочного материала на винтовых аппаратах из восьми проб объемом по 1 м³ каждая было извлечено пять кристаллов алмаза, из которых три относятся к октаэдрам размером 0,35–0,4 мм. По морфологическим особенностям эти кристаллы не отличаются от типичных кимберлитовых алмазов. Два кристалла размером 0,15–0,2 мм имеют кубический габитус, причем один из них является комбинацией куба и ромбододекаэдра (Лунев, Осовецкий, 1996). На возвышенности Очпарма в базальных кварцевых песчаниках с линзами гравелитов в основании обнаружены 2 кристалла алмаза и один – карбонато (Щербаков и др., 2005).

На Сысольском своде в южных районах Республики Коми установлена убогая россыпная алмазоносность среднеюрских аллювиальных отложений в базальных интервалах сысольской свиты батского яруса средней юры. Один кристалл алмаза найден в Кайгородском и Прилузском районах Республики Коми (дер. Бездубово) в гравийно-галечных базальных отложениях сысольской свиты верхней юры, выполняющих врезанные в нижнетриасовый цоколь древние палеодолины (Савко, Шевырев, 2005).

Россыпная алмазоносность девонских отложений Тимана предположительно связана с нахождением алмазоносных кимберлитов на Русской плите в юго-западном Притиманье (Мальков, 2005).

4.4.5. Воронежская антеклиза и прилегающие районы

Территория Воронежской антеклизы привлекла внимание исследователей при оценке украинскими геологами результатов опробования на алмазы отложений Днепровско-Донецкой впадины. Работы по поискам коренных источников алмазов развернулись здесь в большом масштабе. В результате были обнаружены в большом количестве мелкие алмазы и отдельные находки кристаллов промышленного размера, минералы-спутники и обломки кимберлитов (Савко, Шевырев, 2005).

Наиболее показательными оказались результаты исследования алмазоносности нижнемеловой (апт) Волчинской титаноциркониевой россыпи (Липецкая область), залегающей на древнем кристаллическом фундаменте (Мальков, 2005). Впервые алмазы были установлены здесь более 50 лет назад. В пробе массой 300 кг был выделен 241 алмаз общей массой 10 мг, большинство из которых (87%) сосредоточено в классе 0,25–0,15 мм, максимальный размер в поперечнике составлял 0,34 мм. Обнаруженные алмазы имели разное происхождение, причем менее 30% – гнейсо-эклогитовое и кимберлитовое (Савко, Шевырев, 2005). В 2001 г. из новой пробы выделен 91 алмаз размером от 0,1 до 0,42 мм. Из них 25% составляли октаэдры, 18% – кубы, 27% – обломки и осколки. Как и в аналогичных россыпях Украины, отсутствовали минералы-спутники алмазов.

Найдки алмазов в данной россыпи прошли экспертную оценку специалистов, которые отметили, что формирование концентраций в алмазоносных отложениях происходило благодаря эффективному волновому механизму в прибрежно-морской обстановке. Отсюда, присутствующие в россыпи алмазы относятся к минералам дальнего сноса, для которых установить коренные источники практически невозможно. В связи с этим в конечном итоге дано отрицательное заключение о перспективах коренной алмазоносности площадей Воронежской антеклизы, территория которой на первом этапе рассматривалась как заслуживающая внимания.

Анализ геологической обстановки показывает, что первоисточниками микроалмазов Волчинской россыпи могли быть графитсодержащие гнейсы, кимберлиты или эклогиты Воронежского кристаллического массива, а также верхнедевонские вулканогенные образования юго-восточной части Воронежской антеклизы. В 2002 г. В.И.Коптиль изучил 94 кристалла размером менее 0,1 мм (из общего числа 523 найденных зерен) и выделил среди них несколько генетических типов, в т.ч. кимберлит-лампроитовый, метаморфогенный и импактный.

Алмазы крупностью 0,3–0,1 мм были найдены затем в нижнекампанийских отложениях Брянской области, в палеогеновых песках Мамонского района и недалеко от Русско-Журавской золотоносной россыпи. Так, в Новозыбковской титаноциркониевой россыпи на западе Брянской области, приуроченной к полтавским отложениям верхнего палеогена – нижнего неогена, был обнаружен 21 алмаз размером 0,1–0,25 мм (Савко, Шевырев, 2005).

Однако последующие находки алмазов позволили изменить представление о бесперспективности территории Воронежской антеклизы на поиски коренных источников алмазов. Так, в палеогеновых грубообломочных отложениях Павловской площади был найден алмаз размером 4–2 мм в сопровождении значительного количества кристаллов размером менее 0,3 мм. Кроме того, большой поисковый интерес представляет находка в тульском коллектире (нижний карбон) в пробе объемом 1 м³ трещиноватого круглого бесцветного осколка алмаза размером 0,6x0,5 мм (Морозов, 2005). Алмаз такой крупности явно не связан с влиянием волнового механизма концентрации; можно предполагать его поступление из относительно близкорасположенного источника.

На территории Ульяновско-Саратовского прогиба в основании среднеюрской континентальной толщи на Воротиловском выступе фундамента вблизи Пучеж-Катунгской среднеюрской астроблемы найдены сотни мелких алмазов «кимберлитового» типа (Мальков, 2005). Здесь же в более молодых отложениях нами обнаружены пиропы лерцолитого парагенезиса (Илалтдинов и др., 2000).

4.4.6. Актюбинское Приуралье

Территория Актюбинского Приуралья (Казахстан) попала в число перспективных на коренные алмазы районов в начале 80-х гг. прошлого века. Этому способствовали находки мелких алмазов в нижнемеловых отложениях (Великий, Милецкий, 1982). Опробовались отложения верхней (регressiveйной) части разреза отложений аптского яруса, которые формировались в прибрежно-морских условиях, представленные хорошо сортированными мелкозернистыми алевритовыми песками. Гравитационное обогащение пробы массой 2 т было выполнено сотрудниками ИМРа (г. Симферополь). В исходной пробе содержание тяжелой фракции составило 0,9%, а общая масса тяжелых минералов, практически полностью извлеченная в концентрат, достигала 18 кг. При лабораторной обработке концентрата из неэлектромагнитной подфракции было отобрано и исследовано 10 навесок массой по 1 кг каждая. В них было обнаружено 13 зерен алмаза. Их морфологические особенности, физические свойства и размеры свидетельствовали о том, что первоисточниками питания являлись не кимберлиты, а эклогиты или коровые гнейсы. Все зерна алмазов имели кубический габитус и размеры в пределах 0,05–0,01 мм.

Следующий этап исследований был проведен на территории нескольких перспективных участков (Алгинский, Шпаковский, Каиндинский, Китарсайский, Есетский и Восточно-Кемпирсайский) совместно сотрудниками Пермского университета и Каргалинской ГРЭ Западно-Казахстанского ГУ. Его задачей было опробование крупнообломочных лиофаций нижнемеловых отложений с целью обнаружения более крупных зерен алмазов, среди которых повышалась вероятность находок кимберлитовых кристаллов. В ре-

зультате мелкие алмазы были обнаружены на двух участках – Алгинском и Есетском.

На Алгинском участке были опробованы верхнеальбские крупно- и среднезернистые глинистые пески с примесью гравия (до 10% и более), на Есетском участке – среднеальбские средне- и разнозернистые слабоглинистые пески с примесью гравия. Всего было обработано 60 проб общим объемом 50 м³. В трех из них объемом от 0,95 до 1,83 м³ обнаружено по одному зерну алмаза размером от 0,25 до 0,55 мм. Они представляли собой осколки двух кубических и одного октаэдрического кристалла. Для всех кристаллов характерна зеленая окраска, которая обычно присуща алмазам наиболее древних кимберлитов (Лунев, Осовецкий, 1996).

С учетом морфологических особенностей этих алмазов можно сделать вывод о том, что они не имеют связи с коровыми гнейсами. Их возможными коренными источниками являются эклогиты или кимберлиты, в т.ч. эклогитовые ксенолиты в кимберлитах.

4.4.7. Кольский полуостров

Среди перспективных районов на обнаружение кимберлитового магматизма указывается ряд площадей на территории Мурманской области. Одной из них является Пулоньгская площадь, в пределах которой обнаружены дайково-эксплозивные тела щелочно-ультраосновного состава. Из благоприятных поисковых предпосылок на обнаружение кимберлитов указывается на находку обломка кимберлита в гляциальных отложениях, а также на обнаружение единичных зерен алмазов размером от 0,3 до 0,8 мм.

Другой перспективной зоной является Печенгская площадь с известными находками алмазов в аллювиальных отложениях на прилегающей к ней площади, расположенной на территории Северной Норвегии.

Кроме того, перспективными на кимберлиты считаются Соколоозерская и Ловозерская площади также с находками мелких алмазов (Зозуля и др., 2006). При этом принимается во внимание, что в непосредственной близости к вышеупомянутым площадям уже обнаружены кимберлитовые поля.

