

РУДЫ и МЕТАЛЛЫ

Руды и металлы № 1/2025
Ores and metals № 1/2025

МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА, ПОИСКОВ, ОЦЕНКИ И РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553. 81:549

Основные морфогенетические характеристики минералов-индикаторов кимберлитов

Хмельков А. М., Чугуевская Э. А.

АК «АЛРОСА» (ПАО), Вилюйская геологоразведочная экспедиция, г. Новосибирск, Россия

Аннотация. Приведены сведения по морфологии и морфогенезу минералов из кимберлитов и ореолов рассеяния. Детально рассмотрены основные морфогенетические особенности главных минералов-индикаторов кимберлитов. Описаны наиболее распространённые типы микрорельефа на минералах, их диагностические признаки и генезис. Физиографические исследования являются основными при изучении кимберлитовых минералов из шлиховых ореолов рассеяния в процессе алмазопоисковых работ. Знание генезиса особенностей макро- и микроморфологии кимберлитовых минералов позволяет судить о физико-химических условиях их образования, что помогает восстановить последовательность этапов морфогенеза всей минеральной ассоциации и проследить историю развития ореолов рассеяния.

Приведённые новые сведения способны оказать помощь специалистам, занятым поисками и прогнозом алмазных месторождений, в том числе при определении генезиса поверхностей на минералах и выяснении условий их формирования. Морфологические особенности минералов-индикаторов кимберлитов могут служить хронологическим репером, позволяющим установить хронологическую последовательность экзогенных изменений минерального вещества.

Ключевые слова: морфология, морфогенез, минералы-индикаторы кимберлитов, первичная поверхность, кимберлиты, гранат, пикроильменит, хромшпинелид, оливин.

Для цитирования: Хмельков А. М., Чугуевская Э. А. Основные морфогенетические характеристики минералов-индикаторов кимберлитов. Руды и металлы. 2025. № 1. С. 40–56. DOI: 10.47765/0869-5997-2025-10003.

The principal morphogenetic characteristics of kimberlite indicator minerals

Khmelkov A. M., Chuguevskaya E. A.

Vilyuisk Geological Exploration Expedition, ALROSA (PJSC), Novosibirsk, Russia

Annotation. The article provides information on the morphology and morphogenesis of minerals from kimberlites and their scattering halos. The principal morphogenetic characteristics of the main kimberlite indicator minerals are discussed in detail. The most common types of microrelief on the minerals, their diagnostic features, and the genesis are described. Physiographic investigations play the basic role in studying the kimberlite minerals from heavy mineral concentrate scattering halos during geological prospecting for diamond. Knowledge of the genesis of the macro- and micromorphology of kimberlite minerals allows one to suggest the physical and chemical conditions of the mineral formation. This helps to reconstruct the succession of stages of the entire mineral assemblage morphogenesis and to trace the history of the scattering halos development.

The new information presented may help specialists engaged in prospecting and forecasting for diamond deposits, among other tasks, to determine the genesis of surfaces on the minerals and to clarify their formation conditions. Morphological features of the kimberlite indicator minerals may serve as a chronological reference point that allows to reveal a chronological succession of supergene transformations in the mineral matter.

Keywords: morphology, morphogenesis, kimberlite indicator minerals, primary surface, kimberlites, garnet, picroilmenite, chromespinelide, olivine.

For citation: Khmelkov A. M., Chuguevskaya E. A. The principal morphogenetic characteristics of kimberlite indicator minerals. Ores and metals. 2025. No. 1. pp. 40–56. DOI: 10.47765/0869-5997-2025-10003.

© Хмельков А. М., Чугуевская Э. А., 2025
© Khmelkov A. M., Chuguevskaya E. A., 2025

Введение. Важное место при алмазопоисковых работах занимает изучение морфологии минералов-индикаторов кимберлитов (МИК) и выяснение условий их морфогенеза. Морфология – первое, с чем сталкивается исследователь при изучении минерального вещества [4]. Каждый признак минерального индивида по закону резонанса отражает определённые параметры среды, в результате чего становится возможным с помощью индикаторных признаков восстанавливать все особенности минералообразующей обстановки прошлого [13]. Исследуя физиографию МИК, опытный минералог оценивает не просто литодинамические обстановки, через которые прошли данные минералы, но и особенности этих обстановок, интенсивность влияния тех или иных факторов, его продолжительность, последовательность этапов морфогенеза и т. д. По образному замечанию академика Н. П. Юшкина, минералы являются «письмами» из геологического прошлого, которые можно читать с помощью различных методов и приборов, получая ценную информацию [14].

Ведущую роль при проведении алмазопоисковых работ занимает шлихо-минералогический метод, в основу которого положено нахождение, изучение и прослеживание МИК в ореолах рассеяния. В практике алмазопоисковых работ традиционно используются такие основные минералы-индикаторы кимберлитов, как гранат, пикроильменит, хромшпинелид, оливин и хромдиопсид, которые обладают ярко выраженным типоморфизмом. В данной работе приведены сведения по морфологии и морфогенезу МИК из кимберлитов и ореолов рассеяния преимущественно Якутской алмазоносной провинции (ЯАП), в отдельных случаях показаны наиболее характерные примеры по некоторым другим территориям.

Активизация алмазопоисковых работ во второй половине XX века в пределах Сибирской платформы стимулировала отечественную науку к усиленному изучению морфологии и морфогенеза МИК. Наиболее значимыми в данном направлении являются экспериментальные и прикладные исследования В. П. Афанасьева [4]. Однако как в зарубежной, так и в отечественной литературе незаслуженно мало уделено внимания внешней топографии поверхностей на МИК. Опубликованные данные в большинстве своём касаются макроморфологии зёрен минералов [1, 2, 8, 15]. В то же время значительный объём сведений по микроморфологии кимберлитовых минералов изложен в производственных отчётах Амакинской ГРЭ АК «АЛРОСА» и не известен широкому кругу исследователей. Традиционно обладая высококвалифицированной минералогической школой, Амакинская экспедиция занималась «тонкими» физиографическими исследованиями кимберлитовых минералов на всём протяжении своего существования. В этой связи приведённые новые данные по морфогенетическим особенностям МИК способны оказать существенную помощь специалистам в области алмазной геологии, в том числе при определении генезиса поверхностей на минералах и выяснении условий, при которых происходило их формирование.

Методы исследований. В работе использовались коллекции зёрен МИК, отобранные авторами при просмотре шлихов во время работы в Амакинской и Вилюйской экспедициях АК «АЛРОСА» за период с 2000 по 2025 год включительно. Исследования морфологических особенностей МИК были выполнены с помощью оптической компьютерной системы на базе бинокуляра «Leica» MZ16A (Германия), предназначенной для визуализации и качественной обработки изображений макро- и микроморфологии минералов. Данная система, помимо бинокуляра, включает видеокамеру Leica DFC-490 (8 Мп) и рабочую станцию с программным комплексом, обеспечивающим компьютерный интерфейс. Оптическое оборудование позволяет проводить увеличение объектов до 920 крат с выводом цветного изображения на монитор и цифровой записью получаемого изображения. Качественные фотографии минералов и их поверхностей выполнены с помощью программного обеспечения «Leica Application Suite», которое предоставляет возможность делать снимки с высочайшей глубиной резкости путём пошагового (в микронах) фотографирования отдельных срезов и последующей автоматической «сшивкой» получаемого изображения.

© Хмельков А. М., Чугуевская Э. А., 2025
© Khmelkov A. M., Chuguevskaya E. A., 2025

РУДЫ и МЕТАЛЛЫ
Руды и металлы № 1/2025, с. 40–56 / Ores and metals № 1/2025, p. 40–56
DOI: 10.47765/0869-5997-2025-10003

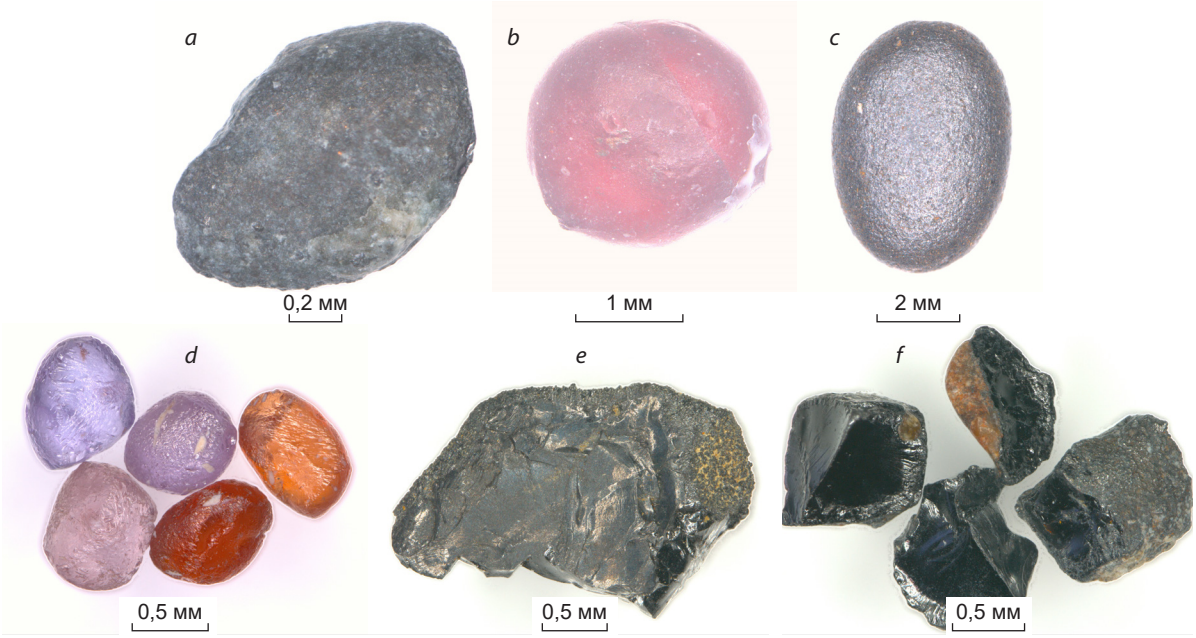

Рис. 1. Внешний вид первично целых (*a, b*), вторично целых (*c, d*), первично колотых (*e*) и вторично колотых (*f*) зёрен пикроильменита (*a, c, e, f*) и граната (*b, d*):
a – тр. Комсомольская-Магнитная (Верхне-Мунское кимберлитовое поле); *b* – тр. Чукукская (Алакит-Мархинское кимберлитовое поле); *c* – р. Хастах (Приморский алмазоносный район); *d* – кубоиды, россыпь Дьюкунах (Моркокинский алмазоносный район); *e* – участок Бобико (Гвинея); *f* – тр. Заполярная (Верхне-Мунское поле)