4.4.8. Бразилия

На протяжении многих лет на территории штатов Минас Жераис и Байя ведутся поиски коренных источников алмазов, питающих россыпные месторождения. Считается, что они имеют древний возраст, а перенос алмазов осуществлялся ледниками в раннем протерозое, кембрии и карбоне. Некоторое время популярной являлась точка зрения о том, что первоисточниками алмазов являются слюдисто-гематитовые сланцы (филлиты). Однако их непосредственное опробование не подтвердило это предположение. Обнаруженные на территории этих штатов мезозойские кимберлиты хотя и содержали мелкие алмазы, но не имели промышленного значения. К настоящему

времени в разных районах Бразилии обнаружено много кимберлитовых трубок мелового возраста, некоторые из них слабо алмазоносны. Однако наиболее вероятными первоисточниками крупных алмазов, присутствующих в россыпях, считаются докембрийские кимберлиты, обнаружение которых является задачей будущих поисковых работ (Харькив и др., 1997).

При проведении поисковых работ на алмазоносные кимберлиты и другие коренные источники определенное внимание уделяется и мелким алмазам. Примером может служить изучение алмазоносности мезопротерозойских конгломератов района Шапада-Диамантина (штат Баия) (Battilani et al., 2007). Были детально опробованы силлы и дайки щелочных пород протерозойского возраста данной площади (всего около 600 кг образцов). В части образцов, подвергнутых дезинтеграции, обнаружено 5 микроалмазов размером от 80 до 200 мкм. Кроме того, мелкие алмазы обнаружены и в аншилифах. Предполагается, что столь мелкие частицы алмазов образовались в результате механического раздробления более крупных кристаллов.

4.5. Особенности методики поисков кимберлитов по мелким алмазам

Выявление кимберлитовых тел по находкам мелких алмазов во вторичных коллекторах представляет собой один из вариантов поисков «алмазов по алмазам». Данное направление поисковых работ относится к прямым поискам. В этом отношении они напоминают широко распространенные на практике поиски проявлений золота и платиноидов, а также некоторых других редких минералов, основанные на находках в шлихах зерен тех же минералов, причем независимо от их крупности.

Однако используемая при поисках золота и платиноидов шлиховая проба объемом 20 л для обнаружения мелких алмазов будет непредставительной. Рекомендуемая методика на мелкие алмазы должна быть основана на малообъемном опробовании с отбором проб объемом порядка 0,5–1 м³. Необходимость в существенном увеличении объема поисковой пробы обусловлена значительным разубоживанием продуктов размыва кимберлитов обломками вмещающих пород, относительно небольшой площадью экспозиции кимберлитового тела на поверхности, стремлением зафиксировать мелкие алмазы на достаточно большом расстоянии от него и т.д. С другой стороны, принимаются во внимание ограничения, определяемые экономической целесообразностью.

Выбор именно такого объема дополнительно может быть обоснован исходя из следующих соображений.

1. В кимберлитовых трубках с промышленной алмазоносностью с учетом содержания и гранулометрического состава алмазов (см. гл. I) для нахождения хотя бы одного кристалла промышленного размера (более 1 мм) требуется обработать пробу массой 10–50 кг. Мелкие алмазы в кимберлитах присутствуют в количествах, примерно на порядок превышающих число крупных. Однако в рыхлых отложениях, являющихся продуктами размыва и

переноса обломков кимберлитовых пород, происходит резкое разубоживание концентраций алмазов. В отличие от крупных алмазов, которые сосредоточиваются при переносе в наиболее грубообломочных донных наносах рек и концентрируются в струях, мелкие алмазы распыляются по различным фациальным комплексам и тем самым процесс их разубоживания происходит более интенсивно. Поэтому предлагается достаточно большой объем опробования отложений вторичного коллектора, который позволяет установить шлейф разноса алмазов от кимберлитовой трубы на достаточно большом удалении от нее.

2. Предлагаемый объем опробования при хорошей организации полевых работ и наличии малогабаритного обогатительного оборудования позволяет выполнить обогащение до нескольких сотен проб в течение полевого сезона, что вполне достаточно для предварительной оценки перспектив одной поисковой площади.

Указанный выше рекомендуемый объем пробы основан на анализе длительного опыта проведения аналогичных работ сотрудниками Пермского университета. Такой объем пробы считается достаточным для обнаружения в ней хотя бы одного или нескольких зерен мелких алмазов при условии нахождения трубы на расстоянии до нескольких десятков километров. Если в пробах установленного объема мелкие алмазы не будут обнаружены, участок можно считать неперспективным на поиски коренных источников. Отсутствие алмазов в малообъемных пробах может свидетельствовать также о значительном расстоянии до трубы либо о неправильном выборе объекта опробования, чего желательно избежать. В любом случае такие результаты дают веские основания для переориентации поисковых работ на алмазоносные кимберлиты в районе исследования. Тем самым можно сэкономить значительные средства для ведения работ на более перспективных площадях.

Применение методики малообъемного опробования можно рекомендовать только для тех территорий, где по геолого-тектоническим критериям обоснована целесообразность проведения прогнозно-поисковых работ на коренные алмазы, что является первым из необходимых условий. Вторым условием представляется доказательство присутствия на площади минералов-спутников кимберлитового происхождения, относящихся к алмазному парамагнезису. Третьим условием является изученность особенностей распределения минералов-спутников по возрастным комплексам с определением реальных или вероятных промежуточных коллекторов алмазов на территории исследования.

В связи с тем что в современном аллювии происходит наиболее значительное разубоживание обломочного материала кимберлитов, не рекомендуется отбирать малообъемные пробы из отложений современных рек. Одной из причин является также удорожание поисковых работ при использовании малообъемного опробования по сравнению с обычными шлиховыми поисками.

Таким образом, наиболее целесообразным представляется малообъем-

ное опробование древних по возрасту промежуточных коллекторов алмазов и, таким образом, близких по времени образования к этапу внедрения кимберлитов. В таких коллекторах рекомендуется отбирать пробы не из мелкообломочных лиофаций (глин, алевритов, песков), а, наоборот, из крупнообломочных (валунных галечников, песчано-гравийно-галечных отложений, песчано-гравийных или песчаных с примесью гравия и гальки) по следующим причинам.

Во-первых, при отборе малообъемных проб из крупнообломочных лиофаций в них вполне могут оказаться и крупные алмазы; упускать такую возможность нельзя. Как указывалось выше, совместное нахождение мелких и крупных алмазов в определенной пропорции не только свидетельствует о близости кимберлитовой трубы, но и позволяет прогнозировать россыпные месторождения в отложениях данного промежуточного коллектора.

Во-вторых, в соответствии с законами гидравлической эквивалентности в крупно- и среднезернистых речных песках наблюдается весьма низкий выход тяжелой фракции и, следовательно, наиболее высокий уровень разубоживания тяжелых минералов (Осовецкий, 1986). В составе тяжелой фракции таких песков хотя и может относительно преобладать класс частиц размером 1–0,5 мм, но в очень малом абсолютном количестве. В мелкозернистых песках содержание тяжелой фракции существенно возрастает, но концентрируются только минералы размером менее 0,2–0,15 мм. Наконец, песчаные лиофации широко распространены в нижних течениях палеорек, где шансы на обнаружение алмазов практически исчезают вследствие разубоживания.

В-третьих, только в крупнообломочном плохо сортированном аллювии с песчано-алеврито-глинистым заполнителем, с одной стороны, наблюдаются повышенные концентрации тяжелых минералов и, с другой – в наибольшем количестве присутствует класс частиц тяжелых минералов размером 1–0,5 мм. Именно обнаружение алмазов такой крупности при малообъемном опробовании представляет наибольший поисковый интерес.

Применение методики малообъемного опробования на мелкие алмазы в структуре прогнозно-поискового комплекса на коренные источники следует рекомендовать непосредственно перед проведением детальной наземной геофизической съемки или после нее (в случае выявления большого количества перспективных магнитных аномалий). Результаты малообъемного опробования могут иметь важнейшее значение при окончательном выборе объектов для бурения.

Выход на коренное алмазоносное тело возможен на основе малообъемного опробования не только аллювиальных отложений, но и элювиальных, делювиальных, пролювиальных, флювиогляциальных и других фациальных комплексов. На первом этапе следует сосредоточить внимание на опробовании древнего аллювия, поскольку речные отложения аккумулируют обломочный материал с большой площади. В дальнейшем особое внимание следует уделять опробованию кор выветривания, которые могут непосредствен-

но перекрывать кимберлитовую трубку. Очень важно опробовать обломочный материал переотложенных кор выветривания, который вполне представителен для определенной площади и в то же время испытал воздействие агентов химического выветривания и тем самым процессов концентрации.