Fig. 1. Appearance of the primary whole (*a, b*), secondary whole (*c, d*), primary broken (*e*) and secondary broken (*f*) grains of picroilmenite (*a, c, e, f*) and garnet (*b, d*):
a – Komsomolskaya-Magnitnaya pipe (Upper-Muna kimberlite field); *b* – Chukuka pipe (Alakit-Markha kimberlite field); *c* – Khastakh River (Primorsky diamondiferous area); *d* – cuboids, Dyukunakh placer (Morkoka diamondiferous area); *e* – Bobiko site (Guinea); *f* – Zapolyarnaya pipe (Upper-Muna field)

Результаты исследований. Приступая к рассмотрению морфогенеза основных МИК, кратко остановимся на некоторых их морфологических особенностях, которые являются общими для всех минералов кимберлитов. В первую очередь более детально рассмотрим такие понятия, как первично целые и вторично целые, первично колотые и вторично колотые зёрна минералов, первично и вторично трещиноватые зёрна, а также разберём некоторые другие специальные термины, традиционно используемые в описательной минералогии при морфогенетическом анализе МИК. Используемая в работе специальная терминология не только отражает физиографические особенности МИК, но также несёт в себе и генетический контекст, так как позволяет судить о конкретных физико-химических условиях формирования той или иной морфологической особенности конкретного минерала.

Первично и вторично целые зёрна

К первично целым зёрнам, независимо от того, массивное зерно или трещиноватое, следует относить такие зёрна, поверхность которых обладает однотипной первичной поверхностью. В качестве примеров могут служить первично целое массивное зерно пикроильменита с тонкошероховатой первичной поверхностью из тр. Комсомольская-Магнитная Верхне-Мунского кимберлитового поля (рис. 1, *a*) и первично целое трещиноватое зерно пиропа с матированной поверхностью из тр. Чукукская (см. рис. 1, *b*) Алакит-Мархинского кимберлитового поля ЯАП.

© Хмельков А. М., Чугуевская Э. А., 2025
© Khmelkov A. M., Chuguevskaya E. A., 2025

Соответственно, ко вторично целым зёрнам следует относить зёрна, поверхность которых ограничена исключительно поверхностями вторичного происхождения. Это или интенсивно изношенные зёрна с механогенной (истёртой) поверхностью, примером которых может служить предельно изношенное зерно пикроильменита из аллювия р. Хастах севера ЯАП (см. рис. 1, *c*), или зёрна, сплошь ограниченные поверхностями химического растворения, как, например, кубоиды из древней россыпи Дьюкунах (см. рис. 1, *d*). По вторично целым зёрнам, за редким исключением, невозможно определить, за счёт первично целых или колотых зёрен сформировалась данная морфологическая разновидность МИК, которая по внешнему виду представляет собой вполне цельные зёрна без каких-либо видимых следов сколов.

Первичная и вторичная трещиноватость

В связи с тем, что растрескивание глубинных минералов является довольно распространённым процессом и реализуется в широком диапазоне обстановок при различных физико-химических условиях, среди МИК различаются зёрна с первичной и вторичной трещиноватостью. Первичная трещиноватость на МИК (см. рис. 1, *b*) образуется в эндогенных условиях непосредственно в процессе становления кимберлитовых тел в результате декомпрессии и взаимодействия зёрен минералов с кимберлитовым расплавом. Вторичная трещиноватость на МИК возникает преимущественно в экзогенных условиях и может осуществляться практически во всём спектре обстановок: в условиях диагенеза, гипергенеза, метагенеза и метасоматоза. Следует отметить, что растрескивание зёрен МИК достаточно широко может проявляться и в постмагматическую стадию непосредственно в кимберлитах под воздействием гидротермальных растворов. В этом случае образующаяся трещиноватость практически ничем не будет отличаться от вторичной трещиноватости.

Первично и вторично колотые зёрна

Как следствие, первично колотые зёрна возникают за счёт дезинтеграции первично (эндогенно) трещиноватых зёрен (см. рис. 1, *e*) и поэтому в отличие от целых зёрен характеризуются одновременно и первичной округлостью, и наличием резких перегибов (рёбер). Кроме этого, для первично колотых зёрен характерно наличие двух (редко более) типов первичных поверхностей: с более грубым микрорельефом на основном зерне и более «тонкой» первичной поверхностью на сколах, разделённых ясно выраженным угловатым перегибом, отражающим границу первичного (эндогенного) скола. Чаще всего на первичном сколе наблюдается матированная поверхность, реже – шероховатая, в то время как округлая протомагматическая поверхность выражена более грубо и имеет шероховатый или бугорчатый микрорельеф, соответственно. К примеру, на рис. 1, *e* представлено зерно пикроильменита из ореола участка Бобико (Гвинея), на первичном сколе которого хорошо видна матированная поверхность, тогда как первичная протомагматическая поверхность – грубошероховатая. Это свидетельствует о том, что зерно, находясь в эндогенных условиях, было расколото или надтреснуто, а продолжающееся действие расплава привело к возникновению на сколе матовой поверхности.

Вторично колотые зёрна (см. рис. 1, *f*) диагностируются без особых затруднений. Вторичные сколы имеют, как правило, сильный блеск: на зёрнах граната, оливина и хромдиопсида он стеклянный, на пикроильмените – металлический. Происхождение вторично колотых зёрен связано с процессами физического и химического выветривания. Так, вторично колотые зёрна МИК широко распространены в элювии кимберлита. Непосредственно в кимберлитах вторичная колотость может быть также связана с постмагматическим этапом становления кимберлитовых тел.

По мнению отдельных исследователей [5], основная масса МИК колется непосредственно в кимберлите, а вклад последующего дробления в общий объём экзогенных изменений минералов невелик, с чем трудно согласиться. Как уже отмечалось, процесс растрескивания минералов и образование колотых зёрен может осуществляться в широком диапазоне обстановок. Например, в условиях гипергенеза, в том числе непосредственно в промежуточном коллекторе, а также в условиях метагене-

© Хмельков А. М., Чугуевская Э. А., 2025
© Khmelkov A. M., Chuguevskaya E. A., 2025

РУДЫ и МЕТАЛЛЫ
Руды и металлы № 1/2025, с. 40–56 / Ores and metals № 1/2025, p. 40–56
DOI: 10.47765/0869-5997-2025-10003

за при формировании складчатости и в зоне метасоматоза при воздействии на осадочный коллектор траппов. Не вызывает сомнения и тот факт, что определённая часть зёрен МИК колется в процессе их транспортировки в водной среде, что подтверждается отчётными данными Л. А. Зимина (А. А. Панкратов, Л. А. Зимин, 1973), изучавшего МИК из целого ряда кимберлитовых тел и связанных с ними ореолов Далдыно-Алакитского алмазоносного района ЯАП. Из этих данных следует, что если непосредственно в трубках содержание целых зёрен пиропа и пикроильменита достигает 40–50 %, то в русловом аллювии ближайших водотоков количество колотых зёрен почти всегда приближается к 100 %. Образующиеся при этом сколы по своей сути являются вторичными. Хотя, ради справедливости, следует отметить, что в отдельных случаях и непосредственно в кимберлитовых телах содержание колотых зёрен также может достигать 80–90 %. Кроме этого, опыт собственных наблюдений показывает, что на перекатах резко возрастает количество угловатых осколков зёрен по сравнению со спокойными участками русла реки и уловами. В качестве показательного примера, свидетельствующего в пользу интенсивного раскалывания МИК в процессе их транспортировки в водной среде, свидетельствует зерно граната из аллювия р. Тюнгкян (Муно-Тюнгский алмазоносный район, ЯАП), показанное на рис. 2. Из данного рисунка хорошо видно, что зерно сильно обколото, и, если бы не сохранившийся небольшой фрагмент истёртой поверхности, его можно было отнести к совершенно неизношенному зерну. Однако сохранившийся небольшой участочек с истёртой механогенной поверхностью наглядно демонстрирует, что колотость данного граната является результатом механического воздействия на существенно изношенное зерно в процессе его транспортировки в аллювии.



Рис. 2. Интенсивно колотое зерно граната с сохранившимся участком изношенной поверхности (р. Тюнгкян, Муно-Тюнгский алмазоносный район)

Fig. 2. Intensely broken garnet grain with a preserved portion of the worn surface (Tyungkyan River, Muna-Tyung diamondiferous area)

Поверхности на кимберлитовых минералах по генезису образования

По генезису все поверхности на кимберлитовых минералах подразделяются на первичные и вторичные по отношению к процессам ореолообразования. К первичным традиционно относятся эндогенные (магматогенные) поверхности на минералах, сформировавшиеся в результате реакции зёрен с кимберлитовым расплавом, а также поверхности, образованные в гидротермальную стадию становления кимберлитовых тел.