Мелкие алмазы, поступающие в рыхлые отложения при размыве кимберлитов, становятся компонентами тяжелой фракции осадка. Их перенос водными потоками и накопление в осадках контролируются теми же факторами, что и миграция других тяжелых минералов близкой плотности (например, эпидота, пиропа, оливина, гиперстена и т.д.). При выборе места отбора пробы в обнажении следует руководствоваться установленными закономерностями концентрации тяжелых минералов в крупнообломочных русловых осадках (Осовецкий, 1986). В частности, нами установлено, что в разрезе отложений русловой фации аллювия присутствуют как обогащенные, так и разубоженные тяжелыми минералами линзы и прослои. Первые отличаются от вторых несортированностью обломочного материала по крупности, нередко примесью валунов и присутствием в заметном количестве алевритоглинистых частиц в составе заполнителя. Различие в выходе тяжелой фракции при этом может достигать одного-двух порядков. Отсюда выбор места опробования рекомендуется проконтролировать предварительной промывкой обычной шлиховой пробы. В дальнейшем для территории исследования можно использовать установленный литологический контроль алмазоносности.

Мелкие алмазы, переносимые водными потоками при размыве кимберлитов, сопровождаются зернами парагенетических минералов-спутников (оливина, пиропа, хромдиопсида, пикроильменита, перовскита, хромшпинелидов и др.). Применение методики малообъемного опробования позволяет попутно получить эти минералы в гораздо большем количестве, чем при обычном шлиховом опробовании. Сопоставление находок мелких алмазов с данными о встречаемости минералов-спутников значительно повышает надежность поисковых работ. При этом на основе весьма представительных данных могут быть выделены наиболее перспективные для поисков минералы-спутники или их ассоциация. В дальнейшем малообъемное опробование на мелкие алмазы может с наибольшим эффектом сочетаться с более детальным шлиховым опробованием.

Принципиальное значение имеет выбор технологической схемы обогащения малообъемных проб. Она включает следующие основные стадии. Первая стадия предусматривает грохочение обломочного материала и одновременно отмучивание глинистых частиц. На стадии грохочения на щелевых или ситовых грохотах рекомендуется выделять четыре класса обломков: крупнее 4, 4–2, 2–1 и менее 1 мм. Наиболее крупные обломки (+4 мм) просматриваются визуально на предмет обнаружения обломков кимберлитов. Следующие два класса можно обогатить на двухкамерной малогабаритной отсадочной машине. Материал крупностью менее 1 мм рекомендуется обогащать на винтовом сепараторе. Водоснабжение обеспечивается портатив-

ным насосом с системой распределения воды.

Именно в таком варианте (правда, без применения винтового сепаратора) методика малообъемного опробования в свое время была описана Б.И.Прокопчуком (1979). При этом он рекомендует дополнительно обогащать на отсадочной машине класс частиц 8–4 мм.

В конкретных условиях обогатительная стадия может быть упрощена за счет отказа от обогащения материала на отсадочной машине. В таком варианте методика применялась сотрудниками Пермского университета на многих удаленных объектах и оказалась весьма эффективной. Отбор проб производился ручным способом, что позволяло выборочно опробовать вероятные зоны концентрации мелких алмазов (линзы, прослои, гнезда и т.д.) небольшой мощности. Непосредственно в месте отбора пробы организовывался временный пункт обогащения с развертыванием сборной обогатительной установки, включающей небольшой щелевой грохот, винтовой сепаратор, насос и систему водоснабжения. Наличие малогабаритных аппаратов в составе сборной обогатительной установки позволяет перевозить или даже переносить их непосредственно к месту отбора пробы. Подготовка комплекса к работе производится в течение 20–30 мин. Грохочение материала выполнялось с выделением на щелевом грохоте частиц размером менее 4 мм, которые обогащались на винтовом сепараторе. Полученные в процессе обогащения концентраты винтового сепаратора в результате нескольких перепусков на том же аппарате сокращались до 10–15, иногда до 5–10 кг. В этом случае достигалась максимальная производительность обогащения, которая позволяла бригаде из 3-4 человек одновременно с отбором обработать кубометровую пробу в течение одной рабочей смены (рис. 73).



Рис. 73. Обогатительный комплекс сотрудников Пермского университета в работе

Нередко сомнения вызывает невысокая степень извлечения мелких алмазов на винтовом сепараторе. Так, для применяемого сотрудниками Пермского университета типа винтового сепаратора степень извлечения алмазов в концентрат с выходом 1% составляет по классам (%): 1–0,5 мм – 30–40; 0,5–0,25 мм – 40–50 и 0,25–0,1 мм – 50–60. Однако возможные потери мелких зерен алмазов при обогащении с лихвой компенсируются высокой производительностью работ и увеличением количества отбираемых проб. Кроме того, выход концентрата можно увеличить в несколько раз с соответствующим повышением степени извлечения алмазов, причем для повышения степени извлечения наиболее мелких алмазов применялось дополнительное обогащение хвостов на винтовом шлюзе (рис. 74).

На следующей (лабораторной) стадии получаемые при обогащении концентраты подвергались обработке с применением различных операций (расситовка, сепарация, термохимическое разложение и др.) для выделения различных продуктов (магнитная, сильно-, средне- и слабоэлектромагнитная подфракции и др.), конечным из которых являлся небольшой алмазный ультраконцентрат (рис. 75). Последний изучался под бинокуляром с отбором и диагностикой мелких алмазов. Сильно- и среднеэлектромагнитные подфракции просматривались на минералы-спутники.



Рис. 74. Дополнительное обогащение мелкообломочного материала на винтовом шлюзе

Применение методики малообъемного опробования широко практикуется и другими организациями, в частности, на территории Якутской алмазоносной провинции и южных районов Архангельской площади. Она оказалась

весьма эффективной и способствовала открытию ряда коренных и россыпных месторождений алмазов (например, трубы Айхал и некоторых россыпей на севере провинции) (Харьков и др., 1997).

Именно применение методики малообъемного опробования дало возможность сотрудникам Пермского университета при проведении совместных работ с сотрудниками ОАО «Пермгеологодобыча» впервые обнаружить алмазы на платформенной части территории Прикамья, причем достаточно близко к зоне размещения промышленных россыпей Красновишерского района. Алмазы размером 0,5–0,25 мм были найдены в отложениях базального горизонта средней юры в восточных районах Вятско-Камской впадины. Вероятными первоисточниками этих алмазов могут быть раннемезозойские кимберлиты. Одновременно из тех же проб были выделены многие сотни зерен минералов-спутников, а также частицы золота, платиноидов, кассiterита, tantaloniobатов, редкоземельных минералов.