Облик минералов, сформированный после становления кимберлитовых тел, по своей сути является вторичным применительно к шлиховым механическим ореолам рассеяния. Таким образом, вторичная поверхность – это микрорельеф, сформировавшийся на МИК под воздействием экзогенных факторов: в условиях гипергенеза, диагенеза, метагенеза или метасоматоза. Как результат, облик МИК, сформировавшийся в экзогенных условиях, независимо от местонахождения данных минералов, будь то непосредственно кимберлитовое тело или осадочный коллектор, несвойственен облику минералов из коренного источника как итогу глубинного этапа морфогенеза.

Некоторые поверхности на МИК обладают конвергентным характером и, таким образом, могут иметь как первичный, так и вторичный генезис, в зависимости от обстановок, в которых происходило их формирование. Ниже кратко приведена характеристика наиболее распространённых типов поверхностей,

© Хмельков А. М., Чугуевская Э. А., 2025
© Khmelkov A. M., Chuguevskaya E. A., 2025

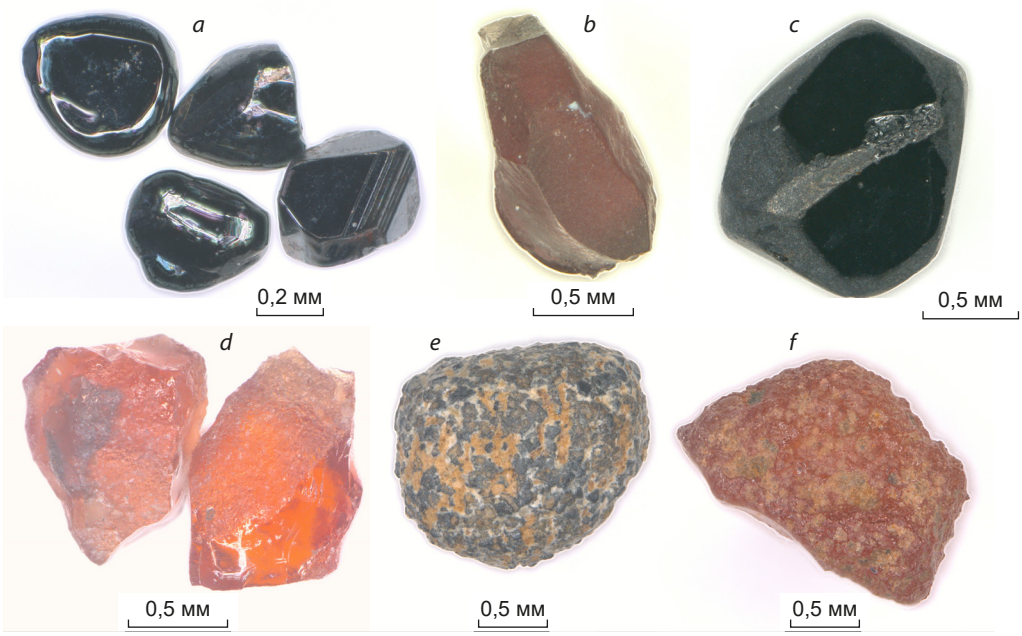

Рис. 3. Внешний вид наиболее распространённых первичных поверхностей на примере зёрен хромшпинелида (*a, c*), граната (*b, d, f*) и пикроильменита (*e*):
a – зеркальная (тр. Деймос, Верхне-Мунское поле); *b* – матированная (тр. Комсомольская-Магнитная, Верхне-Мунское поле); *c* – зеркальных граней, матированных рёбер (тр. Заполярная, Верхне-Мунское поле); *d* – шероховатая (тр. Гриба, Архангельская алмазоносная провинция); *e* – бугорчатая (тр. 76/90, Толуопское кимберлитовое поле); *f* – ямчатая (тр. Хоркич, Тайгикун-Нембинское кимберлитовое поле, Эвенкия)

Fig. 3. Appearance of the most common primary surfaces, exemplified by the chromespinelide (*a, c*), garnet (*b, d, f*) and picroilmenite (*e*) grains:
a – mirror (Deimos pipe, Upper-Muna field); *b* – matted (Komsomolskaya-Magnitnaya pipe, Upper-Muna field); *c* – mirror faces with matted ribs (Zapolyarnaya pipe, Upper-Muna field); *d* – rough (Grib pipe, Arkhangelsk diamondiferous province); *e* – tuberous (Pipe 76/90, Toluop kimberlite field); *f* – pitted (Horkich pipe, Taigikun-Nemba kimberlite field, Evenkia)

названия которых соответствует терминологии, изначально предложенной Л. А. Зиминым (А. А. Панкратов, Л. А. Зимин, 1973).

Зеркальная поверхность – гладкая, блестящая поверхность, встречается достаточно редко и обычно бывает распространена на гранях хромшпинелида (рис. 3, *a*). Имеет первичный генезис.

Матированная поверхность – тусклая поверхность, может покрывать как весь минерал, так и часть поверхности зерна, ограниченную сколами (см. рис. 3, *b*; рис. 1, *b*). Часто наблюдается на первичных (эндогенных) сколах (см. рис. 1, *e*). Поверхность первичная (не исключается возможность её формирования в постмагматическую стадию под воздействием гидротермальных растворов).

Зеркальных граней, матированных рёбер – поверхность характерна исключительно для зёрен хромшпинелида, встречается довольно часто и характеризуется наличием матированной поверхности (как правило, тонкоматированной), развитой по рёбрам кристаллов и частично заходящей на грани (см. рис. 3, *c*). Первичный генезис.

Шероховатая поверхность состоит из множества тесно прикасающихся основаниями бугорков неправильной формы. По внешнему виду напоминает поверхность наждачной бумаги (см. рис. 3, *d*; рис. 1, *a*). В зависимости от размера микроформ может подразделяться на грубошероховатую и тонкошероховатую поверхности. В наиболее типичном виде характерна для зёрен пикроильменита, однако встре-

© Хмельков А. М., Чугуевская Э. А., 2025
© Khmelkov A. M., Chuguevskaya E. A., 2025

Руды и металлы № 1/2025, с. 40–56 / Ores and metals № 1/2025, p. 40–56
DOI: 10.47765/0869-5997-2025-10003

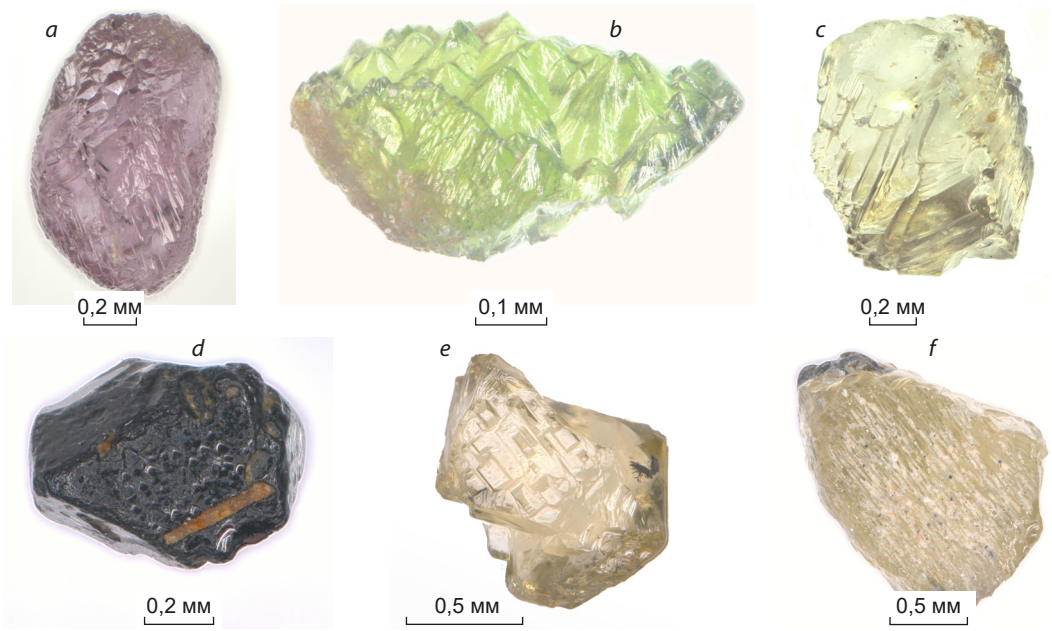

Рис. 4. Внешний вид наиболее распространённых поверхностей конвергентного характера на примере зёрен граната (*a*), хромдиопсида (*b*), оливина (*c, e, f*) и хромшпинелида (*d*):
тетрагональных пирамид: *a* – вторичная (бедошеминский коллектор, Эвенкия), *b* – первичная (тр. Мэри, Молодинское кимберлитовое поле); черепитчатая: *c* – первичная (тр. Дьянга, Бенчимэ-Куойкское кимберлитовое поле), *d* – вторичная (р. Алымджа, Моркокинский алмазоносный район); ступенчатая: *e* – первичная (тр. Заполярная, Верхне-Мунское поле); занозистая: *f* – первичная (тр. Новинка, Верхне-Мунское поле)

Fig. 4. Appearance of the most common convergent-style surfaces, exemplified by the garnet (*a*), chromdiopside (*b*), olivine (*c, e, f*), and chromespinelide (*d*) grains:
tetragonal pyramidal: *a* – secondary (Bedosheminian collector, Evenkia) and *b* – primary (Mary pipe, Molodinskoe kimberlite field); tiled: *c* – primary (Dyanga pipe, Benchime-Kuoik kimberlite field) and *d* – secondary (Alymdzha River, Morkoka diamondiferous area); stepped: *e* – primary (Zapolyarnaya pipe, Upper-Muna field); splintery: *f* – primary (Novinka pipe, Upper-Muna field)

чается и на других МИК. Первичная (магматогенная).

Бугорчатая поверхность (см. рис. 3, *e*) характеризуется наличием на зёрнах изолированных бугорков, иногда в виде «шипов» с острыми или притупленными вершинами (шиповидная поверхность типа «ёжики»), иногда в виде хорошо выраженных полигональных пирамидок (микропирамидальная поверхность). Бугорчатая поверхность наиболее характерна для пиропа и пикроильменита, на хромите встречается крайне редко. Типичная бугорчатая поверхность отличается от шероховатой более крупными размерами микроформ. Первичная.

Ямчатая поверхность характеризуется наличием изолированно расположенных ямок, которые могут иметь различные форму и размеры. Присуща как пиропу, так и пикроильмениту. Может иметь как первичный (см. рис. 3, *f*), так и вторичный генезис.

Поверхность тетрагональных пирамид представляет собой сочетание хорошо выраженных пирамидок, соприкасающихся основаниями. Наибольшим распространением пользуется на зёрнах оливина, характерна также для граната (рис. 4, *a*) и хромдиопсида (см. рис. 4, *b*). Имеет конвергентный характер: на оливине и хромдиопсиде, как правило, первичная (гидротермальная), на гранате – чаще вторичная (эпигенетическая).

Черепитчатая поверхность характеризуется наличием ориентированных в одном направлении вершинами плоских геометриче-

© Хмельков А. М., Чугуевская Э. А., 2025
© Khmelkov A. M., Chuguevskaya E. A., 2025

ски правильных треугольников, часто плотно соприкасающихся друг с другом. Присуща обычно пиропу и оливину (см. рис. 4, *c*), реже отмечается на хромдиопсиде. Данная поверхность также имеет конвергентный характер и может быть как первичной, образующейся непосредственно в кимберлите в постмагматическую стадию (обычно на оливине), так и вторичной (преимущественно на гранате), формирующейся под воздействием интрузий траппов или в условиях метагенеза (эпигенеза) [11]. Непосредственно в кимберлитовых телах на пиропах встречается достаточно редко, в то же время имеет широкое распространение на зёрнах граната из осадочных коллекторов, подвергнутых складчатости или воздействию трапповых интрузий. Данная поверхность, помимо силикатов, может образовываться в том числе и на оксидах, в частности на пикроильмените [10] и хромшпинелиде (см. рис. 4, *d*).

Ступенчатая поверхность напоминает ступеньки лестницы или разрушенную, сдвинутую с места поленницу дров (см. рис. 4, *e*). По аналогии с черепитчатой поверхностью имеет конвергентный характер и может реализоваться в широком диапазоне обстановок. Является типичной для оливина, на котором, как правило, имеет первичный генезис. Реже отмечается на зёрнах граната, на которых преимущественно вторичная.

Занозистая поверхность представляет собой сочетание узких, имеющих острые окончания, тесно прилегающих друг к другу и параллельно ориентированных плоских граней и впадин (см. рис. 4, *f*). Иногда называется игольчатой. Встречается редко, образуется по зёрнам оливина и граната. Обычно имеет гидротермальный генезис и может образовываться непосредственно в кимберлите, особенно по оливину. Не исключена возможность образования данной поверхности по зёрнам граната в результате растворения в условиях метасоматоза и метагенеза [9].

Все отмеченные выше поверхности конвергентного характера (тетрагональных пирамид, черепитчатая, ступенчатая, занозистая) хотя и образуются в разных обстановках, но в схожих физико-химических условиях под воздействием практически одинаковых агентов растворения – термальных минерализованных растворов. В этой связи все данные поверхности объединены в один морфогенетический тип под общим названием – пирамидально-черепитчатый тип растворения [9, 10]. При этом важно отметить, что, несмотря на формирование всего многообразия поверхностей данного типа растворения в различных экзогенных обстановках, в том числе в условиях метасоматоза и метагенеза [11], пирамидально-черепитчатый тип растворения никогда не образуется в условиях гипергенеза. Поэтому в морфогенетическом плане поверхности пирамидально-черепитчатого типа растворения не имеют ничего общего с процессами корообразования. Различия в элементах микрорельефа, формирующегося при пирамидально-черепитчатом типе растворения, обусловлены кристаллографической ориентировкой растворяемого участка, а интенсивность растворения и выраженность микроформ рельефа зависят от агрессивности среды, температуры и, в меньшей степени, от давления и времени воздействия агентов растворения на минерал [10]. Как результат, пирамидально-черепитчатый тип растворения бывает достаточно разнообразным, как по топографии поверхностей, так и по интенсивности растворения (рис. 5). Нередко на одном зерне минерала могут присутствовать сразу несколько видов поверхностей пирамидально-черепитчатого типа растворения. Например, поверхность тетрагональных пирамид в комбинации с черепитчатой (см. рис. 5, *a*–*d*) или черепитчатая поверхность в комбинации с занозистой и т. д.

Судя по форме зерна граната на рис. 5, *b*, пирамидально-черепитчатый рельеф растворения развился по предельно изношенному в прибрежно-морских условиях минералу. В то же время угловатая форма граната на рис. 5, *d, e* говорит о том, что пирамидально-черепитчатому типу растворения подверглись зёрна с континентальным износом. Весьма необычно выглядит зерно граната-кубоида с пирамидально-черепитчатым типом растворения на рис. 5, *c*. Для кубоидов обычно характер-

© Хмельков А. М., Чугуевская Э. А., 2025
© Khmelkov A. M., Chuguevskaya E. A., 2025

РУДЫ и МЕТАЛЛЫ
Руды и металлы № 1/2025, с. 40–56 / Ores and metals № 1/2025, p. 40–56
DOI: 10.47765/0869-5997-2025-10003

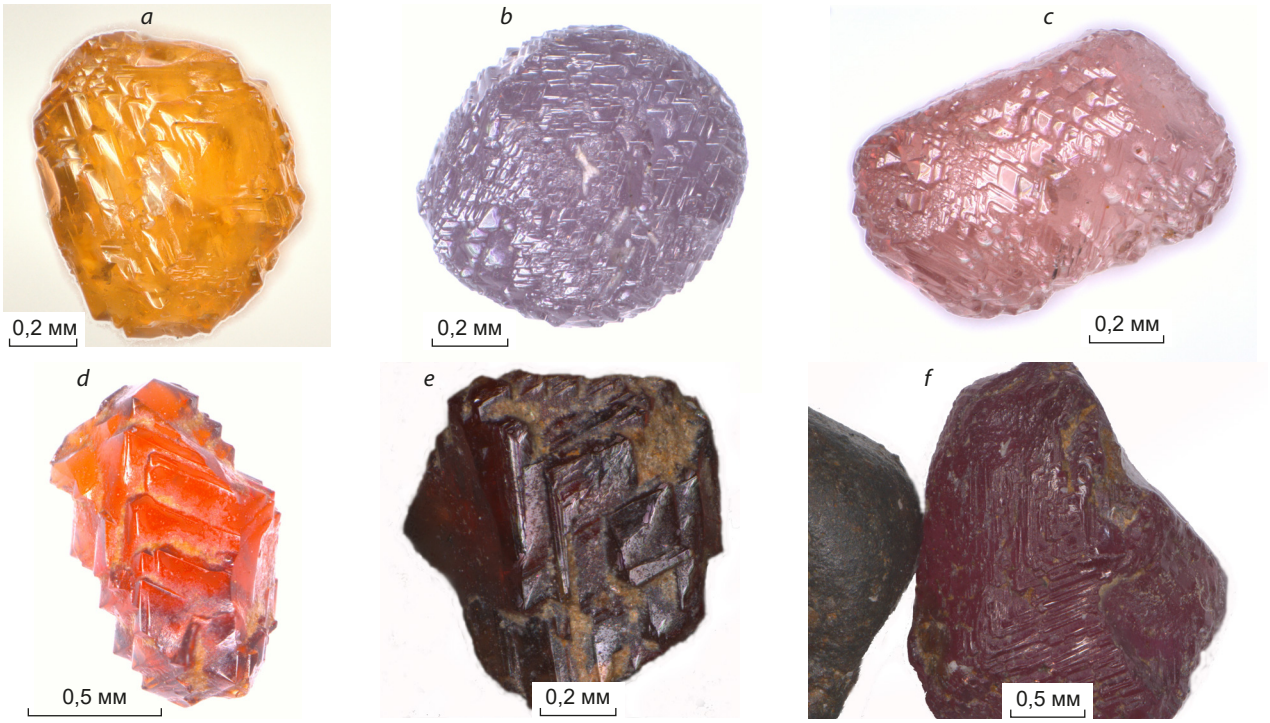

Рис. 5. Вариации пирамидально-черепитчатого типа растворения на гранате из различных обстановок:
a–c – условия метасоматоза (бедошеминский коллектор, Эвенкия); *d* – условия метасоматоза (бассейн р. Нижняя Томба); *e, f* – условия метагенеза (карнийский коллектор, Лено-Оленёкское междуречье)

Fig. 5. Varieties of the pyramidal-tiled type of the dissolution on garnets from different settings:
a–c – metasomatism conditions (Bedosheminian collector, Evenkia); *d* – metasomatism conditions (Nizhnyaya Tomba River basin); *e, f* – metagenesis conditions (Carnian collector, Lena-Olenek interfluve)

на каплевидная поверхность. Кубоидный и пирамидально-черепитчатый типы растворения реализуются при совершенно разных физико-химических условиях, под воздействием различных агентов растворения. Кубоидный тип коррозии формируется в коре выветривания, где агентами растворения являются органические кислоты [7]. При пирамидально-черепитчатом типе коррозии агентами растворения выступают минерализованные растворы, и реализуется он в более широком диапазоне обстановок. Такая необычная комбинация в виде крайней формы растворения граната в гипергенных условиях в сочетании с пирамидально-черепитчатым типом растворения свидетельствует о том, что вначале зерно было интенсивно растворено в коре выветривания и только после этого оно было подвергнуто коррозии в условиях эпигенеза. Причём эти два этапа растворения были разобщены во времени, учитывая геолого-поисковую обстановку конкретных территорий.