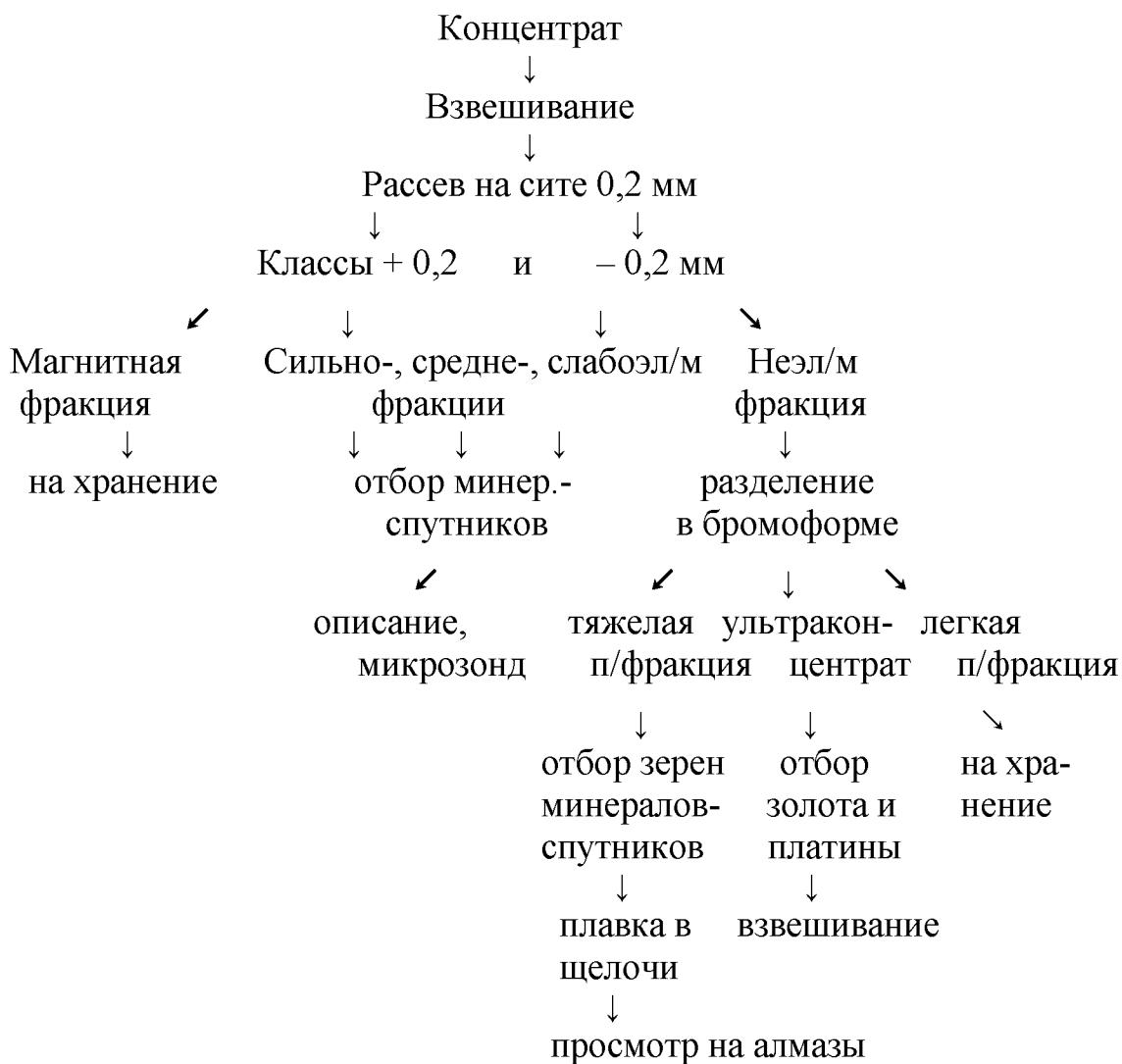


Рис. 75. Схема обработки концентратов в лаборатории

4.6. Разбраковка мелких алмазов

При поисковых работах с опробованием рыхлых отложений и других вторичных коллекторов исследователь сталкивается с большим разнообразием морфологии микрокристаллов алмаза. С одной стороны, причиной является дробление как крупных, так и мелких кристаллов алмаза по трещинам в процессе их переноса водными потоками. Этому способствуют повышенная хрупкость, наличие спайности, трещиноватость кимберлитовых алмазов, а также длительность механического воздействия на них. Например, среди разностей мелких алмазов предположительно кимберлитового происхождения, изученных в россыпях Красновишерского района, осколки без сохранившихся граней составляют 41%, октаэдрические одиночные и сдвойниковые кристаллы, включая их осколки с хорошо сохранившимися гранями, – 28%, кубические кристаллы и их осколки – 19%, ромбододекаэдры и их осколки – 12%.

Исходя из этого большую роль при поисках коренных месторождений алмазов играет разбраковка их осколков. В частности, Г.И.Шафрановский (2001) предлагает следующую систематику осколков (обломков) алмазов, которая вполне применима и для мелких фрагментов: 1) полуобломки с частично сколотыми гранями; 2) неполные обломки с сохранившимися единичными гранями и 3) полные обломки или осколки с некристаллографическими поверхностями, а также выколки по спайности.

Другой причиной является разнообразие генетических типов мелких алмазов, что особенно заметно проявилось при изучении минералов титаноциркониевых россыпей. Но даже в промышленных россыпях алмазов их мелкие фракции засорены зернами иного генезиса. Например, в сибирских и красновишерских россыпях довольно часто находятся импактные алмазы.

Помимо кимберлитов, импактидов, эклогитов, гнейсов, которые поставляют значительную долю мелких алмазов в осадочные породы литосферы, первоисточниками мелких алмазов могут быть разнообразные магматические породы (пикриты, дуниты, альнейты, хромититы и др.). Нельзя также исключить возможность засорения проб техногенными алмазами, выкрошенными из буровых коронок.

В связи с этим возникает проблема разбраковки мелких зерен алмазов с выделением тех индивидов кимберлитового происхождения, которые являются наиболее важными в поисковом отношении.

Наибольшее поисковое значение, как уже указывалось, имеют даже единичные находки относительно крупных осколков алмазов (крупнее 0,5 мм) с фрагментами сохранившихся граней. На них по особым морфологическим характеристикам хорошо выделяются поверхности раскола (неровные участки, плоскости спайности и т.д.). По фрагментам сохранившихся граней может быть оценен размер первичного кристалла.

Вспомогательное поисковое значение придается находкам многочисленных хорошо образованных мелких кристалликов алмаза октаэдрического

или ромбододекаэдрического габитуса. Они фиксируют приближение к кимберлитовому телу и могут концентрироваться в особых фациальных обстановках (пролювиальных, делювиальных, флювиогляциальных, эоловых). Особенно много последних может находиться в составе «естественных» шлихов прибрежно-морских или прибрежно-озерных фаций, но их поисковое значение ограничено в связи с оторванностью от источников питания.

Карттирование находок мелких алмазов по результатам малообъемного опробования необходимо проводить с учетом их размеров, морфологии, типоморфных признаков и т.д. Отдельно требуется выделить генетические типы алмазов.

При разбраковке мелких алмазов могут быть использованы детали микро- и наноскульптуры их поверхности, установленные с применением методов высокоразрешающей электронной микроскопии. Нами проводилось сравнение таких форм для октаэдрических кристаллов кимберлитов и россыпей, но существенных различий обнаружено не было. Основное различие заключалось в преобладании среди мелких россыпных алмазов осколков октаэдров и их сростков, в то время как в кимберлитах таковых мало.

Установлено, что на мелких осколках октаэдрических кристаллов алмаза в россыпях сохраняются характерные детали микрорельефа отдельных фрагментов граней, строение поверхности которых позволяет восстановить их первоначальный кристаллографический тип.

Найдки импактных и коровых алмазов при малообъемном опробовании также представляют интерес, прежде всего, ввиду возможности обнаружения месторождений технических алмазов соответствующего генезиса. До сих пор известно только два месторождения таких типов, к которым относятся соответственно проявления района Попигайского метеоритного кратера и Кумдыкольское месторождение. Считается, что вполне назрела необходимость отработки определенной методики их поисков, методов определения запасов и т.д. (Каменцев, 2009). Кроме того, установление районов падения крупных метеоритов на земную поверхность важно с точки зрения изучения весьма специфического типа ударного метаморфизма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной монографии рассмотрены четыре темы, относящиеся к некоторым фундаментальным проблемам минералогии алмаза и имеющие определенное прикладное значение.

Первая из них касается анализа полного гранулометрического спектра алмазов в месторождениях разного генезиса. Работы в данном направлении появились сравнительно недавно, что обусловлено традиционно сложившимся представлением об алмазе как драгоценном камне. Это обусловило изучение крупности алмазов только в крупноразмерной части гранулометрического спектра, т.е. более 1 мм. Однако по мере расширения областей использования все большее внимание стали уделять и мелким кристаллам алмаза. Соответственно изучаемый гранулометрический спектр алмазов постепенно расширялся, и к настоящему времени в него включаются достаточно мелкие индивиды, вплоть до наночастиц.

Изучение полного гранулометрического спектра алмазов позволило весьма наглядно показать его существенные различия для коренных и россыпных месторождений. Кроме того, важными для алмазов оказались расчеты гранулометрического спектра не по массе, а по количеству зерен в определенных интервалах размерной шкалы. Они совершенно не актуальны для других россыпных минералов (особенно золота, платиноидов), но для алмазов, крупные кристаллы которых не встречаются в поисковых пробах, даже единичные находки мелких зерен имеют важное поисковое значение.

Анализ полного гранулометрического спектра алмазов коренных источников (кимберлитов и лампроитов), рассчитанного по числу зерен в определенных интервалах размерной шкалы, свидетельствует о существенном преобладании мелких частиц над крупными, что характерно для всех россыпейобразующих минералов. В аллювиальных россыпях происходит закономерное изменение гранулометрического состава алмазов в сторону уменьшения доли мелких кристаллов. Полученные результаты использованы для обоснования рекомендуемой авторами методики малообъемного опробования при поисках кимберлитов.

Вторая тема, рассмотренная авторами монографии, заключается в анализе общих морфологических особенностей мелких зерен алмазов разного генезиса. При этом проводится сравнение известных данных о морфологии крупных кристаллов алмаза, опубликованных в многочисленных литературных источниках, с полученными данными по морфологии мелких кристаллов. Отмечены как черты сходства, так и признаки различия морфологии крупных и мелких алмазов одного и того же генезиса. Далее, выявлены основные морфологические различия мелких алмазов коренных и россыпных месторождений. В связи с имеющимися утверждениями о том, что мелкие алмазы являются своеобразной генерацией, не связанной с главным этапом алмазообразования в мантии, подчеркивается вывод о единообразовании

крупных и мелких алмазов, общности морфологических признаков и их внутреннего строения.