Все отмеченные выше поверхности пирамидально-черепитчатого типа растворения благодаря своим специфическим микроформам и рельефности, как правило, хорошо выражены, в связи с чем легко диагностируются.

Каплевидная поверхность состоит из множества похожих на капли бугорков (рис. 6, *a*). Иногда каплевидные бугорки бывают одиночными или образуют скопления, могут быть достаточно крупными или в виде «тонкого», едва различимого в бинокуляр микрорельефа. Нередко бугорки бывают наклонены и ориентированы в одном направлении, в результате чего могут напоминать черепитчатую скульптуру. Каплевидная поверхность характерна для граната, особенно часто встре-

© Хмельков А. М., Чугуевская Э. А., 2025
© Khmelkov A. M., Chuguevskaya E. A., 2025

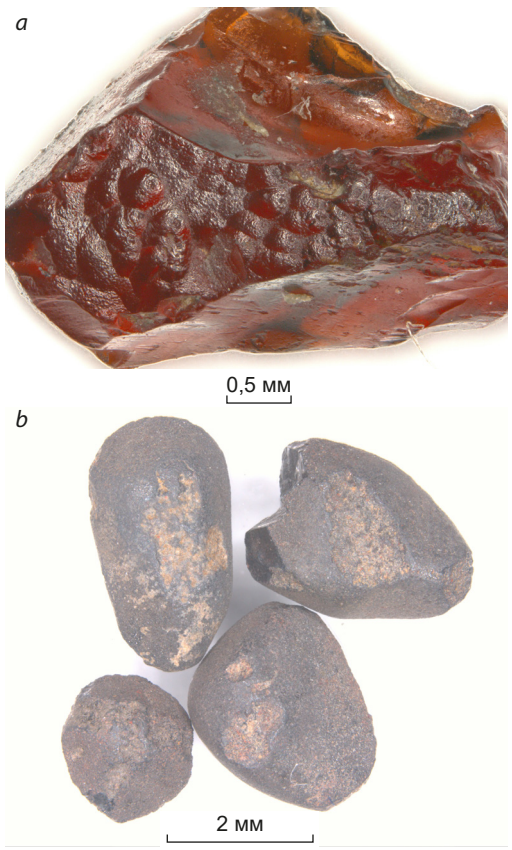

Рис. 6. Внешний вид наиболее распространённых вторичных поверхностей на примере зёрен граната (*a*) и пикроильменита (*b*):

a – двойная каплевидная поверхность (бассейн р. Тюнг, Муно-Тюнгский алмазоносный район); *b* – корродированная поверхность (тр. Мир, Мирнинское кимберлитовое поле)

Fig. 6. Appearance of the most common secondary surfaces, exemplified by the garnet (*a*) and picroilmenite (*b*) grains:

a – binary drop-shaped surface (Tyung River basin, Muna-Tyung diamondiferous area); *b* – corroded surface (Mir pipe, Mirny kimberlite field)

чается на зёрнах-кубоидах, представляющих собой крайнюю форму растворения минерала [4, 7].

Из рис. 6, *a* хорошо видно, что грубая каплевидная поверхность на зерне граната из аллювия одного из водотоков в бассейне р. Тюнг осложнена более мелкими каплями-бугорками. По своей сути сформировавшийся на гранате микрорельеф представляет собой двойную каплевидную поверхность, что отмечается впервые. Это свидетельствует о том, что на одном минерале отразились сразу две эпохи корообразования, разобщённые во времени. При этом на первом этапе гипергенеза условия были достаточно агрессивными, в результате чего зерно граната подверглось более интенсивному растворению с формированием крупного каплевидного рельефа. Второй этап гипергенного растворения был более щадящим, в результате чего сформировался более «тонкий» каплевидный микрорельеф, который наложился на более раннюю каплевидную поверхность. Учитывая то, что по геологическим данным для ЯАП наиболее интенсивный латеритный характер корообразования достоверно связывается со среднепалеозойским временем (D_3–C_1), можно с большой долей уверенности утверждать, что, во-первых, коренным источником граната с каплевидной гипергенной поверхностью в бассейне р. Тюнг являлись кимберлиты не мезозойского, а позднедевонского возраста. Во-вторых, изначально зерно граната подверглось гипергенному растворению именно в среднепалеозойское время. Второй этап гипергенеза, в меньшей степени отразившийся на гранате, мог быть связан с ранним триасом, хотя сама возможность существования в пределах ЯАП латеритной коры выветривания мезозойского возраста некоторыми исследователями до последнего времени ставилась под сомнение в связи с отсутствием известных фактов проявления на кимберлитовых минералах двух периодов гипергенеза [3]. Тем не менее в северной части ЯАП закартированы реликты достаточно зрелой коры выветривания латеритного типа индского времени, представленные охристыми монтмориллонит-каолинитовыми красочными глинами [12]. К отдельным участкам этой коры выветривания даже приурочены месторождения минеральных красок. Особо отметим, что каплевидная поверхность всегда имеет вторичное происхождение и образуется только в гипергенных условиях (кубоидный тип растворения).

Корродированная поверхность представляет собой сочетание неправильных, глубоко проникающих в зерно каверн разъедания (см. рис. 6, *b*). Отдельные каверны, сливаясь меж-

© Хмельков А. М., Чугуевская Э. А., 2025
© Khmelkov A. M., Chuguevskaya E. A., 2025

РУДЫ и МЕТАЛЛЫ
Руды и металлы № 1/2025, с. 40–56 / Ores and metals № 1/2025, p. 40–56
DOI: 10.47765/0869-5997-2025-10003

ду собой, могут образовывать подобие рвов. По внешнему виду такие зёрна напоминают губчатую поверхность. Данная поверхность характерна преимущественно для граната, на зёрнах пикроильменита встречается реже и выражена гораздо слабее. Чаще коррозионный рельеф на зёрнах пикроильменита весьма тонкий, заметить который можно лишь по суммарному отблеску от поверхности растворения, что является отличительной особенностью любого химического растворения от магматогенных поверхностей. Корродированная поверхность на МИК имеет вторичное происхождение и, как правило, связывается с коробразовательными процессами. Однако стоит заметить, что пикроильменит, в отличие от граната, неохотно растворяется в гипергенных условиях. Более охотно пикроильменит подвергается вторичным изменениям в условиях метасоматоза и метагенеза, причём нередко сильнее, чем гранат [11]. Поэтому зачастую принимаемые за гипергенную коррозию вторичные изменения на пикроильмените на самом деле связаны именно с процессами метасоматоза или метагенеза. В этой связи не исключено, что и наблюдаемая на зёрнах пикроильменита из верхней части тр. Мир корродированная поверхность (см. рис. 6, *b*) имеет не гипергенное, а метасоматическое происхождение, образование которой обусловлено воздействием трапповых интрузий. При более значительном увеличении в углублениях зёрен пикроильменита можно хорошо различить светло-коричневатое лейкоксен-анатазовое вещество (см. рис. 6, *b*). В гипергенных условиях если и происходит лейкоксенизация пикроильменита, то по несколько иной схеме и значительного отрицательного рельефа растворения при этом не возникает [9].

Следует добавить, что на МИК одновременно могут присутствовать разные типы эпигенетических поверхностей различного генезиса, образованные в совершенно различных физико-химических условиях. В качестве примера можно привести зёрна граната-кубоида из древней россыпи Дьюкунах, изображенные на рис. 1, *d*, или кубоид граната из бедошеминского промежуточного коллектора на рис. 5, *c*. Все эти зёрна-кубоиды представляют собой крайнюю форму растворения в гипергенных условиях, но позже подверглись ещё и пирамидально-черепитчатому типу растворения, который не имеет ничего общего с процессами гипергенеза. Пирамидально-черепитчатый тип растворения на зёрнах граната как из россыпи Дьюкунах ЯАП, так и из бедошеминского коллектора Эвенкии возник в условиях метасоматоза в результате воздействия траповых интрузий на осадочный коллектор, куда уже растворённые до кубоидов зёрна граната были переотложены [7]. В любом случае наличие на зёрнах МИК поверхностей различного генезиса однозначно будет свидетельствовать о сложной экзогенной эволюции минерального вещества.

Форма зёрен МИК

Форма зёрен (рис. 7) является важной морфологической особенностью, широко используемой в практике алмазопоисковых работ при сравнении и идентификации поисковых объектов. По форме зёрен все МИК подразделяются на четыре основные группы: округлая (см. рис. 7, *a*), угловато-округлая (см. рис. 7, *b*), угловатая (см. рис. 1, *f*) и остроугольная (см. рис. 7, *c*). Для пикроильменитов помимо данных основных форм учитывается также наличие гексагональных зёрен (гексагональных табличек) (см. рис. 7, *d*) и зёрен лепёшковидной формы (см. рис. 7, *e*). В отличие от более изометричной округлой формы, зёрна пикроильменита лепёшковидной формы имеют уплощение по одной из осей.

Среди зёрен граната дополнительно выделяются кубоиды (см. рис. 1, *d*; рис. 5, *c*), а также зёрна с кристаллографической огранкой, которые встречаются крайне редко как непосредственно в кимберлитовых телах (см. рис. 7, *f*), так и в ореолах рассеяния. При этом кубоидную форму граната не следует путать с кристаллографической огранкой, так как последняя является формой идиоморфного роста минерала, а кубоиды являются крайней формой химического растворения. Среди зёрен оливина дополнительно выделяются идиоморфные кристаллы с характерным дипирамидально-призматическим габитусом [6], которые кристаллизуются непосредственно из кимберлитового расплава (оливин II генера-

© Хмельков А. М., Чугуевская Э. А., 2025
© Khmelkov A. M., Chuguevskaya E. A., 2025

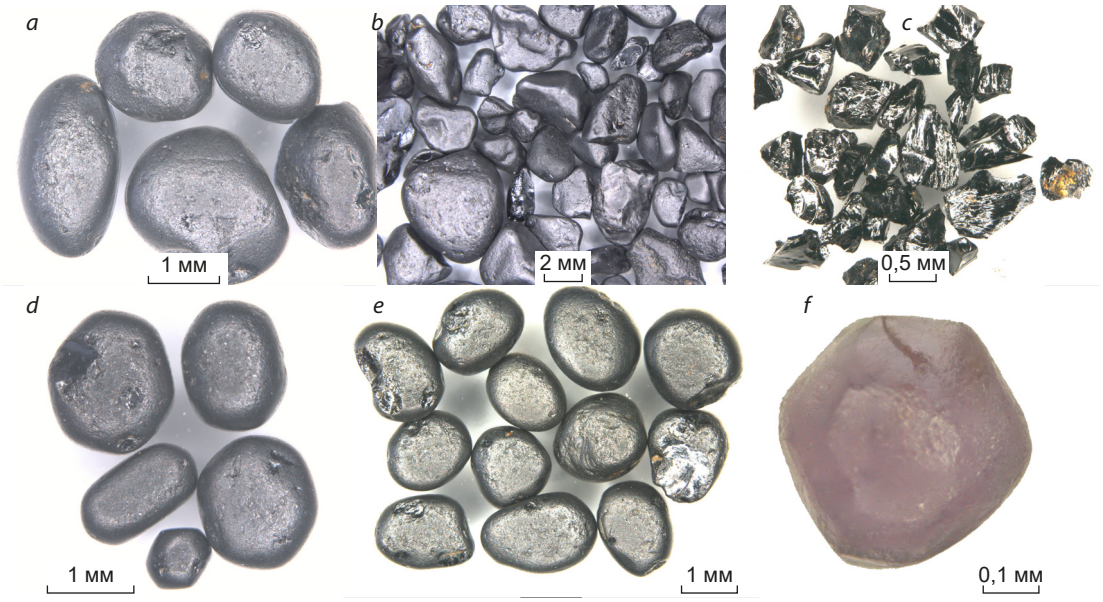

Рис. 7. Форма зёрен кимберлитовых минералов на примере пикроильменита (*a*–*e*) и граната (*f*):
a – округлая (р. Тюнг, Муно-Тюнгский алмазоносный район); *b* – угловато-округлая (р. Улахан-Талахтах, Приморский алмазоносный район); *c* – остроугольная (бассейн р. Моркока, Моркокинский алмазоносный район); *d* – гексагональная (р. Линдекит, Приленский алмазоносный район); *e* – лепёшковидная (р. Улахан-Далдын, Муно-Тюнгский алмазоносный район); *f* – кристаллографическая (тр. Поисковая, Верхне-Мунское поле)

Fig. 7. Grain shape of kimberlite minerals, exemplified by picroilmenite (*a*–*e*) and garnet (f):
a – rounded (Tyung River, Muna-Tyung diamondiferous area); *b* – angular-round (Ulakhan-Talakhtakh river basin, Primorsky diamondiferous area); *c* – acute-angled (Morkoka River basin, Morkoka diamondiferous district); *d* – hexagonal (Lindekit River, Prilensky diamondiferous area); *e* – pancake-shaped (Ulakhan-Daldyn river basin, Muna-Tyung diamondiferous area); *f* – crystallographic (Poiskovaya pipe, Upper-Muna field)

ции). Среди кристаллов хромшпинелида помимо округлой, угловатой и остроугольной форм традиционно выделяются октаэдры (рис. 8, *a*), октаэдры с вициналями (см. рис. 8, *b*), сростки октаэдров (см. рис. 8, *c*) и мириоэдрические кристаллы (см. рис. 8, *d*).

Под изменёнными зёрнами МИК, выделяемыми в качестве самостоятельной морфологической особенности, характеризующей внешний вид минералов, понимается наличие характерной белёсой поверхности («выцветов»), обусловленной развитием густой микроскопической трещиноватости. Изменённые зёрна наиболее характерны для граната, встречаются также среди зёрен оливина и хромдиопсида. Изменённые разности обычно отмечаются среди зёрен пиропа из коры выветривания, а также характерны для граната из зоны метасоматоза [7], видоизменение которых связано с воздействием трапповых интрузий (рис. 9, *a*). Изменение МИК может осуществляться и непосредственно в кимберлитовых трубках под воздействием гидротермальных растворов (см. рис. 9, *b*).

Внутреннее строение зёрен

Внутреннее строение зёрен является важной типоморфной особенностью МИК. При этом агрегативность зёрен характерна исключительно для пикроильменита и по своему генезису она может быть как первичной, так и вторичной. В целом по внутреннему строению зёрна пикроильменита можно разделить на три основные группы: монокристаллические зёрна с плоскораковистым изломом (рис. 10, *a*); поликристаллические, или агрегатные, с зернистым изломом (см. рис. 10, *b*); зёрна пикроильменита слоистого строения (см. рис. 10, *c*).

Слоистые зёрна пикроильменита встречаются крайне редко. Слоистость в пикроильмените из кимберлитов обусловлена широким

© Хмельков А. М., Чугуевская Э. А., 2025
© Khmelkov A. M., Chuguevskaya E. A., 2025

Руды и металлы № 1/2025, с. 40–56 / Ores and metals № 1/2025, p. 40–56
DOI: 10.47765/0869-5997-2025-10003

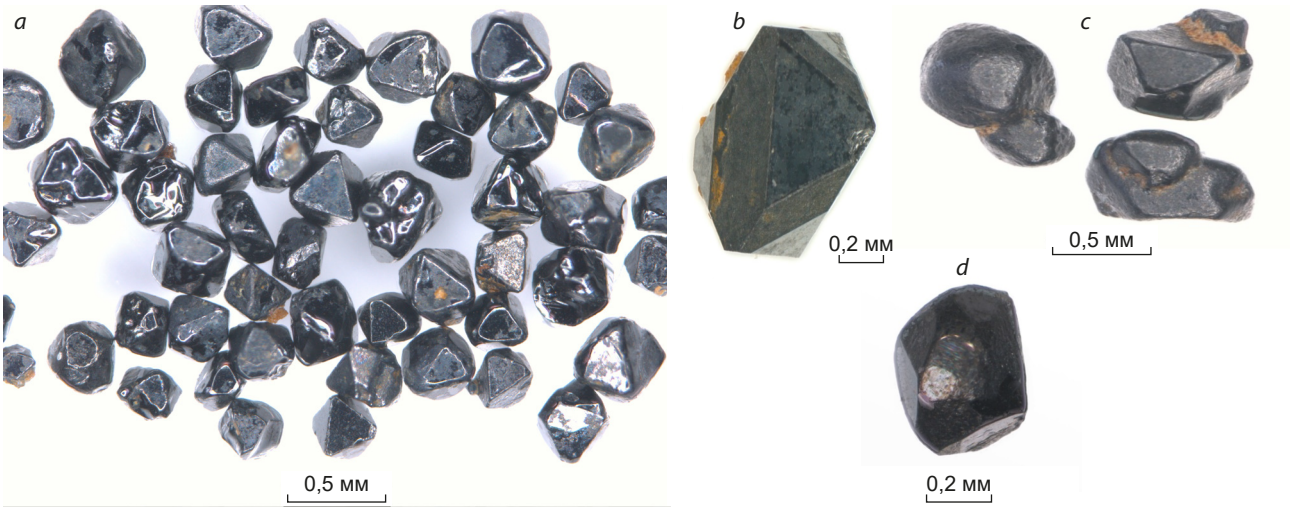

Рис. 8. Форма зёрен хромшпинелида:
a – октаэдры (р. Бур, Нижнеоленекский алмазоносный район); *b* – октаэдр с вициналями (тр. Поисковая, Верхне-Мунское поле); *c* – сростки октаэдров (р. Чимидикян, Муно-Тюнгский алмазоносный район); *d* – мириоэдрический кристалл (тр. Деймос, Верхне-Мунское поле)

Fig. 8. Grain shape of chromespinelide:
a – octahedrons (Bur River, Lower-Olenek diamondiferous area); *b* – octahedron with vicinals (Poiskovaya pipe, Upper-Muna field); *c* – octahedron intergrowths (Chimidikyan River, Muna-Tyung diamondiferous area); *d* – myriohedral crystal (Deimos pipe, Upper-Muna field)

развитием структур распада твёрдого раствора, в процессе которого происходит развитие ламелеобразных удлинённых микровыделений иного состава (титаномагнетит, хромшпинель, ульвошпинель и др.), ориентированных по пинакоиду [9].

Основное количество пикроильменита как в кимберлитовых телах, так и в ореолах рассеяния составляют всё же зёрна монокристаллического строения с плоскораковистым изломом. Пикроильменит агрегатного строения имеет резко подчинённое значение. Агрегатные зёрна пикроильменита встречаются совместно с монокристаллами во многих кимберлитовых телах ЯАП. В отдельных трубках зёрна агрегатного строения могут даже преобладать над пикроильменитом с плоскораковистым изломом. Примером такого тела является тр. 74/90 Толуопского кимберлитового поля. Иногда в ореолах встречаются зёрна пикроильменита комбинированного внутреннего строения, когда внутренняя часть зерна имеет монокристаллическую структуру, а внешняя зона представлена агрегатным строением (см. рис. 10, *d*).