Третья тема касается анализа результатов изучения поверхности мелких алмазов с применением методов электронной микроскопии высокого разрешения. Выявлено присутствие на поверхности мелких алмазов типичных для многих минералов микро- и нанодефектов, отражающих пористость, кавернозность и другие поверхностные формы растворения. Поверхностные микроформы отражают, кроме того, другие проявления активного взаимодействия алмазов с внешней средой как в мантийной, так и в экзогенной обстановке (пленки, налеты, корочки и т.д.). Широко представлены также микро- и наноформы, свидетельствующие об особенностях внутреннего строения кристаллов и их роста (трещиноватость, слоистость, бугорчатость, зернистость и др.).

Помимо генетического значения, детальное изучение поверхностных форм мелких алмазов может оказать помощь при их разбраковке в процессе прогнозно-поисковых работ на коренные источники.

Четвертая тема имеет прикладной характер и затрагивает ряд вопросов, связанных с использованием находок мелких алмазов в практике поисков коренных месторождений и при предварительной оценке степени алмазоносности кимберлитов, вскрытых буровыми скважинами. Авторами анализируется имеющийся мировой опыт работ, который заключается, в основном, в двух направлениях, основанных на извлечении и изучении мелких алмазов.

Одно из них сводится к использованию корреляционной зависимости числа находок мелких и крупных алмазов в кимберлитах, причем первых нередко на порядок больше, чем вторых. Это позволяет при опробовании вновь обнаруженных кимберлитовых и лампроитовых тел на первом этапе обработать керновые пробы массой в несколько десятков килограммов, установить присутствие в них мелких алмазов и прогнозировать соответствующее количество крупных. Кроме того, имеются исследования, которые показывают связь алмазоносности кимберлитов с присутствием в них мелких алмазов определенного морфологического типа. В дальнейшем можно перейти на более крупнообъемное опробование. Экономическая эффективность такого подхода очевидна, особенно при изучении алмазоносности трубок, перекрытых вскрышными породами.

Следует отметить, что в ряде экспериментов прямая зависимость между числом находок крупных и мелких алмазов в кимберлитах не подтвердилась. Однако это не означает, что от данного метода оценки алмазоносности кимберлитов следует отказаться. Целесообразнее сделать вывод о том, что метод имеет определенные рамки применения, которые необходимо изучить и, следовательно, внести соответствующие корректизы.

Второе направление – использование мелких алмазов в поисковой практике с целью открытия коренных месторождений, причем не только кимберлитов и лампроитов, но и технических алмазов импактного и корового происхождения. Для этого необходимо включить в прогнозно-поисковый

комплекс работ на коренные алмазы отбор и обогащение малообъемных проб ($0,5\text{--}1 \text{ м}^3$). Рекомендуется приурочить такие пробы к местам выхода пород наиболее древнего промежуточного коллектора алмазов. Малообъемное опробование на мелкие алмазы можно проводить с целью обоснования выбора площадей на проведение детальной наземной геофизической съемки. В других случаях их назначение – дополнить результаты геофизических исследований и уточнить выбор мест заложения буровых скважин, который обычно определяется расположением и характером магнитных аномалий.

Некоторое удорожание поисковых работ в данном случае компенсируется вероятными находками алмазов промышленной крупности, их осколков и попутным извлечением из концентратов большого количества минералов-спутников.

Библиографический список

1. Барашков Ю.П., Алтухова З.А. Кристалломорфология и распределение алмазов в сложнопостроенных месторождениях (на примере кимберлитовой трубы Удачная, Якутия) // Геология алмазов – настоящее и будущее. Воронеж: Воронеж. ун-т, 2005. С. 925–933.
2. Бартошинский З.В., Макаров В.А., Полканов Ю.А. Электронно-микроскопические исследования уплощенных, сильно деформированных алмазов из россыпей Украины // Минер. сб. Львовск. ун-та. 1977. № 31, вып. 2. С. 53–55.
3. Беккер Ю.Р. О поисковых критериях алмазоносности девонских россыпей Урала // Геология и условия образования алмазных месторождений. Пермь, 1970. С. 263–266.
4. Бобриевич А.П., Бондаренко М.Н., Гневущев М.А. и др. Алмазные месторождения Якутии. М.: Госгеолтехиздат, 1959. 528 с.
5. Богуши И.Н., Кедрова Т.В. Алмазы трубы Нюрбинская и связанных с ней даечного тела и россыпей ближнего сноса мезозойского возраста // Система коренной источник – россыпь. Якутск, 2009. С. 47–51.
6. Ваганов В.И. Алмазные месторождения России и мира. М.: Геоинформмарк, 2000. 371 с.
7. Ваганов В.И., Голубев Ю.К., Прусакова Н.А. Стадийная технология ведения прогнозно-поисковых и поисково-оценочных работ на алмазы на Восточно-Европейской платформе // Геология алмазов – настоящее и будущее. Воронеж: Воронеж. ун-т, 2005. С. 1124–1136.
8. Ваганов В.И., Дорофеев С.А. Создание и переинтерпретация шлихоминералогических баз данных при поисках коренных месторождений алмазов // Прогноз, поиски, оценка рудных и нерудных месторождений – достижения и перспективы. М.: ЦНИГРИ, 2008. С. 34–35.
9. Варшавский А.В., Буланова Г.П. Микрокристаллы природных алмазов // Докл. АН СССР. 1974. Т. 217. С. 1069–1072.
10. Великий Н.М., Милецкий Б.Е. Находка алмазов в нижнемеловых отложениях Актюбинского Приуралья // Докл. АН СССР. 1982. Т. 265, № 2. С. 397–399.
11. Вербицкая Н.П., Гапеева Г.М. О возможных источниках алмазов в россыпях западного склона Урала // Разведка и охрана недр. 1959. № 3. С. 8–12.
12. Веричев Е.М., Вержсак В.В., Посухова Т.В. и др. Минералогия алмаза из месторождений Архангельской кимберлитовой провинции // Геология алмазов – настоящее и будущее. Воронеж: Воронеж. ун-т, 2005. С. 965–981.
13. Галимов Э.М., Соболев Н.В., Ефимова Э.С. и др. Изотопный состав углерода алмазов, содержащих минеральные включения, из россыпей Северного Урала // Геохимия. 1989. № 9. С. 1363–1370.

14. Гаранин В.К. Введение в минералогию алмазных месторождений. М.: Изд-во МГУ, 1989. 209 с.
15. Гейко Ю.В., Дроздецкий В.В., Приходько В.Л., Середа В.В. Прогнозирование коренных месторождений алмазов на Новоград-Волынской площади (Украинский щит) // Геология алмазов – настоящее и будущее. Воронеж: Воронеж. ун-т, 2005. С. 1159–1174.
16. Голубев Ю.К., Ваганов В.И., Гречишников Д.Н. Состояние, проблемы и перспективы развития МСБ алмазов России // Прогноз, поиски, оценка рудных и нерудных месторождений – достижения и перспективы. М.: ЦНИГРИ, 2008. С. 59.
17. Голубева Ю.Ю., Щербакова Т.Е., Колесникова Т.И. Особенности вещественного состава и алмазоносность кимберлитов трубки ЦНИГРИ-Архангельская (Зимнебережное поле) // Прогноз, поиски, оценка рудных и нерудных месторождений – достижения и перспективы. М.: ЦНИГРИ, 2008. С. 61–62.
18. Граханов С.А., Неустроев Р.Г. Особенности распределения алмазов в продуктивных отложениях россыпи ближнего сноса Нюрбинская (Средне-Мархинский алмазоносный район) // Система коренной источник – россыпь. Якутск, 2009. С. 43–46.
19. Граханов С.А., Сулейманов А.М., Маланин Ю.А. и др. Открытие новых древних россыпей алмазов на севере Якутии // Система коренной источник – россыпь. Якутск, 2009. С. 37–42.
20. Граханов С.А., Шаталов В.И., Штыров В.А. и др. Россыпи алмазов России. Новосибирск: Гео, 2007. 457 с.
21. Егоров К.Н., Карпенко М.А., Кошкарев Д.А. и др. Вещественно-индикационные признаки алмазоносности многофазных кимберлитовых трубок (на примере трубки «Юбилейная») // Алмазы и благородные металлы Тимано-Уральского региона. Сыктывкар, 2006. С. 21–22.
22. Епифанов В.А. Проблема прогноза и поисков коренных алмазов с позиции пульсационного развития Земли // Алмазы и благородные металлы Тимано-Уральского региона. Сыктывкар, 2006. С. 22–24.
23. Зинчук Н.Н., Алябьев С.Г., Банзерук В.И. и др. Геология, вещественный состав и алмазоносность кимберлитов Накынского поля Якутии (на примере трубки Нюрбинская) // Геология алмазов – настоящее и будущее. Воронеж: Воронеж. ун-т, 2005. С. 807–824.
24. Зинчук Н.Н., Афанасьев В.П. Поисковая минералогия алмаза: история, состояние, перспективы // Геология алмазов – настоящее и будущее. Воронеж: Воронеж. ун-т, 2005. С. 1217–1231.
25. Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. М.: Недра, 2003. 603 с.
26. Зинчук Н.Н., Коптиль В.И., Квасница В.Н. Особенности мелких алмазов из кимберлитовых тел и россыпей Сибирской платформы (Якутия) // Минералог. журн. 2003. Т. 25, № 4. С. 32–47.