Происхождение агрегатных зёрен пикроильменита связывается с процессами рекристаллизации деформированных желваков, которая осуществляется непосредственно в кимберлите в магматическую стадию [4]. Однако следует отметить, что агрегативность пикроильменита может являться не только результатом глубинного морфогенеза минерала, но иметь вторичное происхождение и формироваться в экзогенных условиях [9, 10]. В частности, вторичная агрегативность пикроильменита может быть связана с условиями метасоматоза и образовываться непосредственно в промежуточном коллекторе, при воздействии трапповых интрузий на осадки [10]. Кроме этого, вторичная агрегативность зёрен пикроильменита может формироваться в условиях метагенеза (эпигенеза) при формировании складчатости, также непосредственно в

© Хмельков А. М., Чугуевская Э. А., 2025
© Khmelkov A. M., Chuguevskaya E. A., 2025

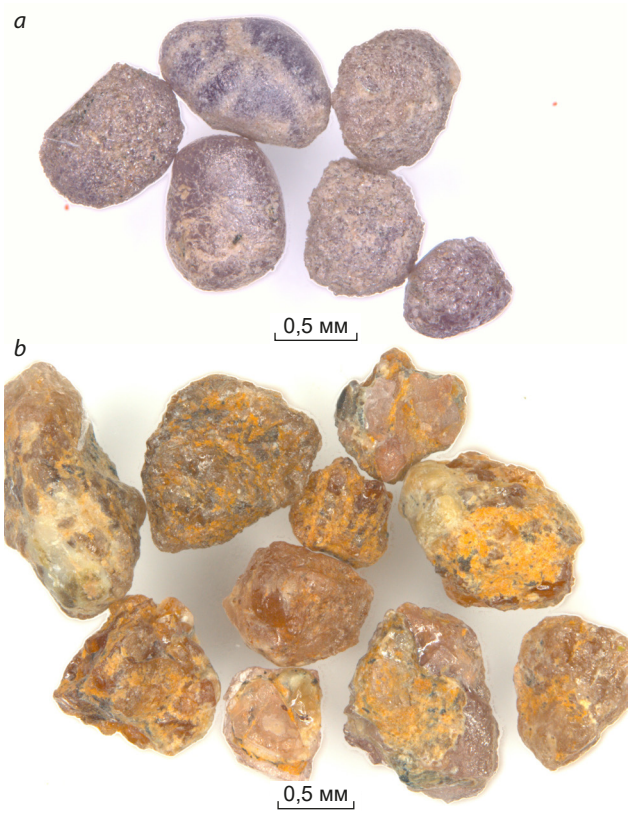

Рис. 9. Внешний вид изменённых зёрен граната:
a – в условиях метасоматоза (россыпь Дьюкунах, Моркокинский алмазоносный район); *b* – в постмагматическую стадию (тр. Заполярная, Верхне-Мунское поле)

Fig. 9. Appearance of altered garnet grains:
a – under conditions of metasomatosis (Dyukunah placer, Morkoka diamondiferous area); *b* – at the post-magmatic stage (Zapolyarnaya pipe, Upper-Muna field)

осадочном коллекторе. Каких-либо различий в составах пикроильменита с первичной и вторичной природой агрегатного строения не отмечено: по составу отдельные блоки как первых, так и вторых практически идентичны между собой. Для агрегатных зёрен пикроильменита из кимберлитовых тел лишь отмечается в отдельных случаях присутствие карбонат-серпентинового вещества между блоками [9]. В то же время между первичной и вторичной агрегативностью существуют некоторые морфологические отличия в строении кристаллов. Так, первичная агрегативность выглядит контрастнее, с ярко выраженными блоками, с чёткими межзерновыми границами и зачастую с тонкой первичной матированной поверхностью, покрывающей поверхности блоков (см. рис. 10, *b*). На зёрнах пикроильменита со вторичной агрегативностью межзерновые границы проявлены нечётко, отдельные блоки просматриваются лишь в краевых частях минерала, в центральной же части зёрен они почти не проявляются. При этом для микроблоков характерен блеск при полном отсутствии каких-либо первичных магматогенных поверхностей (см. рис. 10, *e*). Именно для пикроильменита со вторичной агрегативностью наиболее характерны зёрна комбинированного внутреннего строения [10], когда агрегатное строение присуще лишь для внешней зоны зёрен (см. рис. 10, *d*), причём эта внешняя зона имеет различную мощность в зависимости от интенсивности эпигенетических изменений минерала. Таким образом, простое наличие в шлиховых ореолах неизношенных зёрен пикроильменита агрегатного строения не может являться обязательным признаком наличия расположенных в непосредственной близости коренных источников. В этом случае необходимо более детальное изучение морфологии и состава всей минеральной ассоциации.

Заключение. Приведённые выше основные морфогенетические характеристики кимберлитовых минералов охватывают лишь часть огромного разнообразия их морфологических особенностей.

Физиографические исследования являются основными при изучении МИК из шлиховых ореолов рассеяния в процессе алмазопоисковых работ [3] и при прогнозной оценке территорий на коренную алмазоносность. Знание генезиса особенностей макро- и микроморфологии кимберлитовых минералов позволяет судить о физико-химических условиях их эволюции, что помогает восстановить последовательность этапов морфогенеза всей минеральной ассоциации, определить закономерности эпигенетических изменений МИК в процессе формирования механических ореолов рассеяния и, в конечном итоге, проследить все стадии развития данных ореолов. От-

© Хмельков А. М., Чугуевская Э. А., 2025
© Khmelkov A. M., Chuguevskaya E. A., 2025

Руды и металлы № 1/2025, с. 40–56 / Ores and metals № 1/2025, p. 40–56
DOI: 10.47765/0869-5997-2025-10003

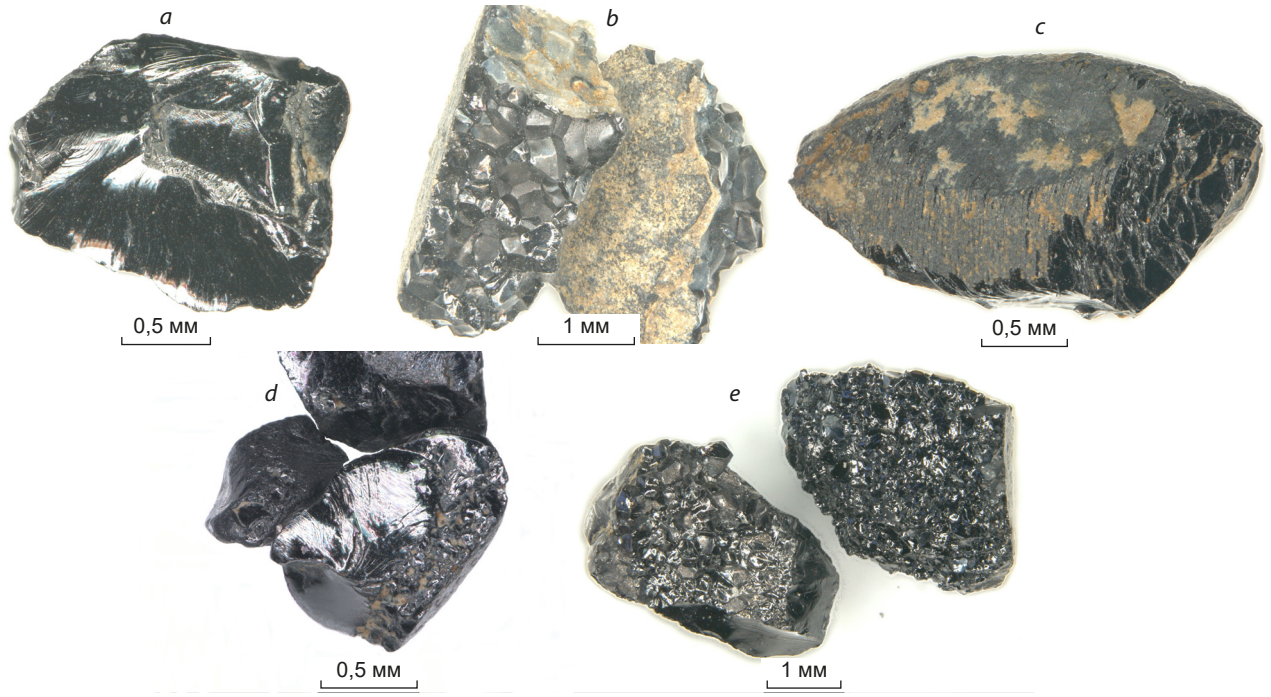

Рис. 10. Зёрна пикроильменита с различным типом внутреннего строения:
a – монокристального строения с раковистым изломом (бассейн р. Тюнг, Муно-Тюнгский алмазоносный район); *b* – агрегатного строения с зернистым изломом (элювий кимберлита, тр. 74/90, Толуопское поле); *c* – слоистого строения (тр. 74/90); *d* – комбинированного строения с монокристаллической внутренней частью и агрегатной внешней зоной (р. Улахан-Талахтах, Приморский алмазоносный район); *e* – с вторичной агрегативностью из зоны метасоматоза (междуречье Марха-Моркока, Далдыно-Алакитский алмазоносный район)

Fig. 10. Picroilmenite grains with various types of the internal structure:
a – monocrystalline structure with a conchoidal fracture (Tyung River basin, Muno-Tyung diamondiferous area); *b* – aggregative structure with a granular fracture (kimberlite eluvium, Pipe 74/90, Toluop field); *c* – laminated structure (Pipe 74/90); *d* – combined structure with a monocrystalline inner portion and an aggregative outer zone (Ulakhan-Talakhtakh river basin, Primorsky diamondiferous area); *e* – with secondary aggregativity, from the metasomatosis zone (Markha-Morkoka interfluve, Daldyn-Alakit diamondiferous area)

дельные морфологические особенности МИК могут служить хронологическим репером, позволяющим установить хронологическую последовательность экзогенных изменений минерального вещества [3].