27. Зозуля Д.Р., Корчагин А.У., Корсакова О.П. Перспективные площади Мурманской области на обнаружение коренного алмазоносного магматизма и поисковые характеристики четвертичных отложений // Алмазы и благородные металлы Тимано-Уральского региона. Сыктывкар, 2006. С. 65–67.
28. Илалтдинов И.Я., Ко жеевников А.И., Краснов В.И., Осовецкий Б.М. Комплексные шлихогеохимические исследования на территории Чувашской Республики // Литология и полезные ископаемые Центральной России: материалы регион. совещ. Воронеж, 2000. С. 41.
29. Каменцев Л.И. Импактные алмазы в материале выбросов сохранившихся и денудированных астроблем – палеогеографические и стратиграфические следствия // Система коренной источник – россыпь. Якутск, 2009. С. 63–66.
30. Каминский В.Ф. Новый генетический тип промышленно-алмазоносных пород – лампроиты Западной Австралии // Обз. информ. ВИЭМС. М., 1987. 47 с.
31. Квасница В.Н. Мелкие алмазы. Киев: Наукова Думка, 1985. 216 с.
32. Квасница В.Н. Алмазы юго-западной части Восточно-Европейской платформы // Геология алмазов – настоящее и будущее. Воронеж: Воронеж. ун-т, 2005. С. 667–674.
33. Квасница В.Н., Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Типоморфизм микрокристаллов алмаза. М.: Недра, 1999. 224 с.
34. Ковалчук О.Е., Свиридова Н.О., Коптиль В.И. База данных по алмазам и программно-аппаратный комплекс их обработки // Геология алмазов – настоящее и будущее. Воронеж: Воронеж. ун-т, 2005. С. 1535–1548.
35. Кудрявцева Г.П., Посухова Т.В., Вержак В.В. и др. Морфогенез алмаза и минералов-спутников в кимберлитах и родственных породах Архангельской кимберлитовой провинции. М.: Полярный круг, 2005. 624 с.
36. Курганьев П.П., Кузьмин И.А. Новые данные о перспективах коренной алмазоносности Енисейского кряжа // Алмазы и благородные металлы Тимано-Уральского региона. Сыктывкар, 2006. С. 78–79.
37. Кухаренко А.А. Алмазы Урала. М.: Госгеолтехиздат, 1955. 165 с.
38. Лаврова Л.Д., Печников В.А., Плешаков А.М. и др. Новый генетический тип алмазных месторождений. М.: Новый мир, 1999. 220 с.
39. Ларченко В.А., Павленко Т.А., Минченко Г.В., Степанов В.П. Генерации алмазов в кимберлитах Зимнего берега (Архангельская алмазоносная провинция) // Геология алмазов – настоящее и будущее. Воронеж: Воронеж. ун-т, 2005. С. 1054–1075.
40. Ларченко В.А., Степанов В.П., Минченко Г.В., Кечик И.А. Алмазоносность кимберлитов и родственных им пород Зимнего берега // Вестн. Воронеж. ун-та. 2004. № 2. С. 134–147.
41. Лукьянова Л.И., Смирнов Ю.Д., Зильberman А.М. и др. О находках алмазов в пикритах Урала // Зап. Всес. мин. о-ва. 1978. Ч. 107, вып. 5. С. 580–585.

42. Лунев Б.С., Осовецкий Б.М. Мелкие алмазы Урала. Пермь: Перм. ун-т, 1996. 128 с.
43. Лунев Б.С., Осовецкий Б.М., Уткин Р.А. и др. Мелкие алмазы Вишерского района и их поисковое значение // Геология, поиски и разведка нерудных полезных ископаемых. Л., 1980. Вып. 5. С. 64–68.
44. Лупашко Т.Н., Полканов Ю.А., Таращан А.Н. и др. Азотсодержащие импактные алмазы из Попигайского кратера // Алмазы и благородные металлы Тимано-Уральского региона. Сыктывкар, 2006. С. 88–89.
45. Макеев А.Б. Нанопленки и примазки на поверхности бразильских алмазов (кимберлитовое поле Жуина, Бразилия) // Наноминералогия. Ультра- и микродисперсное состояние минерального вещества. СПб.: Наука, 2005. С. 301–336.
46. Макеев А.Б., Брянчанинова Н.И., Мон Фанцион. Особенности кристалломорфологии мелких алмазов месторождения Той-Доу-Гоу (Китай) // Алмазы и благородные металлы Тимано-Уральского региона. Сыктывкар, 2006. С. 92–95.
47. Мальков Б.А. Проблемы и перспективы алмазоносности Русской плиты, Тимана и Урала // Геология алмазов – настоящее и будущее. Воронеж: Воронеж. ун-т, 2005. С. 347–354.
48. Мальков Б.А. Импактные алмазы (тогориты) и медистое золото (купроаурид) в Карской астроблеме // Алмазы и благородные металлы Тимано-Уральского региона. Сыктывкар, 2006. С. 102–104.
49. Мальков Б.А., Холопова Е.Б. Трубки взрыва и алмазоносные россыпи Среднего Тимана. Сыктывкар: Геопринт, 1995. 52 с.
50. Мальков Б.А., Швецова И.В. Кривогранные алмазы и мелкое золото девонских россыпей Среднего Тимана // Алмазы и благородные металлы Тимано-Уральского региона. Сыктывкар, 2006. С. 104–107.
51. Масайтис В.Л., Гневушев М.А., Футергендер С.И. Алмазы в импактиках Попигайского метеоритного кратера // Записки Всес. мин. о-ва. 1972. Ч. 101, вып. 1. С. 108–112.
52. Митюхин С.И., Лелюх М.И. Геологоразведочный комплекс АК «АЛРОСА»: современное состояние, цели и результаты деятельности, задачи // Геология алмазов – настоящее и будущее. Воронеж: Воронеж. ун-т, 2005. С. 25–30.
53. Морозов О.А. Новые данные по алмазоносности Воронежской антиклизы // Геология алмазов – настоящее и будущее. Воронеж: Воронеж. ун-т, 2005. С. 354–363.
54. Нельзин Л.П. Поиски первоисточников алмазов среди остаточных кор выветривания в разрезах мезозойских отложений Верхнекамской впадины // Россыпи и месторождения кор выветривания: факты, проблемы, решения. Пермь, 2005. С. 192–194.
55. Орлов Ю.Л. Морфология алмаза. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 235 с.
56. Осовецкий Б.М. Тяжелая фракция аллювия. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1986. 259 с.

57. Осовецкий Б.М. Малообъемное опробование на мелкие алмазы как эффективный метод поисков кимберлитов // Прогноз, поиски, оценка рудных и нерудных месторождений – достижения и перспективы. М.: ЦНИГРИ, 2008. С. 151–152.
58. Осовецкий Б.М. /ред./. Мелкие алмазы и минералы-спутники в юрских отложениях Вятско-Камской впадины. Пермь: Перм. ун-т, 2008. 212 с.
59. Осовецкий Б.М. Россыпебразующие минералы Вятско-Камской впадины. Пермь: Перм. ун-т, 2011. 250 с.
60. Осовецкий Б.М. Наноскульптура поверхности золота. Пермь: Перм. ун-т, 2012. 232 с.
61. Осовецкий Б.М., Наумова О.Б. Микро- и наноформы поверхности октаэдрических алмазов // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Пермь: Перм. ун-т, 2014. Вып. 17. С. 22–29.
62. Осовецкий Б.М., Наумова О.Б. Импактные алмазы россыпей западного склона Урала // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. Пермь: Перм. ун-т, 2014. С. 43–47.
63. Осовецкий Б.М., Наумова О.Б. Микро- и наноформы поверхности импактных алмазов // Вестн. Перм. ун-та. Геология. 2014. Вып. 2 (23). С. 8–19.
64. Палкина Е.Ю., Хренов А.Я. Три главных параметра изучения алмазов при прогнозах и поисках их месторождений // Минер. ресурсы Украины. 1997. № 1, вып. 2. С. 14–16.
65. Печников В.А. Алмазоносность метаморфических пород (составление проблем) // Алмазы и благородные металлы Тимано-Уральского региона. Сыктывкар, 2006. С. 153–154.
66. Плякин А.М., Щербаков Э.С. История изучения алмазоносности Среднего Тимана // Алмазы и благородные металлы Тимано-Уральского региона. Сыктывкар, 2006. С. 114–117.
67. Подчасов В.М., Евсеев М.Н., Богатых И.Я. и др. Россыпи алмазов мира. М.: ООО «Геоинформмарк», 2005. 747 с.
68. Полканов Ю.А. Алмазы в россыпях Русской платформы // Синтетические алмазы. 1973. № 3. С. 68–70.
69. Полканов Ю.А., Еременко Г.К., Сохор М.И. Импактные алмазы в мелкозернистых россыпях Украины // Докл. АН УССР. Сер. Б. 1973. № 11. С. 989–990.
70. Прокопчук Б.И. Алмазные россыпи и методика их прогнозирования и поисков. М.: Недра, 1979. 248 с.
71. Ракин В.И., Петровский В.А. Особенности морфологии кристаллических форм алмазов // Алмазы и благородные металлы Тимано-Уральского региона. Сыктывкар, 2006. С. 118–120.
72. Ружицкий В.О. Алмазы Европы // Природа. 1960. № 11. С. 27–34.
73. Савко А.Д., Шевырев Л.Т. Еще раз об эпохах коренной алмазоносности в юго-западной кимберлитовой субпровинции Восточно-Европейской

платформы // Геология алмазов – настоящее и будущее. Воронеж: Воронеж. ун-т, 2005. С. 610–627.

74. Силаев В.И., Петровский В.А., Сухарев А.Е. Изотопно-углеродная неоднородность карбонато в связи с проблемой происхождения алмазов // Алмазы и благородные металлы Тимано-Уральского региона. Сыктывкар, 2006. С. 34–37.

75. 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.

76. Скороспелкин С.А. Геотектоническое развитие и перспективы алмазоносности северной части Восточно-Европейской платформы // 10-я конф. «Поиски и разведка в областях материковых оледенений»: тез. докл. СПб., 1994. С. 133–137.

77. Скузоватов С.Ю., Зедгенизов Д.А., Рагозин А.Л., Шацкий В.С. Состав среды кристаллизации алмазов в «оболочке» из кимберлитовой трубы Сытыканская (Якутия) // Геология и геофизика. 2012. Т. 53, № 11. С. 1556–1571.

78. Смирнов Ю.Д. Источники алмазов уральских россыпей // Геология россыпей. М.: Наука, 1965. С. 279–282.

79. Степанов И.С. Климатические и палеогеографические условия образования россыпей алмазов на Урале и на востоке Русской платформы // Россыпи и месторождения кор выветривания: факты, проблемы, решения. Пермь, 2005. С. 270–272.

80. Третьяченко В.В. Минерагеническое районирование кимберлитовой области Юго-Восточного Беломорья: автореф. дисс. ... канд. г.-м. наук. М.: МГУ, 2008. 20 с.

81. Чашка А.И., Князев Г.И. Региональная зональность Украинской алмазоносной провинции // Геология алмазов – настоящее и будущее. Воронеж: Воронеж. ун-т, 2005. С. 194–200.

82. Черкасов Г.Н., Сержантова Е.А. Структурный контроль в распределении проявлений россыпных алмазов в поле Сибирского кратона и алгоритм поиска их коренных источников // Геология алмазов – настоящее и будущее. Воронеж: Воронеж. ун-т, 2005. С. 200–214.

83. Харьков А.Д., Зинчук Н.Н., Зуев В.М. История алмаза. М.: Недра, 1997. 601 с.

84. Шафрановский Г.И. Новые данные по морфологии алмазов из Красновишерского района // Алмазы и алмазоносность Тимано-Уральского региона. Сыктывкар: Геопринт, 2001. С. 148–149.

85. Шефтель Н.Н., Кисенко В.Е. Нормальный механизм роста кристаллов // Процессы реального кристаллообразования. М.: Наука, 1977. С. 22–30.

86. Шкодзинский В.С. Генезис главных разновидностей алмаза // Алмазы и благородные металлы Тимано-Уральского региона. Сыктывкар, 2006. С. 45–47.

87. Щербаков Э.С., Плякин А.М., Шаметъко В.Г., Битков П.П. Рассыпная алмазоносность девонских терригенных отложений Тимана // Геология алмазов – настоящее и будущее. Воронеж: Воронеж. ун-т, 2005. С. 382–386.
88. Юрк Ю.Ю., Каикаров И.Ф., Полканов Ю.А. и др. Алмазы песчаных отложений Украины. Киев: Наукова Думка, 1973. 168 с.
89. Юшкин Н.П., Пыстин А.М., Макеев А.Б. и др. Алмазы и алмазоносность Тимано-Уральского региона // Алмазы и благородные металлы Тимано-Уральского региона. Сыктывкар, 2006. С. 8–9.
90. Яценко Г.М. Алмазоносные формации Волыно-Подольского перикратона Восточно-Европейской платформы // Геология алмазов – настоящее и будущее. Воронеж: Воронеж. ун-т, 2005. С. 396–405.
91. Araujo D.P., Griffin W.L., O'Reilly S.Y. Micro-inclusions in monocrystalline octahedral diamonds from Diavik, Slave Craton: Clues to diamond genesis // 9th Inter. Kimberlite Conf. Extended Abstr. 2008. P. 1–3.
92. Bangert U., Barnes R., Houmsome L.S. et al. Electron energy loss spectroscopic studies of brown diamonds // Phil. Mag. 2006. Vol. 29–30. P. 4757–4779.
93. Battilani G.A., Gomes N.S., Guerra W.J. The occurrence of microdiamonds in Mesoproterozoic Chapada Diamantina intrusive rocks – Bahia (Brazil) // Annals of the Brazilian Academy of Sciences. 2007. Vol. 79, No 2. P. 321–332.
94. Bernatowicz T.J., Croat T.K., Daulton T.A. Origin and Evolution of Carbonaceous Presolar Grains in Stellar Environments // Meteorites and the Early Solar System. 2006. Vol. 2. P. 109–126.
95. Bogus A., Gebeshuber I.C., Pauschitz A. et al. Micro- and nanomechanical properties of diamond film with various surface morphologies // Diamond and Related Materials. 2008. Vol. 17. P. 1998–2004.
96. Bostick B.C., Jones R.E., Ernst W.G. et al. Low-temperature microdiamond aggregates in the Maksyutov Methamorphic Complex, South Ural Mountains, Russia // Amer. Miner. 2003. Vol. 88. P. 1709–1717.
97. Bovenkerk H.P. Some observations on the morphology and physical characteristics of synthetic diamond // Amer. Miner. 1961. Vol. 46. P. 952–963.
98. Boyd F.R. Where do we go from here? // Kimberlites and Related Rocks. Blackwell, Oxford, 1989. Vol. 2, No 14. P. 1239–1251.
99. Boyd S., Pineau F., Javoy M. Modelling the growth of natural diamonds // Chemical Geology. 1994. Vol. 116. P. 29–42.
100. Carabineiro S.A.C., Avalos-Borja M., Buijnsters J.G. Analytic electron microscopy of gold nanoparticles on nano/microdiamond supports // Current Microscopy Contributions to Advances in Science and Technology. 2012. Vol. 2. P. 1246–1251.
101. Cartigny P., Harris J.W., Javoy M. Diamond genesis, mantle fractionation and mantle nitrogen content: a study of $\delta^{13}\text{C}$ – N concentrations in diamonds // Earth Planet. Sci. Lett. 2001. Vol. 185. P. 85–98.