Приведённые сведения способны оказать помощь специалистам, занятым поисками и прогнозом алмазных месторождений, при решении задач идентификации и локализации шлиховых ореолов.

Список литературы

1. *Афанасьев В. П., Белик Ю. П., Ярош А. А.* О новой морфологической разновидности пикроильменита из алмазоносных россыпей // Минералогический сборник Львов. ун-та. – 1976. – № 30, вып. 1. – С. 73–74.
2. *Афанасьев В. П., Герасимов А. Ю., Бабенко В. В.* Самооогранение пикроильменита в процессе истирания как следствие анизотропии его механических свойств / Минералогическая кристаллография и ее применение в практике геологоразведочных работ. – Киев : Наук. думка. – 1986. – С. 159–163.
3. *Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н.* Минералогические поиски месторождений алмазов: развитие,

© Хмельков А. М., Чугуевская Э. А., 2025
© Khmelkov A. M., Chuguevskaya E. A., 2025

состояние, перспективы / Геология алмазов – настоящее и будущее. – Воронеж, ВГУ, 2005. – С. 1291–1318.

4. *Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Похиленко Н. П.* Морфология и морфогенез индикаторных минералов кимберлитов. – Новосибирск : Филиал «Гео»; Изд-во СО РАН, 2001. – 276 с.
5. *Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Похиленко Н. П.* Поисковая минералогия алмаза / под науч. ред. Н. В. Соболева, С. И. Митюхина. – Новосибирск : Гео, 2010. – 650 с.
6. *Власова Э. А., Хмельков А. М.* Вариации состава оливина из ксенолитов в кимберлитах Якутии // Записки Российского минералогического общества. – 2020. – Т. 149, № 2. – С. 55–61.
7. *Власова Э. А., Хмельков А. М.* Морфогенетические особенности гранатов из россыпи Дьюкунах, Якутская алмазоносная провинция // Руды и металлы. – 2021. – № 1. – С. 106–112.
8. *Харькив А. Д., Белик Ю. П., Илупин И. П.* О находке «кубоидов» пиропа на Сибирской платформе // Геология и геофизика. – 1970. – № 7. – С. 117–121.
9. *Хмельков А. М.* Основные минералы кимберлитов и их эволюция в процессе ореолообразования (на примере Якутской алмазоносной провинции). – Новосибирск : АРТА, 2008. – 252 с.
10. *Хмельков А. М.* Пирамидально-черепитчатый тип растворения и возможность его образования на пикроильменитах // Вестник Воронежского гос. у-та. Сер. Геология. – 2011. – № 2. – С. 256–263.
11. *Хмельков А. М.* Эпигенетические изменения кимберлитовых минералов в осадочном коллекторе в результате формирования складчатости // Вестник Воронежского гос. у-та. Сер. Геология. – 2015. – № 1. – С. 73–82.
12. *Школа И. В.* Геологическая карта СССР масштаба 1 : 200 000, листы R-51-I, II. Объяснительная записка / под науч. ред. Д. А. Вольнова. – М., 1985. – 71 с.
13. *Юшкин Н. П.* Проблемы археологической минералогии Урала / Минералы в материальной культуре древних уральских народов. – Свердловск; Миасс : Ин-т минералогии. – 1988. – С. 3–7.
14. *Юшкин Н. П.* Наука: труд, поиск, жизнь. – Екатеринбург : УрО РАН, 2006. – 464 с.
15. *Gravenor C. P., Leavitt R. K.* Experimental formation and significance of etch patterns on detrital garnets // Canadian Journal of Earth Sciences. – 1981. – Т. 18, №. 4. – С. 765–775.

References

1. Afanas'ev V. P., Belik Yu. P., Yarosh A. A. O novoi morfologicheskoi raznovidnosti pikroil'menita iz almazonosnykh rossypei [About a new morphological variety of picroilmenite from diamondiferous placers], *Mineralogicheskii sbornik L'vovskogo universiteta* [*Mineralogical Collection of Lviv University*], 1976, No 30, V. 1, pp. 73–74. (In Russ.).
2. Afanas'ev V. P., Gerasimov A. Yu., Babenko V. V. Samoogranenie pikroil'menita v protsesse istiraniya kak sledstvie anizotropii ego mekhanicheskikh svoistv [Self-degradation of picroilmenite in the process of abrasion as a consequence of anisotropy of its mechanical properties], Mineralogicheskaya kristallografiya i ee primenenie v praktike geologorazvedochnykh rabot [Mineralogical crystallography and its application in the practice of geological exploration], Kiev, Naukova dumka Publ., 1986. pp. 159–163. (In Russ.).
3. Afanas'ev V. P., Zinchuk N. N. Mineralogicheskie poiski mestorozhdenii almazov: razvitie, sostoyanie, perspektivy [Mineralogical prospecting of diamond deposits: development, state, prospects], Geologiya almazov – nastoyashchee i budushchee [Diamond Geology – Present and Future], Voronezh, Voronezh State University, 2005, pp. 1291–1318. (In Russ.).
4. Afanas'ev V. P., Zinchuk N. N., Pokhilenko N. P. Morfologiya i morfogenez indikatornykh mineralov kimberlitov [Morphology and morphogenesis of kimberlite indicator minerals], Novosibirsk, SB RAS Publ., 2001, 276 p.
5. Afanas'ev V. P., Zinchuk N. N., Pokhilenko N. P. Poiskovaya mineralogiya almaza [Diamond Prospecting Mineralogy], Novosibirsk, Geo Publ., 2010, 650 p.
6. Vlasova E. A., Khmelkov A. M. Variatsii sostava olivina iz ksenolitov v kimberlitakh Yakutii [Variations of composition of olivine from xenolites in kimberlites of Yakutia]. *Zapiski Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva* [*Proceedings of the*

© Хмельков А. М., Чугуевская Э. А., 2025
© Khmelkov A. M., Chuguevskaya E. A., 2025

Руды и металлы № 1/2025, с. 40–56 / Ores and metals № 1/2025, p. 40–56
DOI: 10.47765/0869-5997-2025-10003

Russian Mineralogical Society], 2020, V. 149, No 2, pp. 55–61. (In Russ.).

7. Vlasova E. A., Khmelkov A. M. Morfogeneticheskie osobennosti granatov iz rossypi D'yukunakh, Yakutskaya almazonosnaya provintsiya [Morphogenetic features of garnets from Dyukunakh placer, Yakutian diamondiferous province]. *Rudy i metally* [*Ores and metals*], 2021, No 1, pp. 106–112. (In Russ.).
8. Khar'kiv A. D., Belik Yu. P., Ilupin I. P. O nakhodke «kuboidov» piropa na Sibirskoi platforme [On the discovery of pyrope "cuboids" on the Siberian Platform]. Geologiya i geofizika [*Geology and Geophysics*], 1970, No 7, pp. 117–121. (In Russ.).
9. Khmelkov A. M. Osnovnye mineraly kimberlitov i ikh evolyutsiya v protsesse oreoloobrazovaniya (na primere Yakutskoi almazonosnoi provintsii) [The main minerals of kimberlites and their evolution in the process of halation (on the example of the Yakutian diamondiferous province)], Novosibirsk, ARTA Publ., 2008, 252 p.
10. Khmelkov A. M. Piramidal'no-cherepitchatyi tip rastvoreniya i vozmozhnost' ego obrazovaniya na pikroil'menitakh [Pyramidal-tiled type of resorption and the possibility of its formation on picroilmenites]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya* [*Proceedings of Voronezh State Universiry. Series: Geology*], 2011, No 2, pp. 256–263. (In Russ.).
11. Khmelkov A. M. Epigeneticheskie izmeneniya kimberlitovykh mineralov v osadochnom kollektore v rezul'tate formirovaniya skladchatosti [Epigene changes of kimberlite minerals in a sedimentation reservoir as a result of folding]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya* [*Proceedings of Voronezh State Universiry. Series: Geology*], 2015, No 1, pp. 73–82. (In Russ.).
12. Shkola I. V. Geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1 : 200 000, listy R-51-I, II. Ob"yasnitel'naya zapiska [Geological map of the USSR at a scale of 1 : 200,000, sheets R-51-I, II. Explanatory note], Ed. D. A. Vol'nov, Moscow, 1985, 71 p.
13. Yushkin N. P. Problemy arkheologicheskoi mineralogii Urala [Problems of archaeological mineralogy of the Urals], Mineraly v material'noi kul'ture drevnikh ural'skikh narodov [Minerals in the material culture of ancient Uralic peoples], Sverdlovsk, Miass, Institute of mineralogy Publ., 1988, pp 3–7. (In Russ.).
14. Yushkin N. P. Nauka: trud, poisk, zhizn' [Science: labor, search, life], Ekaterinburg, UB RAS Publ., 2006, 464 p.
15. Gravenor C. P., Leavitt R. K. Experimental formation and significance of etch patterns on detrital garnets, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1981, V. 18, No 4, pp. 765–775.

Хмельков Александр Михайлович (st_56@mail.ru)
кандидат геолого-минералогических наук, ветеран АК «АЛРОСА» (ПАО)

Чугуевская Эльвира Александровна
геолог I категории

АК «АЛРОСА» (ПАО), Вилюйская геологоразведочная экспедиция, г. Новосибирск, Россия

© Хмельков А. М., Чугуевская Э. А., 2025
© Khmelkov A. M., Chuguevskaya E. A., 2025