102. Chapman J.G., Boxer G.L. Size distribution analyses for estimating diamond grade and value // *Lithos*. 2004. Vol. 76. P. 369–375.
103. Deakin A.S., Boxer G.L. Argyle AK 1 diamond size distribution: the use of fine diamonds to predict the occurrence of commercial sized diamonds // *Kimberlites and Related Rocks*. 1989. Vol. 2, No 14. P. 1117–1122.
104. Dobrzhinetskaya L.F., Liu Z., Cartingy P. et al. Synchrotron infrared and Raman spectroscopy of microdiamonds from Erzgebirge, Germany // *Earth and Planetary Letters*. 2006. Vol. 248. P. 340–349.
105. Fedortchuk Y., Manghnani M.H., Hushur A. et al. An atomic force microscopy study of diamond dissolution features: The effect of H₂O and CO₂ in the fluid on diamond morphology // *Amer. Miner.* 2011. Vol. 96. P. 1768–1775.
106. Fedortchuk Y., Schmidt M.W., Liebske C. Experimental study of diamond resorption during mantle metasomatism // *Geophysical Research Abstr.* 2014. Vol. 16.
107. Guillou C.L., Rouzoud J.N., Remusat L. et al. Structures, origin and evolution of various carbon phases in the ureilite Northwest Africa 4742 compared with laboratory-shocked graphite // *Geochimica and Cosmochimica Acta*. 2010. Vol. 74. P. 4167–4185.
108. Gurney J.J. Diamonds // *Kimberlites and Related Rocks*. Dlackwell, Oxford, 1989. Vol. 2, No 14. P. 935–965.
109. Haggerty S.E. Diamond genesis in a multiply-constrained model // *Nature*. 1986. No 320. P. 34–38.
110. Harris J.W. Diamond geology // *The Properties of Natural and Synthetic Diamond*. London: Academic Press, 1992. P. 345–393.
111. Harris J.W., Duncan D.J., Zhang F. et al. The physical characteristics and syngenetic inclusion geochemistry of diamonds from pipe 50, Liaoning Province, People's Republic of China // Proc. 5th Inter. Kimberlite Conf. Rio de Janeiro, 1994. Vol. 2. P. 106–115.
112. Heimersson M., Eng P., Carlson J.A., Geo P. Ekati Diamond Mine. Northwest territories, Canada / NI 43-101 Technical Report. Dominio Diamond Corporation. 2013. 401 p.
113. Howard J.M., Hanson W.D. Geology of the Crater of Diamonds State Park and vicinity, Pike County, Arkansas. Arkansas, 2008. 14 p.
114. James D.R. Diamond mining at Las de Gras, north-west territories // Richardson Green-shields. 1993. 21 p.
115. Jennings C.M.H. Exploration for diamondiferous kimberlites and lamproites // *Mordern Exploration Techniques*. 1990. No 10. P. 139–148.
116. Kaminski M.A., Armitage D.A., Jones A.P., Coccioni R. Shocked Diamonds in Agglutinated Foraminifera from the Cretaceous/Paleogene Boundary, Italy – a priliminary report // Proc. the 7-th Inter. Workshop. 2008. Vol. 13. P. 57–61.
117. Kaminsky F.V., Zakharchenko O.D., Griffin W.L. et al. Diamond from the Guaniamo area, Venezuela // *The Canad. Miner.* 2000. Vol. 38. P. 1347–1370.

118. *Kamiya Y., Lang A.R.* On the structure of coated diamonds // *Phylos*. Mag. 1965. Vol. 11. P. 347–356.
119. *Karczemcska A.T.* Diamonds in meteorites – Raman mapping and cathodoluminescence studies // *J. of Achiev. in Materials and Manufacturing Engineering*. 2010. Vol. 43, No 1. P. 94–107.
120. *Khokhryakov A.F., Pal'yanov Y.N.* The evolution of diamond morphology in the process of dissolution: Experimental data // *Amer. Miner.* 2007. Vol. 92, No 5-6. P. 909–917.
121. *Korsakov A.V., Vandenabeele P., Theunissen K.* Discrimination of metamorphic diamond populations by Raman spectroscopy (Kokchetav, Kazakhstan) // *Spectrochimica Acta*. 2005. Part A 61. P. 2378–2385.
122. *Ksanda C.J., Henderson E.P.* Identification of diamond in the Canyon Diablo iron // *Amer. Mineral.* 1939. Vol. 24. P. 677–680.
123. *Kshirsagar S.T., Kshirsagar R.B., Patil P.S. et al.* Gradual transitions in morphology of diamond films grown by using N₂ admixtures of CH₄+H₂ gas in a hot filament assisted chemical vapour deposition system // *Diamond and Related materials*. 2005. Vol. 14. P. 232–242.
124. *Lehnert K., Loewer R., Orr R.G., Robertshaw P.* Diamond-bearing Kimberlites in Saskatchewan, Canada: The Fort à la Corne Case History // *Explor. Mining Geol.* 1992. Vol. 1, No 4. P. 391–403.
125. *McCallum M.E.* Diamonds from kimberlites in the Colorado-Wyoming State Line district / M.E.McCallum, C.D.Mabarak, H.G.Coopersmith // *Kimberlites, Diatremes, and Diamonds: Proc. Sec. Int. Kimberlite Conf.* Washington. 1979. Vol. 1. P. 42–58.
126. *McCandless T.E.* Microdiamonds from the Sloan 1 and 2 kimberlites, Colorado, USA // Extended Abstr., Workshop on Diamonds. 28th Inter. Geol. Cong. Washington, 1989. P. 44–46.
127. *McCandless T.E., Waldman M.A., Garney J.J.* Macrodiamonds and microdiamonds from Murfreesboro lamproites, Arkansas: morphology, mineral inclusions, and carbon isotope geochemistry // Proc. 5th Inter. Kimberlite Conf. Rio de Janeiro. 1994. Vol. 2. P. 78–97.
128. *Newton R.L., Davidson J.L., Lance M.J.* Raman Microscopic Characterization of Proton-Irradiated Polycrystalline Diamond Films // *Diamond and Related Materials*. 2005. Vol. 14, No 2. P. 173–178.
129. *Otter M.L., McCallum M.E., Gurney J.J.* A physical characterization of the Sloan (Colorado) diamonds using a comprehensive diamond description scheme // Proc. 5th Inter. Kimberlite Conf. Rio de Janeiro. 1994. Vol. 2. P. 15–31.
130. *Pattison D.R.M., Levinson A.A.* Are euhedral microdiamonds formed during ascent and decompression of kimberlite magma? Implications for use of microdiamonds in diamond grade estimation // *Applied Geochemistry*. 1995. Vol. 10. P. 725–738.
131. *Richardson S.H., Harris J.W., Gurney J.J.* Three generations of diamonds from old continental mantle // *Nature*. 1993. Vol. 366. P. 256–258.

132. *Rombouts L.* Statistical distribution for diamonds // Proc. 5th Inter. Kimberlite Conf. Rio de Janeiro. 1994. Vol. 2. P. 202–214.
133. *Schrand A.M., Ciftan Hens S.A., Shenderova O.A.* Nanodiamond particles: Properties and Perspectives for bioapplications // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. 2009. Vol. 34. P. 18–74.
134. *Seal M.* Structure in diamonds as revealed by etching // Amer. Miner. 1965. Vol. 50. P. 105–123.
135. *Sharkov M.D., Boiko M.E., Ivashevskaya S.N., Belyakova N.S.* Studying Ultradisperse Diamond Structure within Explosively Synthesized Samples via X-Ray Techniques // J. Physics: Conf. Ser. 461. 2013. 5 p.
136. *Strack E.* Die Diamantvorkommen der Elfenbeinkuste. Bericht über die Vorkommen von Tortiya and Seguela // Zeitschrift der Deutschen Gemmologischen Gesellschaft. 1975. B. 24, N 4. S. 199–229.
137. *Tolansky S.* Microstructures of Diamond Surfaces. London: NAG Press, 1955. 242 p.
138. *Ushkov V.V., Alexeev I.A., Shelukhina Y.S., Norris R.G.* Kimberlite indicator mineral-based diamond exploration program in Karelia, northwest Russia // 25-th Int. Applied Geochem. Symp. Rovaniemi, Finland. 2011. Vol. 3. P. 57–86.
139. *Walmsley J.C., Lang A.R.* On sub-micrometre inclusions in diamond coat: crystallography and composition of ankerites and related rhombohedral carbonates // Mineral Magazine. 1992. Vol. 56. P. 533–543.
140. *Weisberg M.K., McCoy T.J., Krot A.N.* Systematics and Evaluation of Meteorite Classification // Meteorites and the Early Solar System. 2006. Vol. 1. P. 19–52.
141. *Yanan B., Dubuchick T.V., Liabchekov T.D.* Discovery of submicron diamonds within kimberlite in Liaoning Province, China and its significance // Chinese Science Bull. 1997. Vol. 42, No 11. P. 939–941.
142. *Yang J.S., Dobrzhinetskaya L., Bai W.J. et al.* Diamond- and coesite-bearing chromitites from the Luobusa ophiolite, Tibet // Geology. 2007. Vol. 35, No 10. P. 875–878.

Научное издание

**Осовецкий Борис Михайлович
Наумова Оксана Борисовна**

**МЕЛКИЕ АЛМАЗЫ
И ИХ ПОИСКОВОЕ ЗНАЧЕНИЕ**

Монография

Редактор *Л.А. Богданова*
Корректор *Л.И. Семицветова*
Компьютерная верстка *Б.М. Осовецкого*

Подписано в печать 18.12.2014. Формат 60x84/8.
Усл. печ. л. 17,75. Тираж 200 экз. Заказ № 377.

Редакционно-издательский отдел
Пермского государственного национального
исследовательского университета
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15

Отпечатано с оригинал-макета предпринимателем
Богатыревым П.Г., ОГРН 304 590427400071

Адрес: г. Пермь, ул. Пушкина, 110, офис 122
Тел./факс 236-53-53
E-mail: klenprint @yandex.ru